



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE CIENCIAS**  
**CARRERA BIOFÍSICA**

**IRRADIACIÓN DE CAROTENOS ALFA-BETA EN ZANAHORIA  
(DAUCUS CAROTA) EN CELDA FOTOSINTÉTICA, USANDO  
TRANSPORTE DE IONES A TRAVÉS DE MEMBRANAS  
PERMEABLES.**

**Trabajo de Integración Curricular**

Tipo: Trabajo Experimental

Presentado para optar al grado académico de:

**BIOFÍSICO**

**AUTOR:**

**RICHARD ANDRES CASTILLO VIVANCO**

Riobamba – Ecuador

2024



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE CIENCIAS**  
**CARRERA BIOFÍSICA**

**IRRADIACIÓN DE CAROTENOS ALFA-BETA EN ZANAHORIA  
(DAUCUS CAROTA) EN CELDA FOTOSINTÉTICA, USANDO  
TRANSPORTE DE IONES A TRAVÉS DE MEMBRANAS  
PERMEABLES.**

**Trabajo de Integración Curricular**

Tipo: Trabajo Experimental

Presentado para optar al grado académico de:

**BIOFÍSICO**

**AUTOR: RICHARD ANDRES CASTILLO VIVANCO**

**DIRECTORA: BIOF. CORALIA FABIOLA CUADRADO PUMALEMA**

Riobamba – Ecuador

2024

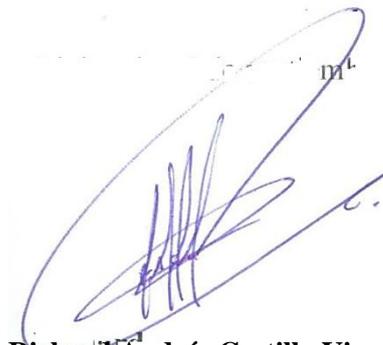
© 2024, **Richard Andrés Castillo Vivanco**

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Yo, Richard Andrés Castillo Vivanco, declaro que el presente trabajo de Integración Curricular es de mi autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autor asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este Trabajo de Integración Curricular; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 6 de septiembre de 2024



**Richard Andrés Castillo Vivanco**

**C.I 0604681403**

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE CIENCIAS**  
**CARRERA BIOFÍSICA**

El Tribunal del Trabajo de Integración Curricular certifica que: El Trabajo de Integración Curricular; Tipo: Trabajo Experimental, **IRRADIACIÓN DE CAROTENOS ALFA-BETA EN ZANAHORIA (DAUCUSCAROTA) EN CELDA FOTOSINTÉTICA, USANDO TRANSPORTE DE IONES A TRAVÉS DE MEMBRANAS PERMEABLES.**, realizado por el señor: **RICHARD ANDRES CASTILLO VIVANCO**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Integración Curricular, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

	<b>FIRMA</b>	<b>FECHA</b>
Biof. Diana Carolina Coello Fiallos Phd. <b>PRESIDENTE DEL TRIBUNAL</b>		2024-09-06
Biof. Coralia Fabiola Cuadrado Pumalema Msc. <b>DIRECTORA DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR</b>		2024-09-06
Biof. Azucena Nataly Bonilla Garcia Msc. <b>ASESORA DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR</b>		2024-09-06

## **DEDICATORIA**

A Dios que nos asombra como a niños con la maravilla de su creación. A Jesucristo en quien reside mi fe. A mi madre que me dio la luz para esta vida. A mi esposa, mi compañera, admiradora, mejor amiga y mucho más. Y a todas las personas que han motivado esa vena científica en su servidor.

Richard

## **AGRADECIMIENTO**

'Cuando la sabiduría entra en tu corazón, Y la ciencia fuere grata a tu alma, La discreción te guardará; Te preservará la inteligencia,' Proverbios 2:10-11. A la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo que me permitió llamarla alma mater y en ella crecer personal y académicamente. Esta Tesis no hubiera sido posible sin el valorado apoyo académico de: Gabriela Ureña, por el acceso a los laboratorios que vieron la luz de esta investigación; Y Coralia Cuadrado, que supo guiarme en el último esfuerzo por egresar como biofísico de la República del Ecuador. Reconocimiento a todos los amigos cercanos y de la carrera que me animaron a perseverar; a todos los familiares que estuvieron atentos a que culmine esta etapa de mi vida. Especial reconocimiento merecen los altibajos de la vida que son esa forja que nos hacen más fuertes y agudos para pruebas venideras.

Richard

## ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	x
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	xi
ÍNDICE DE ANEXOS .....	xiii
RESUMEN.....	xiv
ABSTRACT .....	xv
INTRODUCCIÓN .....	1

### CAPÍTULO I

1. DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA.....	2
1.1. Planteamiento del Problema .....	2
1.2. Justificación .....	2
1.2.1. <i>Justificación Teórica</i> .....	2
1.2.2. <i>Justificación Metodológica</i> .....	3
1.2.3. <i>Justificación Práctica</i> .....	3
1.3. Objetivos .....	4
1.3.1. <i>Objetivo General.</i> .....	4
1.3.2. <i>Objetivos Específicos.</i> .....	4

### CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO .....	5
2.1. Antecedentes de investigación.....	5
2.2. Transporte de iones a través de la membrana y Potenciales de difusión.....	6
2.3. Los complejos antena .....	7
2.4. Pigmentos excitados .....	8
2.5. Foto protección.....	9
2.6. Dispersión de energía.....	9
2.7. Los carotenoides .....	10
2.7.1. <i>Estructura química de los carotenoides</i> .....	11
2.7.2. <i>Propiedades de los carotenoides</i> .....	12
2.7.2.1. <i>Propiedades Físicas</i> .....	12
2.7.2.2. <i>Propiedades Espectroscópicas</i> .....	12

2.7.2.2.1	Espectroscopia UV-VIS en carotenoides .....	13
2.7.2.2.2	Espectroscopia FT-IR en carotenoides .....	14
2.7.2.3.	<i>Propiedades Químicas</i> .....	15
2.7.2.4.	<i>Carotenoides en el sistema fotosintético</i> .....	16
<b>2.8.</b>	<b>Celdas fotovoltaicas</b> .....	<b>17</b>
2.8.1.	<i>Uso de las celdas fotovoltaicas</i> .....	17
2.8.2.	<i>Celdas solares sensibilizadas con colorantes</i> .....	17
<b>2.9.</b>	<b>Regla del neperiano</b> .....	<b>17</b>

### CAPÍTULO III

<b>3.</b>	<b>MARCO METODOLÓGICO</b> .....	<b>19</b>
3.1.	Nivel de Investigación .....	19
3.2.	Enfoque de investigación .....	19
3.3.	Diseño de investigación .....	20
3.4.	Tipo de estudio. ....	21
3.5.	Población y Planificación, cálculo del tamaño de la muestra.....	21
3.6.	Materiales .....	22
3.7.	Métodos y técnicas de investigación .....	36
3.7.1.	<i>Método para la preparación de la solución salina</i> .....	36
3.7.2.	<i>Método para la obtención del zumo de <i>Daucus carota</i></i> . ....	37
3.7.3.	<i>Método para la elaboración disolución de concentrado de carotenoides</i> .....	38
3.7.4.	<i>Método para Cálculo de carotenoides netos</i> .....	39
3.7.5.	<i>Método para elaboración de Celda fotosintética</i> .....	41
3.7.6.	<i>Método para la producción de la membrana permeable</i> .....	41
3.7.7.	<i>Irradiación luz láser 405 nm</i> .....	44
3.7.8.	<i>Estudios espectroscópicos</i> .....	46

### CAPÍTULO IV

<b>4.</b>	<b>ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS</b> .....	<b>48</b>
4.1.	Estudios espectroscópicos.....	48
4.1.1.	<i>Espectroscopia UV- VIS del carotenoide</i> .....	48
4.1.2.	<i>Espectroscopia FT-IR del carotenoide</i> .....	50
4.2.	Caracterización de la producción energética de los carotenoides .....	51

## **CAPÍTULO V**

<b>5.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>54</b>
<b>5.1.</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>54</b>
<b>5.2.</b>	<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>56</b>

## **BIBLIOGRAFÍA**

## **ANEXOS**

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 3-1:</b>	Tabla de sustancias y reactivos.....	23
<b>Tabla 3-2:</b>	Materiales de laboratorio usados para la preparación de las membranas, carotenoides. ....	25
<b>Tabla 3-3:</b>	Descripción de los equipos usados para la obtención de membranas, carotenoides e irradiación. ....	28
<b>Tabla 3-4:</b>	Información de configuración de la Espectroscopia UV- VIS.....	46
<b>Tabla 3-1:</b>	Información de configuración de la Espectroscopia FT-IR .....	47

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

<b>Ilustración 2-1:</b>	Potencial de difusión .....	7
<b>Ilustración 2-2:</b>	Energía del estado excitado de los pigmentos.....	8
<b>Ilustración 2-3:</b>	Estructura de la clorofila a y b, del $\beta$ -caroteno y de los carotenoides que conforman el ciclo de las xantofilas. ....	9
<b>Ilustración 2-4:</b>	Estado altamente atenuado del fotosistema.....	10
<b>Ilustración 2-5:</b>	Espectro de absorción UV-VIS general para los carotenoides, donde la longitud de onda de máxima absorción se representa en números romanos. 14	
<b>Ilustración 2-6:</b>	Espectro de absorción FT-IR general para los carotenoides. ....	15
<b>Ilustración 2-7:</b>	Participación del $\beta$ -caroteno en la inactivación ERON.....	15
<b>Ilustración 3-1:</b>	Medición de NaCl .....	36
<b>Ilustración 3-2:</b>	Matraz de aforo .....	36
<b>Ilustración 3-3:</b>	Extracción de zumo de <i>Daucus carota</i> .....	37
<b>Ilustración 3-4:</b>	Medición de residuos de <i>Daucus carota</i> .....	37
<b>Ilustración 3-5:</b>	Medición de extracto de <i>Daucus carota</i> .....	38
<b>Ilustración 3-6:</b>	Obtención de concentrado de <i>Daucus carota</i> .....	38
<b>Ilustración 3-7:</b>	Composición (1:1) acetona y propanol .....	39
<b>Ilustración 3-8:</b>	Obtención de carotenoides .....	39
<b>Ilustración 3-9:</b>	20 ml Disolución de carotenoides .....	40
<b>Ilustración 3-10:</b>	Disolución de carotenoides a baño maría.....	40
<b>Ilustración 3-11:</b>	Pesaje de residuos en vaso de precipitación.....	40
<b>Ilustración 3-12:</b>	Celda fotosintética (a y c vistas superiores, b y d vistas laterales).....	41
<b>Ilustración 3-13:</b>	Solución salina .....	42
<b>Ilustración 3-14:</b>	Colocación de portaobjetos .....	42
<b>Ilustración 3-15:</b>	Cristalización de la membrana .....	43
<b>Ilustración 3-16:</b>	Colocación de portaobjetos en la celda. ....	43
<b>Ilustración 3-17:</b>	Preparación de celda.....	43
<b>Ilustración 3-18:</b>	Preparación calibración de mesa óptica .....	44
<b>Ilustración 3-19:</b>	Preparación de celdas con carotenoides y solución salina. ....	45
<b>Ilustración 3-20:</b>	Cálculo de pérdidas .....	45
<b>Ilustración 3-21:</b>	Irradiación de celdas.....	45
<b>Ilustración 3-22:</b>	Observación del comportamiento de celdas .....	46
<b>Ilustración 4-1:</b>	Gráfica espectro de absorción UV- VIS de carotenoides en disolución.....	49

<b>Ilustración 4-2:</b>	Gráfica espectro de absorción FT-IR carotenoides vs blando (frangas subrayadas).....	51
<b>Ilustración 4-3:</b>	Resultados variación de corriente en función del tiempo (celda alfa).....	52
<b>Ilustración 4-4:</b>	Resultados variación de corriente en función del tiempo (celda beta).....	53

## **ÍNDICE DE ANEXOS**

- ANEXO A:** CÁLCULO DE PRODUCCIÓN ENERGÉTICA DEL BLANCO IRRADIADO
- ANEXO B:** DATOS DE MEDICIÓN DE LA CELDA ALFA
- ANEXO C:** DATOS DE MEDICIÓN DE LA CELDA BETA
- ANEXO D:** DATOS COMPARATIVOS EN CELDA ALFA CON CORRIENTE INICIAL Y FINAL A TRAVÉS DEL TIEMPO
- ANEXO E:** DATOS COMPARATIVOS EN CELDA BETA CON CORRIENTE INICIAL Y FINAL A TRAVÉS DEL TIEMPO

## RESUMEN

El objetivo fundamental de esta investigación consistió en la caracterización minuciosa del proceso de producción energética durante la irradiación de carotenoides alfa y beta presentes en *Daucus carota* inmersos en un medio salino dentro de celda fotosintética impresa en ácido poliláctico (PLA) para generar un potencial de difusión. Este estudio se enfocó en comprender a profundidad cómo estos carotenoides, mismos que sirven de herramienta para la transformación de energía lumínica a eléctrica por la deslocalización de electrones, experimentan cambios estructurales y químicos bajo condiciones específicas de radiación y transporte de iones. Esta tesis ha sido realizada bajo un enfoque principalmente cuantitativo- experimental, mediante la medición cuantitativa de la energía transformada por los carotenoides en disolución sometidos a distintas intensidades de luz laser durante la carga del sistema y la descarga del sistema en la ausencia de luz laser. Los resultados obtenidos de estos experimentos representan una contribución significativa al conocimiento actual sobre la respuesta de los carotenoides ante condiciones específicas de radiación lumínica y transporte de iones. Estos hallazgos amplían la comprensión de la fotobiología y la bioquímica de los carotenoides en *Daucus carota*. Al proporcionar información detallada sobre los procesos de degradación y estabilidad de estos compuestos valiosos, este estudio sienta las bases para investigaciones futuras destinadas a mejorar el entendimiento del comportamiento molecular excitado de los carotenoides.

**Palabras clave:** <FOTOBIOLOGIA>, <CAROTENOIDES>, <DAUCUS CAROTA>, <RADIACIÓN LUMÍNICA>, <DESLOCALIZACIÓN ELECTRÓNICA>, <CELDA FOTOSINTÉTICA>, <POTENCIAL DE DIFUSIÓN>.

1654-DBRAI-UPT-2024



## ABSTRACT

The main objective of this research was the detailed characterization of the energy production process during irradiation of alpha and beta carotenoids present in *Daucus carota* immersed in a saline medium inside a photosynthetic cell printed in polylactic acid (PLA). This study focused on understanding in depth how these carotenoids, which serve as a tool for the transformation of light energy into electrical energy, undergo structural and chemical changes under specific conditions of radiation and ion transport. This thesis has been carried out under a mainly quantitative-experimental approach, through the quantitative measurement of the energy transformed by carotenoids in solution subjected to different intensities of laser light during the charging of the system and the discharging of the system in the absence of laser light. The results obtained from these experiments represent a significant contribution to the current knowledge about the response of carotenoids to specific conditions of light radiation and ion transport. These findings expand the understanding of the photobiology and biochemistry of carotenoids in *Daucus carota*. By providing detailed information on the degradation processes and stability of these valuable compounds, this study lays the foundation for future research aimed at improving the understanding of the excited molecular behavior of carotenoids.

**Keywords:** <PHOTOBIOLOGY> <CAROTENOIDS> <CARROT (*Daucus carota*)> <LIGHT RADIATION> <ELECTRONIC DELOCATION> <PHOTOSYNTHETIC CELL> <DIFFUSION POTENTIAL>.

1654-DBRAI-UPT-2024



Lic. Luis Armando Quishpe Hipo, Mgs.

C.I. 0102801016

DOCENTE INGLES CARRERA DE FISICA

## INTRODUCCIÓN

La fotosíntesis emplea pigmentos fotosintéticos primarios y secundarios. Los carotenoides disipan energía resonando y transfiriendo electrones. Esta investigación analiza cómo la exposición continua de carotenoides a láser de longitud de onda 405 nm y a los iones afecta su estructura y producción de energía en celdas fotosintéticas. Los pigmentos fotosintéticos cuando son excitados por distintas frecuencias de luz dentro de su espectro de absorción presentan diversas formas de liberación de energía. En el caso de los pigmentos como la clorofila alfa y beta contienen magnesio en su estructura que se oxida *in vitro*, desactivando así la molécula. Sin embargo, los carotenoides sin la presencia de magnesio en su estructura, que incluyen carotenos alfa y beta, xantofilas y terpenos, son capaces de liberar energía en forma de electrones. Los carotenoides son unos de los pigmentos orgánicos más abundantes en la naturaleza, con más de 750 compuestos documentados hasta la fecha (Arathi & Lakshminarayana, 2015). Estos compuestos desempeñan un papel fundamental en una amplia gama de procesos biológicos, incluidos la fotosíntesis, la protección contra el fotodaño, la señalización celular y la acción antioxidante (Igreja et al., 2021).

Los carotenos alfa y beta se encuentran en una variedad de vegetales, como la *Daucus carota*. Estos carotenoides tienen la capacidad de cambiar alternadamente en isómeros *cis-trans* y en forma de xantofilas por hidroxilación. Entre los carotenoides más comunes en la dieta humana se encuentran el  $\alpha$ -caroteno y el  $\beta$ -caroteno (Bergantin et al., 2018). Estos compuestos se caracterizan por presentar una estructura molecular con múltiples dobles enlaces conjugados (d.e.c.), lo cual les confiere propiedades ópticas y fotoquímicas únicas (Rivera & Canela-Garayoa, 2012).

# CAPÍTULO I

## 1. DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA

### 1.1. Planteamiento del Problema

A pesar de los avances logrados en la comprensión de la fotobiología y la bioquímica de los carotenoides, aún existen importantes vacíos de conocimiento en cuanto al comportamiento de estos compuestos bajo condiciones específicas de radiación lumínica y transporte de iones a través de membranas permeables.

En este contexto, la presente investigación se propone caracterizar detalladamente los procesos de producción energética de los carotenoides alfa y beta en la zanahoria, analizando los cambios estructurales y químicos que experimentan bajo dichas condiciones experimentales

Esta investigación plantea ¿cómo la luz continua afecta los carotenoides y su interacción con iones, influyendo en su producción de energía en celdas fotosintéticas?

A su vez, emular condiciones celulares es crucial para mejorar la eficiencia de conversión de la energía solar y para ampliar las aplicaciones de los pigmentos fotosintéticos.

### 1.2. Justificación

#### 1.2.1. Justificación Teórica

La investigación se llevó a cabo enfocada en la irradiación de carotenoides que son duraderos, a diferencia de la clorofila, y generan energía mediante la transferencia de electrones. Tiene relevancia desde una perspectiva teórica debido a su relación con la fotosíntesis y la producción de energía ecológica. El objetivo es comprender cómo la exposición prolongada a la luz y la interacción con iones afectan la estabilidad de los carotenoides.

Este estudio se llevó a cabo mediante experimentos que incluyen la exposición de muestras de celdas fotosintéticas a diferentes intensidades de luz en un medio de iones específicos para evaluar su impacto en los pigmentos. Varias investigaciones de celdas solares sensibilizadas con pigmentos (DSSC) no parecen mostrar el carácter de los carotenos por estar enlazados químicamente al conductor (Supriyanto, Nurosyid, & H Ahliha, 2018).

La finalidad principal de este trabajo es ampliar el conocimiento sobre los procesos que influyen en los carotenoides en celdas fotosintéticas. Esta investigación, a su vez, contribuirá al entendimiento de la fotosíntesis y las posibilidades de producción de energía ecológica. Por último, se busca identificar aplicaciones prácticas de estos descubrimientos en áreas como la biotecnología y la energía renovable.

### ***1.2.2. Justificación Metodológica***

La metodología propuesta del estudio experimental se apoyó en bibliografía para validar su idoneidad en abordar el problema planteado. Dos etapas clave destacan en el proceso: la extracción de un concentrado lipídico (Aràndiga Martí & Díaz Sánchez, 2008), y la fabricación de paneles fotosintéticos a partir de PLA (Quijano Rentería, 2017).

Además, la exposición controlada a un haz láser de longitud de onda ~405 nm y la subsiguiente medición de la producción energética se identifican como técnicas fundamentales para evaluar la reacción de los carotenoides. Esta elección metodológica garantiza no solo la reproducibilidad de los resultados, sino también un análisis cuantitativo de la producción energética o modificaciones estructurales observadas en los pigmentos fotosintéticos.

### ***1.2.3. Justificación Práctica***

La investigación propuesta tiene implicaciones prácticas significativas en el avance de tecnologías de energía renovable puesto que responde que los carotenoides en dichas condiciones mayormente liberan energía a través de electrones. La capacidad de generar electricidad a partir de DSSC es crucial para la búsqueda de soluciones energéticas sostenibles (Taco Ugsha, 2017). Entender cómo los carotenoides reaccionan en estas condiciones es fundamental para optimizar la eficiencia de los sistemas de energía fotosintética.

Este proceso podría ser una sencilla guía práctica de laboratorio en la Facultad de Ciencias de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo para concientizar a los estudiantes sobre energías renovables y a su vez dar pauta de nuevos temas de tesis.

### **1.3. Objetivos**

#### ***1.3.1. Objetivo General.***

Caracterizar la producción energética de carotenoides en una celda fotosintética, irradiados con luz láser 405 nm y sometidos a un medio de transporte de iones a través de membranas permeables.

#### ***1.3.2. Objetivos Específicos.***

- Construir celdas fotosintéticas útiles para el transporte de iones a través de membranas permeables.
- Obtener una disolución de concentrado lipídico a partir de *Daucus Carota*.
- Exponer las celdas fotosintéticas a un haz de luz de 405 nm para medir la producción energética de la disolución de carotenoides en un medio de iones.

## CAPÍTULO II

### 2. MARCO TEÓRICO

#### 2.1. Antecedentes de investigación

En el año 2016, se llevó a cabo una investigación en los laboratorios de la Facultad de Ciencias de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Esta investigación se centró en el proceso de fotosíntesis y tuvo como objetivo principal encontrar una proporción adecuada entre solución salina y disolución de carotenoides para la obtención de energía a partir exposición de luz led azul de los carotenoides alfa y beta en celda fotosintética (Castillo Vivanco, 2016, pág.25).

Los carotenoides, que son pigmentos naturales, muestran una eficiencia máxima de absorbancia de aproximadamente el 60 % en las regiones del espectro azul. El propósito de este estudio fue identificar los mejores enfoques para acercarse a la absorbancia de la frecuencia de luz emitida (Taiz & Zeiger, Fisiología Vegetal, 2006).

Los carotenoides desempeñan un papel crucial en la fotosíntesis y han sido objeto de estudio durante muchos años debido a sus propiedades fisicoquímicas, las cuales están directamente relacionadas con su estructura química (Meléndez Martínez, Vicario, & Heredia, 2007, pg. 1).

El sistema (d.e.c.) presente en los carotenoides le otorga sus propiedades fisicoquímicas más importantes para este estudio tales como su carácter hidrofóbico, espectro de absorción y la deslocalización de electrones. (Meléndez Martínez, Vicario, & Heredia, 2007, pg. 1)

La luz es uno de los factores más heterogéneos y energéticos en la fotosíntesis. Los pigmentos primarios, como las clorofilas, son los principales responsables de la transformación de energía lumínica a química útil para las células vegetales. Acompañando a estos pigmentos primarios, se encuentran los pigmentos accesorios, cuya función es ampliar el espectro de absorción de los pigmentos primarios y protegerlos contra la exposición a la luz de frecuencias de mayor energía (Manrique Reol, 2003, págs. 2-4).

Michael Grätzel introdujo las celdas solares sensibilizadas con colorante, conocidas como DSSC. Estas celdas utilizan dióxido de titanio o zinc como semiconductores. Además, emplean pigmentos naturales y un electrolito, lo que las convierte en una forma prometedora de energía renovable para la generación de electricidad (Navarro Vásquez, 2015).

Para cuantificar el contenido de carotenoides totales Talcott y Howard (1999) emplearon el método espectrofotométrico a 470 nm. Este estudio reveló que la *Daucus carota* tiene al  $\beta$ -caroteno como su carotenoide principal (Burgos Sierra & Calderon Rivera, 2012, págs. 16-17).

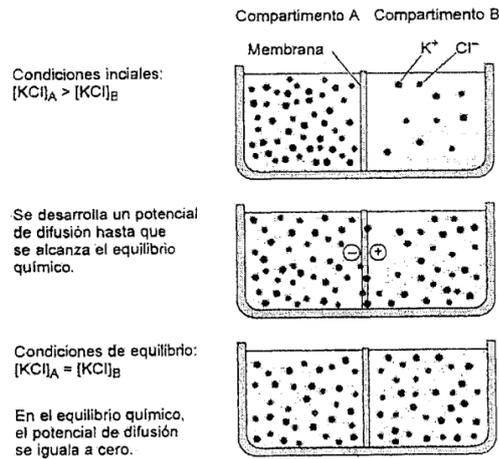
El Dr. Paulraj Manidurai y el Dr. Sivakumar Radhakrishnan han llevado a cabo investigaciones en la producción de energía renovable a partir de alimentos con altos contenidos de carotenoides (espinaca, maqui, zanahoria y zapallo). Este trabajo se está desarrollando en la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Concepción, Chile. Los doctores han creado DSSC. Según el Dr. Manidurai, la adición de carotenoides a las celdas permite ampliar el espectro de absorción y, por lo tanto, aumentar la eficiencia de las celdas. Hasta la fecha, se han creado DSSC utilizando cereza, frambuesa y remolacha como fuentes de carotenoides. Actualmente, se están fabricando DSSC a partir de mortiño (Taco Ugsha, 2017), capulí, espinaca, zanahoria y zapallo (Navarro Vásquez, 2015).

El Dr. Hernández Cortez evidencia una presencia de especies de oxígeno activado en cloroplastos inmersos en solución de cloruro de sodio, de entre los cuales se resalta el ascorbato (Hernández Cortez, 1992).

## **2.2. Transporte de iones a través de la membrana y Potenciales de difusión**

El transporte de iones de potasio ( $K^+$ ) y cloruro ( $Cl^-$ ) a través de una membrana biológica que separa dos compartimentos está influenciado por la composición de la membrana y las propiedades químicas de los solutos. Esto se puede expresar en términos del coeficiente de difusión del soluto en la membrana, considerando varios factores que determinan su capacidad de penetración. La permeabilidad de la membrana se puede evaluar midiendo la velocidad a la que un soluto la atraviesa, lo cual retarda el proceso de difusión y afecta la rapidez con la que se alcanza el equilibrio (Taiz & Zeiger, Fisiología Vegetal, 2006).

Los iones que se difunden a través de la membrana tienen la capacidad de generar un potencial eléctrico. Este potencial implica una distribución desigual de cargas, aunque químicamente la disparidad es insignificante (Ilustración 2-1). Por ejemplo, un potencial eléctrico de 100 mV en una membrana puede resultar de una diferencia de tan solo el 0.001 % en la concentración de aniones, es decir, 100 mil aniones en un lado de la membrana en comparación con 100 mil aniones en el otro lado. Esto se logra manteniendo el principio de neutralidad eléctrica (Taiz & Zeiger, Fisiología Vegetal, 2006).



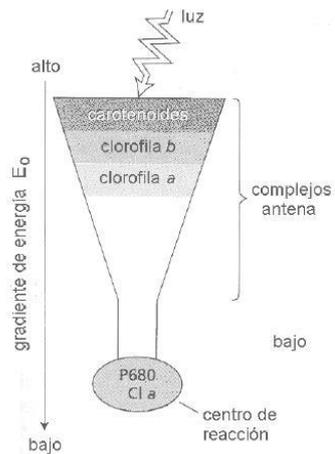
**Ilustración 2-1:** Potencial de difusión

Fuente: Taiz & Zeiger, Fisiología Vegetal, 2006)

### 2.3. Los complejos antena

Los complejos antena desempeñan un papel crucial en la captación y canalización eficiente de la energía lumínica hacia los centros de reacción en el proceso de fotosíntesis (Ilustración 2-2). Dado que un pigmento individual tiene una capacidad limitada para absorber un número reducido de fotones por segundo, estos complejos de antena comprenden un conjunto diverso de pigmentos diseñados para capturar la luz y direccionar su energía hacia los centros de reacción (Taiz & Zeiger, Fisiología Vegetal, 2006, pág. 216).

La transferencia de energía entre los pigmentos dentro de un complejo de antena se lleva a cabo mediante un fenómeno de resonancia, que logra canalizar entre el 95 % y el 99 % de los fotones que ingresan al complejo. La eficiencia de esta transferencia depende de factores como la distancia entre los pigmentos y su orientación relativa (Taiz & Zeiger, Fisiología Vegetal, 2006, págs. 228-229).



**Ilustración 2-2:** Energía del estado excitado de los pigmentos.

**Fuente:** Taiz & Zeiger, Fisiología Vegetal, 2006

Es importante destacar que los pigmentos ubicados en las regiones más alejadas del centro de reacción son inherentemente más energéticos que aquellos cercanos al centro, lo que garantiza la transferencia efectiva de energía por medio de este proceso de resonancia.

En los organismos fotosintéticos, los carotenoides forman parte de complejos proteicos conocidos como complejos antena. Estos complejos están constituidos por pigmentos fotosintéticos, incluidos los carotenoides, que captan la energía lumínica y la transfieren a los centros de reacción, donde se lleva a cabo la conversión de energía (Igreja et al., 2021)

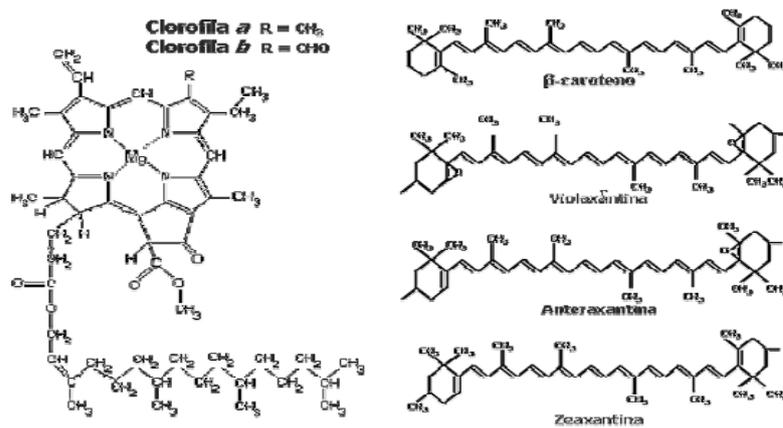
#### 2.4. Pigmentos excitados

Los pigmentos en un estado excitado tienen la capacidad de disipar su energía de diversas maneras, incluyendo fluorescencia, generación de calor, transferencia de energía a través de resonancia o electrones, así como procesos fotoquímicos. La irradiación de energía tiene el efecto de ionizar la solución (Taiz & Zeiger, Fisiología Vegetal, 2006, pág. 210). Además, los pigmentos en estado excitado tienden a perder electrones con facilidad cuando se encuentran cerca de moléculas receptoras (Taiz & Zeiger, Fisiología Vegetal, 2006, pág. 223).

Es importante destacar que el estado excitado de los pigmentos es una condición temporal que se mantiene estable solo durante unos segundos. Durante este tiempo, pueden transferir su energía a otro pigmento y regresar a su estado base liberando calor y electrones, o por fluorescencia y resonancia (Manrique Reol, 2003, pág. 7).

## 2.5. Foto protección

Los organismos fotosintéticos han evolucionado para soportar niveles elevados de luz solar regulando el exceso de energía protegiendo las clorofilas a través de reacciones que involucran un grupo específico de pigmentos conocidos como carotenoides (Ilustración 2-3) (Manrique Reol, 2003, pág. 8). Por lo tanto, los organismos adaptados a condiciones de alta intensidad lumínica presentarán una mayor concentración de xantofilas, con una proporción significativamente mayor de violaxantina (Manrique Reol, 2003, pág. 8). Durante los momentos de máxima intensidad lumínica, esta violaxantina se convierte en zeaxantina mediante la elongación de su sistema de dobles enlaces. La zeaxantina tiene la capacidad de disipar el exceso de energía en forma de calor. La proporción relativa de estas xantofilas, es decir, la cantidad de violaxantina y zeaxantina presentes, varía dependiendo de la intensidad lumínica en un proceso de adaptación. (Manrique Reol, 2003, pág. 8).



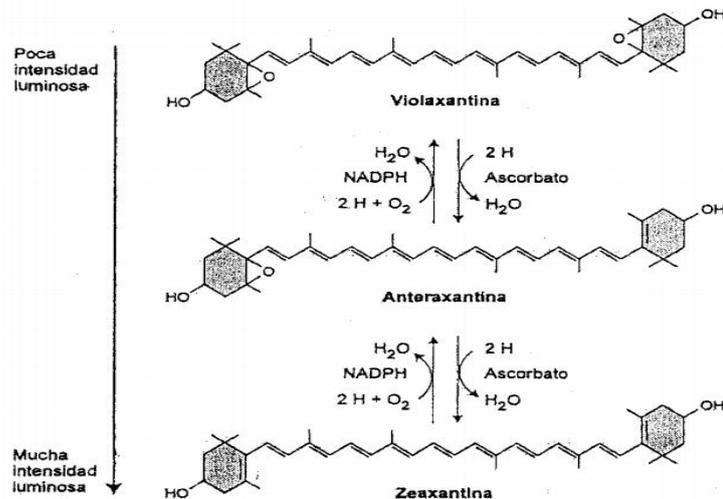
**Ilustración 2-3:** Estructura de la clorofila a y b, del  $\beta$ -caroteno y de los carotenoides que conforman el ciclo de las xantofilas.

Fuente: Manrique Reol, 2003

## 2.6. Dispersión de energía

La dispersión de energía se refiere al proceso de atenuación no fotoquímica, que consiste en regular la fluorescencia de la clorofila para ajustar el flujo de energía hacia el centro de reacción de manera óptima, en función de la intensidad de la luz incidente (Taiz & Zeiger, Fisiología Vegetal, 2006, pág. 253). En este contexto, se identifican tres carotenoides, conocidos como xantofilas, que desempeñan un papel crucial en el proceso de atenuación no fotoquímica. Estos carotenoides son la violaxantina, la antheraxantina y la zeaxantina.

Un metabolito resultante de los carotenoides alfa y beta, conocido como violaxantina, se convierte en zeaxantina bajo la influencia de una alta intensidad lumínica (ilustración 2-4). Esta conversión permite que los pigmentos carotenoides absorban la energía adicional cuando superan su capacidad de transformar la luz en energía, liberando dicha energía en forma de calor. Este proceso proporciona un nivel adicional de protección que mejora la durabilidad durante exposiciones prolongadas, como se detalla en el trabajo de (Taiz & Zeiger, Fisiología Vegetal, 2006, págs. 233-234).



**Ilustración 2-4:** Estado altamente atenuado del fotosistema

Fuente: Taiz & Zeiger, Fisiología Vegetal, 2006

## 2.7. Los carotenoides

Desde 1980 se han publicado alrededor de 7500 artículos sobre carotenoides en varias áreas de investigación de la química, la física, la alimentación y la biología. En el caso de la medicina su importancia se extiende debido a la coloración natural de carotenoides con profundos efectos fisiológicos, son comercialmente explotados como colorantes alimentarios y aditivos, se utilizan en productos farmacéuticos, nutriólogicos y productos cosméticos. La gran mayoría de los carotenoides se derivan del tetraterpenfiteno lineal (C40) (Carranco, Carrillo, & Pérez, 2011).

A su vez, los carotenoides desempeñan un papel crucial en sistemas biológicos, ya que se asocian con los complejos de antena y los centros de reacción. Actúan como pigmentos auxiliares que tienen la capacidad de disipar rápidamente la energía hacia las clorofilas (Taiz & Zeiger, Fisiología Vegetal, 2006, pág. 112). Los carotenoides son pigmentos isoprenoides poliénicos y altamente hidrofóbicos. Su naturaleza varía dependiendo del tipo de caroteno del que se derivan (Acacio Chirino, y otros, 2013, pág. 217).

En la naturaleza, se produce una cantidad significativa de carotenoides, que puede llegar a toneladas. En el reino animal, se encuentran en la leche y sus derivados, así como en los productos marinos. En el reino vegetal, se localizan en los cloroplastos y, en el caso de las *Daucus carota*, se cristalizan en forma de pigmentos en el tubérculo. Su función principal es proteger los tejidos vegetales de los efectos nocivos de la luz en el proceso de fotosíntesis, especialmente en tejidos con una alta concentración de clorofilas debido a su participación en complejos de antena (Burgos Sierra & Calderon Rivera, 2012, págs. 30-32).

### **2.7.1. Estructura química de los carotenoides**

Como ocurre con todos los compuestos químicos, las funciones de los carotenoides son causadas en última instancia por su estructura química. En particular el caso de estos isoprenoides, la característica estructural más llamativa es el sistema d.e.c. Característico de sus moléculas, que es el principal responsable de su espectro de absorción, reactividad, forma, localización en estructuras subcelulares y de su papel en procesos de transferencia de energía (Britton G, 1995). De modo que, la cantidad de carbonos d.e.c. no sólo afecta a sus propiedades de absorción de luz y por consiguiente a su color (Meléndez AJ, Britton G, Vicario IM & Heredia FJ, 2007), sino también a su reactividad frente a radicales, a la forma de la molécula (Weedon B.CL, 1995) y a su efectividad en los procesos de transferencia de energía dentro del aparato fotosintético (Young AJ, Phillip D, Ruban AV, Horton P & Frank HA, 1997).

Químicamente un carotenoide es un tetraterpeno simétrico lineal de 40 carbonos con ocho unidades isoprenoides de 5 carbonos conectadas en orden inversa en el centro. Esta estructura básica se puede lograr de diversas formas, que incluyen hidrogenación, deshidrogenación, ciclicidad, transferencia de doble enlace, acortamiento o alargamiento de cadena, reordenamiento, isomerización, introducción de función del oxígeno o una combinación de estos procesos, obteniendo una diversidad estructural. Es decir, la unión de dichas unidades es "cabeza-cola", excepto en el centro de la molécula, donde es "cabeza-cabeza". Debido a ello, los dos grupos metilo centrales de la cadena poliénica están separados por seis átomos de carbono, mientras que el resto están separados por cinco (Britton G, 1995). Algunos carotenoides son acíclicos, si bien la mayoría contienen anillos a uno o ambos extremos de la molécula. Considerando los elementos químicos presentes en sus moléculas, los carotenoides pueden dividirse en dos grandes grupos: carotenos, que son hidrocarburos, y xantofilas, que contienen átomos de oxígeno. Éste puede estar presente en forma de grupo hidroxilo (zeinoxantina, lactucaxantina, etc.), metoxilo (esferoidenona, espiriloxantina, etc.), epóxido (anteraxantina, licopeno-1,2-epóxido, etc.),

carbonilo (capsantina, esferoidenona, etc.) o carboxilo (norbixina, neurosporaxantina, etc.), principalmente (Mínguez M. I., 1997).

En la actualidad se sabe que la estructura química de los carotenoides se caracteriza por una larga cadena d.e.c., lo que les confiere propiedades ópticas y fotoquímicas únicas. Cuando estos compuestos absorben luz, los electrones de los enlaces dobles pasan a un estado excitado, lo que genera cambios estructurales y químicos (Rivera & Canela-Garayoa, 2012).

### **2.7.2. *Propiedades de los carotenoides***

#### **2.7.2.1. *Propiedades Físicas***

La solubilidad de los carotenoides en solventes apolares depende en gran medida de los grupos sustitutos que poseen. Además, son sensibles a factores ambientales como la luz, el calor y los ácidos peróxidos (Burgos Sierra & Calderon Rivera, 2012, pág. 36).

Los carotenoides son compuestos lipofílicos con estructuras d.e.c que les confieren colores brillantes, que van desde el amarillo al rojo (Rivera & Canela-Garayoa, 2012). Estos compuestos presentan una alta estabilidad térmica y química, lo que permite su aplicación en diversas industrias (Igreja et al., 2021).

#### **2.7.2.2. *Propiedades Espectroscópicas***

Las propiedades espectroscópicas de los carotenoides han sido determinadas a través de distintas técnicas como: espectroscopias UV-VIS, FT-IR, RAMAN, espectrofotometría de masas, entre otros. La coloración de los carotenoides se atribuye a su extenso sistema d.e.c. Por ejemplo, el fitoflueno, que tiene solo 5 dobles enlaces, es transparente, mientras que el Zeta Caroteno es de color amarillo suave, el Beta Caroteno es naranja y el Gamma Caroteno es rojo naranja debido a sus 11 dobles enlaces y ciclos. Esta característica espectroscópica resulta especialmente útil en estudios relacionados con las lipoproteínas de baja densidad (LDL) en el plasma humano.

### 2.7.2.2.1 Espectroscopia UV-VIS en carotenoides

La espectroscopia UV-VIS es una técnica analítica y se basa en el fenómeno que da color a los cuerpos, cuando un haz de luz blanca atraviesa una sustancia absorbe un rango de longitudes de onda mientras otro rango es reflejado, se dedica a proporcionar datos de las longitudes de onda capaces de producir transiciones de niveles de baja energía a niveles de mayor energía por la atenuación de un haz de luz ultravioleta en el rango visible atravesando una muestra que se identifica por la naturaleza del espectro y sus picos que dan información específica de la muestra.

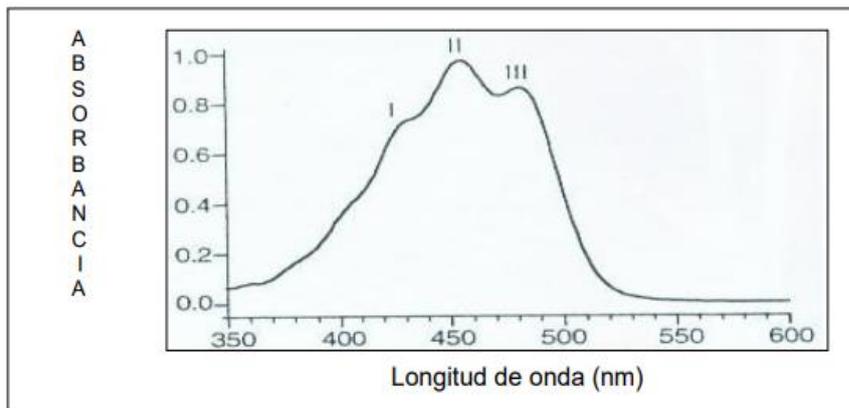
Los picos observados en el espectro (ilustración 2-5) corresponden a transiciones  $\pi-\pi^*$ , donde los electrones en un orbital molecular de enlace  $\pi$  (bonding) son excitados a un orbital  $\pi^*$  (antibonding) o antienlazante. En los carotenoides, la brecha de energía entre estos orbitales es relativamente pequeña debido a la extensa conjugación de dobles enlaces, lo cual permite la absorción en la región de menor energía (visible), específicamente alrededor de los 400-500 nm. El pico en 450.93 nm es particularmente significativo para el beta-caroteno, que tiene un sistema conjugado extenso capaz de absorber en esta longitud de onda. Este nivel de energía es ideal para las transiciones  $\pi-\pi^*$  en carotenoides y xantofilas, lo cual explica por qué el espectro muestra picos distintivos en esta región (Britton, 1995).

El grado de conjugación afecta directamente la longitud de onda y la intensidad de los picos de absorción. Los sistemas conjugados más largos, como los que se encuentran en el beta-caroteno, permiten una mayor deslocalización de electrones, lo que reduce la energía necesaria para las transiciones  $\pi-\pi^*$  y desplaza la absorción hacia longitudes de onda más largas. Este fenómeno, conocido como desplazamiento batocrómico o desplazamiento hacia el rojo, es evidente en el espectro a medida que la absorción se aproxima a los 500 nm. La presencia de xantofilas, que pueden introducir grupos funcionales adicionales (como hidroxilos) en el sistema conjugado, puede alterar ligeramente las interacciones  $\pi-\pi^*$ , resultando en desplazamientos sutiles o picos adicionales, como se observa (ilustración 2-5) con el segundo pico a 477.24 nm (Goodwin, 1980).

Las interacciones  $\pi$  en los carotenoides no solo contribuyen a sus propiedades de absorción, sino que también desempeñan un papel en su estabilidad y función. Los carotenoides con una conjugación  $\pi$  extensa, como el beta-caroteno, son más estables en términos de fotoprotección y pueden disipar la energía absorbida de la luz. Las xantofilas, por ejemplo, pueden participar en la disipación no fotoquímica, donde el exceso de energía lumínica se disipa de manera segura para proteger los componentes celulares. Esta capacidad de fotoprotección se debe en gran parte a las interacciones  $\pi$  que permiten una rápida deslocalización de electrones y una disipación segura de

la energía, lo cual es crucial para prevenir el daño oxidativo en organismos fotosintéticos (Krinsky & Johnson, 2005).

El estudio espectroscópico UV-VIS de carotenoides muestra las transiciones antes descritas (ilustración 2-5), (Burgos Sierra & Calderon Rivera, 2012, pág. 37).



**Ilustración 2-5:** Espectro de absorción UV-VIS general para los carotenoides, donde la longitud de onda de máxima absorción se representa en números romanos.

**Fuente:** Burgos Sierra & Calderon Rivera, 2012

#### 2.7.2.2.2 Espectroscopia FT-IR en carotenoides

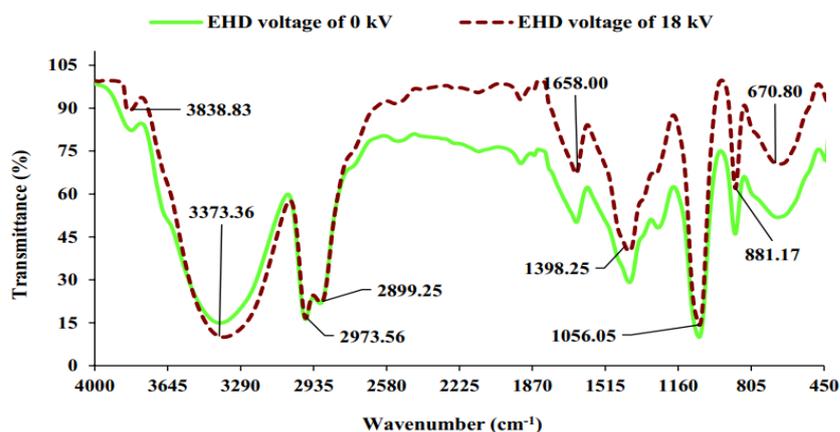
La espectroscopia FT-IR es una técnica analítica que permite proporcionar datos de los números de onda características de la vibración de enlaces atómicos específicos, existen grupos funcionales que absorben radiación en un rango específico de frecuencias sin importar si se encuentran enlazados a la molécula.

En los espectros FT-IR como la ilustración 2-6 existen varios rangos para identificar grupos funcionales. De 4000 a 2500  $\text{cm}^{-1}$  se encuentran bandas relacionadas con el estiramiento de enlaces O-H, C-H y N-H. Entre 3500 y 3200  $\text{cm}^{-1}$  se puede encontrar una banda ancha correspondiente al enlace O-H del agua y existen bandas características del estiramiento de enlaces C-H en las regiones de 3400 a 3200  $\text{cm}^{-1}$  y 3000 a 2800  $\text{cm}^{-1}$ . De 2500 a 2000  $\text{cm}^{-1}$  usualmente no aparecen bandas significativas a excepción de las correspondientes a triples enlaces como  $\text{C}\equiv\text{C}$ ,  $\text{C}\equiv\text{O}$  o  $\text{C}\equiv\text{N}$  (PMM Cortez, 2020).

De 2000 a 1500  $\text{cm}^{-1}$  se encuentran bandas relacionadas a la vibración de dobles enlaces como  $\text{C}=\text{C}$  y  $\text{C}=\text{O}$ , este último puede no apreciarse si se encuentra demasiado cerca de los 1650  $\text{cm}^{-1}$  y existe agua en la muestra (H-O-H) que posee una banda ancha alrededor de este número de onda.

La región de 1500 a 600  $\text{cm}^{-1}$ , denominada huella dactilar, contiene varios tipos de vibración que interactúan con enlaces vecinos resultante en un espectro particular para cada muestra.

En la ilustración 2-6 se presenta el estudio espectroscópico FT-IR de los carotenoides (Salehi y Taghian Dinani, 2020) donde se puede observar la presencia los siguientes grupos funcionales: OH,  $\text{CH}_2$ ,  $\text{C}=\text{C}$ ,  $\text{C}-\text{OH}$ ,  $\text{R}-\text{CH}=\text{CH}-\text{R}$  y  $\text{CH}=\text{CH}$ (PMM Cortez, 2020).

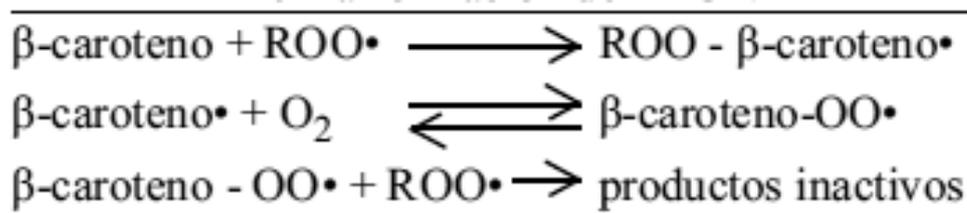


**Ilustración 2-6:** Espectro de absorción FT-IR general para los carotenoides.

Fuente: Salehi, L., & Taghian Dinani, S., 2020

### 2.7.2.3. Propiedades Químicas

Los radicales de Carotenoides de corta duración se generan de diversas maneras, como la oxidación, la reducción y la adición de electrones a la molécula. La actividad antioxidante permite la interacción con el oxígeno en presencia de luz para proteger contra el daño oxidativo celular (Ilustración 2-7). (Carranco Jáuregui, Calvo Carrillo, & Pérez-Gil Romo, 2011)



**Ilustración 2-7:** Participación del  $\beta$ -caroteno en la inactivación ERON (especies reactivas al oxígeno y nitrógeno)

Fuente: Carranco Jáuregui, Calvo Carrillo, & Pérez-Gil Romo, 2011

Además, los carotenoides pueden experimentar isomerización, es decir, un cambio en su configuración cis-trans debido al calor y la exposición a la luz (Burgos Sierra & Calderon Rivera, 2012, pág. 39).

La mayoría de los carotenoides están compuestos por 40 átomos de carbono, formados por 8 o menos unidades de isoprenos cuya disposición se invierte en el centro de la molécula, indicando que están constituidos por dos diterpenos idénticos. Son insolubles en agua, mientras que sus derivados oxigenados, conocidos como xantofilas, se disuelven en una matriz grasa durante los procesos de extracción, lo que incluye antioxidantes como la vitamina E para evitar la acción del oxígeno atmosférico (Flores, R., et al, 2005, pág. 1).

La coloración característica de los carotenoides se debe a los anillos en los extremos de la molécula y los dobles enlaces. Por ejemplo, las *Daucus carota* contienen carotenoides en forma de cromoplastos, que representan aproximadamente el 0.1% de su peso fresco. La exposición a la luz, entre otros factores, puede acelerar el cambio en su configuración isomérica (Flores, R., et al, 2005, pág. 1).

La categorización de los carotenoides se puede realizar de la siguiente manera en un contexto más formal:

- Carotenos: Estos compuestos son caracterizados por ser hidrocarburos ácidos o por tener uno o dos anillos de carbono que constan de 5 a 6 átomos en las terminaciones de su estructura molecular.
- Xantofilas: Estos son derivados de los carotenos y se distinguen por la presencia de grupos funcionales tales como hidroxilos, epóxidos, aldehídos o cetonas en su estructura química (Burgos Sierra & Calderon Rivera, 2012, pág. 36).
- Apocarotenos: Estos son carotenos que tienen cadenas de carbono de longitud reducida.

#### 2.7.2.4. *Carotenoides en el sistema fotosintético*

Los carotenoides desempeñan un papel clave en los procesos fotosintéticos, actuando como pigmentos accesorios que capturan y transfieren energía lumínica a los centros de reacción (Farré et al., 2010). Estos compuestos también participan en la protección del aparato fotosintético contra el fotodaño mediante la disipación del exceso de energía en forma de calor (Igreja et al., 2021).

Los carotenoides más abundantes en el sistema fotosintético de *Daucus carota* son el  $\alpha$ -caroteno y el  $\beta$ -caroteno. Estos compuestos se caracterizan por su estructura molecular conjugada, que les confiere propiedades ópticas únicas y les permite participar eficientemente en los procesos de transformación de energía lumínica en química (Rivera & Canela-Garayoa, 2012).

## **2.8. Celdas fotovoltaicas**

Las celdas fotovoltaicas, mediante el fenómeno conocido como efecto fotovoltaico, tienen la capacidad de convertir la energía luminosa en energía eléctrica. Este proceso implica que los fotones excitan los electrones presentes en las moléculas, permitiendo que se desprendan y generen una corriente eléctrica. Un módulo fotovoltaico está compuesto por la agrupación de múltiples celdas fotovoltaicas, las cuales pueden estar conectadas en configuraciones tanto en paralelo como en serie, tal como se detalla en la obra de referencia (Navarro Vásquez, 2015, pág. 55).

### ***2.8.1. Uso de las celdas fotovoltaicas***

El empleo de colorantes en celdas fotovoltaicas requiere que estos cumplan con determinados criterios específicos. Estos criterios incluyen una alta capacidad de absorción en el rango infrarrojo (IR), estados excitados de energía baja que facilitan la transferencia de electrones, la presencia de grupos de anclaje que promueven la interacción entre el colorante excitado y los aceptores de electrones, así como una estabilidad química que permita llevar a cabo múltiples ciclos redox. Estas condiciones se encuentran detalladas en la obra de Navarro (Navarro Vásquez, 2015, pág. 71).

### ***2.8.2. Celdas solares sensibilizadas con colorantes***

Las DSSC son una clase de celdas fotovoltaicas modernas que se caracterizan por su enfoque orgánico, dado que el pigmento desempeña un papel central en la absorción de la luz, a pesar de su susceptibilidad a degradarse con cierta rapidez (Navarro Vásquez, 2015, pág. 72).

## **2.9. Regla del neperiano**

Dentro de las mediciones siempre existirá un error de precisión a causa de los instrumentos además la propagación de errores causado por las operaciones matemáticas que requiere el presente trabajo de titulación. La regla del neperiano (Laboratorio de física, Universidad Carlos III de Madrid, 1998) dice que cuando una función tiene productos, divisiones, potencias o una combinación de estas operaciones el error de la función consiste en la suma del error de cada medida involucrada en la operación como se observa en la ecuación 2.1 y en la ecuación 2.2 para la función de producción de energía.

$$y = \frac{x_1 * x_2^n}{x_3} \quad ; \quad \Delta y = \left[ \frac{\Delta x_1}{|x_1|} + n \frac{\Delta x_2}{|x_2|} + \frac{\Delta x_3}{|x_3|} \right] * y \quad (2.1)$$

**Ecuación 2-1:** Error de una función.

**Fuente:** Guía práctica para la realización de la medida y el cálculo de errores.

$$f \left( \% \frac{I_{out}}{I_{in}} \right) = \frac{V_{out}}{R_{out} * I_{in}} * 100$$

$$\Delta f = \left[ \frac{\Delta V_{out}}{|V_{out}|} + \frac{\Delta R_{out}}{|R_{out}|} + \frac{\Delta I_{in}}{|I_{in}|} \right] * f \quad (2.2)$$

**Ecuación 2-2:** Error de la producción energética

Donde:  $f(\%I_{out}/I_{in})$  es la función para calcular la relación entre corriente eléctrica proveniente de la celda y la corriente lumínica que ingresa en la celda (%).

$V_{out}$  es el voltaje de la celda (V).

$R_{out}$  es la resistencia entre los compartimentos de la celda ( $\Omega$ ).

$I_{in}$  es la corriente lumínica que ingresa en la celda (A).

## CAPÍTULO III

### 3. MARCO METODOLÓGICO

#### 3.1. Nivel de Investigación

Este trabajo de titulación se encuadra en un nivel de investigación explicativo. El objetivo principal es obtener datos empíricos y observacionales sobre la producción energética de  $\alpha$  y  $\beta$ -carotenoides en *Daucus carota* de corazón rojo, mediante la manipulación de variables específicas, como la irradiación y el transporte de iones. Se llevaron a cabo experimentos en condiciones controladas para recopilar datos cuantitativos y cualitativos que permitan obtener conclusiones científicamente fundamentadas.

#### 3.2. Enfoque de investigación

El enfoque investigativo de la presente investigación es principalmente cuantitativo con el objetivo de recopilar datos específicos y medibles sobre la producción energética de  $\alpha$  y  $\beta$ -carotenoides en *Daucus carota* bajo condiciones controladas de irradiación y transporte de iones a través de membranas permeables.

Se recopilaron datos cualitativos para comprender mejor los cambios observados en la calidad organoléptica de las *Daucus carota* y así entender sobre los procesos químicos involucrados, aunque el enfoque principal sigue siendo cuantitativo debido a la naturaleza de la investigación y la necesidad de obtener resultados numéricos para su análisis estadístico (mismos que se podrán visualizar en el siguiente capítulo) y de este modo realizar la formulación de conclusiones basadas en datos cuantificables.

El enfoque de investigación se centra en el estudio de la dispersión de energía de  $\alpha$  y  $\beta$ -carotenoides en *Daucus carota* mediante irradiación 405 nm en una celda fotosintética, empleando el proceso de transporte de iones a través de membranas permeables. Este enfoque busca comprender en profundidad los cambios químicos que experimentan los carotenoides en las *Daucus carota* bajo condiciones controladas de irradiación y transporte de iones.

### 3.3. Diseño de investigación

El proceso metodológico para este trabajo de titulación fue diseñado para corroborar la transformación de energía de una disolución de carotenoides presentes en *Daucus Carota* irradiándolos en una celda fotosintética con transporte de iones a través de membrana permeable, emulando condiciones celulares de la fotosíntesis, a través de:



### **3.4. Tipo de estudio.**

El presente trabajo de titulación fue de carácter experimental. Este enfoque involucra la adquisición y análisis de datos, así como una revisión exhaustiva de la literatura científica que incluye libros especializados, artículos científicos, tesis, proyectos de investigación entre otros recursos académicos. El objetivo principal de este estudio fue caracterizar la producción energética de los carotenoides en una celda fotosintética expuesta a la radiación de luz UV y sometida al transporte de iones a través de membranas permeables. Para lograr esto, se observaron y analizaron los fenómenos físicos químicos que tienen lugar en dicho sistema.

### **3.5. Población y Planificación, cálculo del tamaño de la muestra**

La población de estudio para el presente trabajo fueron las *Daucus carota* corazón rojo, tomando como cantidad en peso aproximado a 570 g, correspondiente a 6 zanahorias medianas, que son el objeto de investigación obteniendo un total de 326 g de zumo. La elección de este tipo de *Daucus carota* se basa en su relevancia en la industria alimentaria debido a su alto contenido de carotenoides específicos, que son compuestos de importancia nutricional y comercial. La población se compone de las *Daucus carota* de corazón rojo que se sometieron al proceso de irradiación en la celda fotosintética.

Para llevar a cabo el estudio, se requirió calcular el tamaño de la muestra de *Daucus carota* que se someterán a la irradiación y posterior análisis. El cálculo del tamaño de la muestra es fundamental tomar en cuenta que por cada 40 ml de solución salina 10 % (g/ml) se agregará 12 ml de disolución de carotenoides 0.25 % (g/ml) procedentes del zumo obtenido anteriormente para garantizar la representatividad de los resultados y la validez estadística de las conclusiones. Se deben tener en cuenta factores como el nivel de confianza deseado por parte del equipo que es de  $\pm 0.05$ , el margen de error permitido y la variabilidad esperada en la degradación de los carotenoides debido a la irradiación.

Es importante mencionar que el uso de transporte de iones a través de membranas permeables en este estudio indica una metodología específica para llevar a cabo la irradiación controlada de las *Daucus carota*. Este enfoque experimental permite simular condiciones precisas y reproducibles, lo que contribuye a la robustez de los resultados obtenidos.

La planificación de la muestra debe considerar también la diversidad de condiciones experimentales, como diferentes corrientes de irradiación y tiempos de exposición.

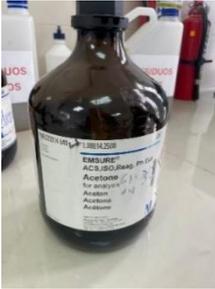
En resumen, la población de estudio en esta investigación está conformada por *Daucus carota* corazón rojo, y el cálculo del tamaño de la muestra es un paso esencial en la planificación del experimento. El uso de transporte de iones a través de membranas permeables en la celda fotosintética garantiza un transporte de electrones, lo que contribuye a la calidad de los resultados y la confiabilidad de las conclusiones.

### **3.6. Materiales**

En el presente trabajo experimental se utilizaron diferentes suministros, los cuales se detallan en la tabla 3-1 sustancias y reactivos, tabla 3-2 los materiales y en la tabla 3-3 los equipos.

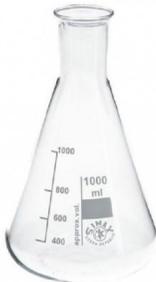
**Tabla 3-1:** Tabla de sustancias y reactivos.

N°	SUSTANCIA	GRAFICA	CANTIDAD
1	Cloruro de sodio		50 g
2	Agua destilada		500 ml
3	Propanol		150 ml

4	Acetona		150 ml
5	PLA para impresión		900 g
6	Extracto de carotenoide		~90 ml
7	Solución salina		500 ml

Realizado por: Castillo, R. 2024.

**Tabla 3-2:** Materiales de laboratorio usados para la preparación de las membranas, carotenoides.

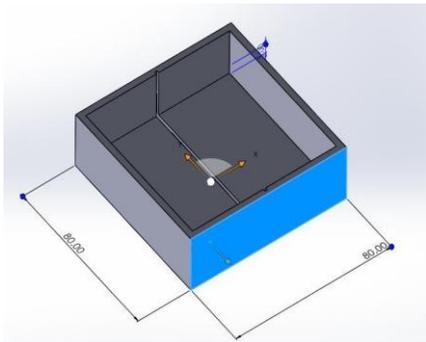
N°	NOMBRE	IMAGEN	CANTIDAD	CARACTERISTICAS
1	Erlenmeyer		1	Facilita la agitación de líquidos sin riesgo de derrames, siendo útil en procesos de mezcla y disolución de sustancias.  Capacidad 1000 ml.
2	Vaso de precipitación		2	Es un recipiente de laboratorio, generalmente de vidrio, de forma cilíndrica con un pico en el borde para facilitar el vertido de su contenido

3	Placas de Petri		1	Es utilizada para observar diferentes tipos de muestras, tanto biológicas como químicas, que se mantienen encerradas en su interior para su estudio.
4	Pipetas		2	Es un instrumento volumétrico de laboratorio que permite medir la alícuota de líquido con bastante precisión en este caso para colocar la solución acuosa.
5	Tubos de ensayo		3	Se trata de un recipiente cilíndrico de vidrio, cerrado por un extremo, se usó para tomar muestras y análisis a pequeña escala.

6	Pinzas metálicas		1	Se usó como fijador para ciertas muestras calientes como en la obtención del concentrado de carotenoides.
5	Portaobjetos		3	Se utilizaron para la generación de los cristales de la membrana.

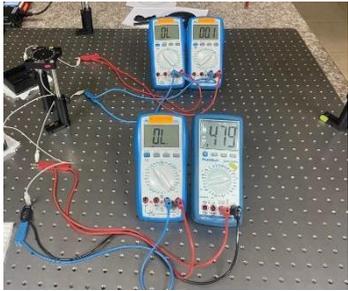
Realizado por: Castillo, R. 2024.

**Tabla 3-3:** Descripción de los equipos usados para la obtención de membranas, carotenoides e irradiación.

N°	Nombre / número de serie del equipo	Gráfico	cantidad	Función
1	Celda Fotosintética		3	Diseñado específicamente para simular las condiciones fotosintéticas y permitir la irradiación controlada de las muestras de <i>Daucus carota</i> corazón rojo. Esta celda deberá tener la capacidad de mantener las condiciones de luz, temperatura y humedad adecuadas para reproducir el entorno de crecimiento de la <i>Daucus carota</i> y permitir la observación de los cambios en los carotenoides.
2	Espectrofotómetro UV-VIS (Thermo Scientific)		1	Se utilizó para cuantificar la concentración de alfa y beta carotenoides en las muestras antes y después de la irradiación. Esto permitirá medir la degradación de los carotenoides y determinar cómo se ven afectados por la exposición a la luz.

3	Espectrofotómetro FT-IR (FT/IR-4100)		1	<p>Extensión de número de onda</p> <p>Escaneo rápido 10 exploraciones por Segundo.</p> <p>Reconocimiento IQ: reconoce automáticamente el accesorio de muestreo</p>
4	Balanza Analítica		1	<p>Se mide exactamente el contenido de las sustancias de esta manera se baja el margen de error al realizar los compuestos y soluciones para el experimento.</p>

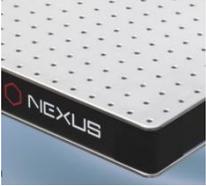
5	Láser monocromático (MDL-LLL405-20mW)		1	Se utilizó un láser de 405 nm de color azul para llevar a cabo la irradiación controlada de las muestras de Daucus carota.
6	Roto vapor		1	También conocido como evaporador rotativo o rotavap en términos coloquiales, es un instrumento de laboratorio utilizado en la destilación a baja presión para separar solventes volátiles de sustancias no volátiles.

7	Autoclave (ESCO)		1	Tienen la función de esterilizar los materiales que debes utilizar en los trabajos de investigación en los y análisis microbiológicos ayudará al experimento a que la sustancias no se contaminen.
8	Multímetros		4	Midieron el nano amperaje de salida al realizar la irradiación a las celdas.

9	Impresora 3D (E16 Anet)		1	Utilizada para la construcción de la celda se hizo con el objetivo de asegurar un rendimiento óptimo en el estudio
10	Digital Handheld Optical Power and Energy Meter Console (PM100D)	 <p style="text-align: center;">0</p>	1	Sirve para mediciones de potencia y energía, con alta presión en espacios libres y fibra ayudará a medir el haz de luz del láser.

11	Detector		1	Este tipo de sensores ayudan con la lectura del haz de luz del láser, sus componentes pueden ser térmicos piro eléctricos.
12	Protected Silver Mirrors (PF20-03-P01)		1	Este tipo de espejos ayudan en la reflectancia del espectro visible e IR en un rango de 450 nm a 20 um.

13	Soporte de espejos de orificio liso (KM200)		1	Sirve de soporte para el espejo cinemático para óptica número Ø2.
14	Non-Polarizing Cube Beam splitters (BS019)		1	Este tipo de prisma ayuda a dividir un haz de luz con longitudes de onda entre 400 nm – 700 nm.

15	Post-Mountable Component Clamp Ø1/2 (KM200B)		1	Se usa para asegurar primas componentes cilíndricas y otros componentes con abrazadera de componentes PMTR.
16	Optical breadboards 60mm (2.4") thick (NEXUS)		1	Este tipo de mesa especial para el trabajo de investigación sirve de base para instrumentos de óptica.
17	Extractor (Black&Decker)		1	Función principal es extraer la mayor concentración de Jugo y pulpa de Daucus carota.

Fuente: thorlabs, 2024

Realizado por: Castillo, R. 2024.

### 3.7. Métodos y técnicas de investigación

#### 3.7.1. Método para la preparación de la solución salina

Para preparar la solución salina al 10% (g/ml) se empleó un matraz aforado donde se colocó 10 g de cloruro de sodio medidos en la balanza (Ilustración 3-1). A continuación, se llenó el matraz (Ilustración 3-2) con el cloruro de sodio parcialmente disuelto en agua destilada hasta alcanzar un volumen total de 100 ml, se agita asegurándose de que el cloruro de sodio se disuelva completamente

Repita este proceso cuatro veces más con matraces adicionales, y guarde las soluciones resultantes (500 ml). Estas soluciones individuales también deben contener 10 g de cloruro de sodio disueltos en un volumen total de 100 ml de agua.



**Ilustración 3-1:** Medición de NaCl

**Realizado por:** Castillo, R. 2024.



**Ilustración 3-2:** Matraz de aforo

**Realizado por:** Castillo, R. 2024.

### 3.7.2. Método para la obtención del zumo de *Daucus carota*.

En el proceso para extraer el Jugo de *Daucus carota* se introduce una cantidad de 570 g *Daucus carota* presentes en 6 zanahorias medianas en el extractor (Ilustración 3-3) de manera secuencial. Se posiciona el contenedor receptor y se espera a que el jugo de *Daucus carota* fluya obteniendo aproximadamente 244 g de residuos (Ilustración 3-4). Se repite este proceso en múltiples ocasiones hasta acumular una cantidad de 326 g (Ilustración 3-5) sustanciales de la materia prima completa.



**Ilustración 3-3:** Extracción de zumo de *Daucus carota*

**Realizado por:** Castillo, R. 2024.



**Ilustración 3-4:** Medición de residuos de *Daucus carota*

**Realizado por:** Castillo Vivanco, Richard, 2024



**Ilustración 3-5:** Medición de extracto de *Daucus carota*

**Realizado por:** Castillo, R. 2024.

### **3.7.3. Método para la elaboración disolución de concentrado de carotenoides**

Para la separación de los componentes hidrofóbicos transfiera los 326 g de zumo de *Daucus carota* previamente filtrado obtenido un total de 250 ml concentrado al rotavapor y configure el equipo de la siguiente manera: presión de vacío de 42 mbar, velocidad de rotación de 50 RPM, temperatura de 40 °C y un refrigerante a 10 °C. Este proceso se mantiene durante un período de dos horas, obteniendo un concentrado lipídico (Ilustración 3-6). Una vez realizado el proceso se obtiene un total de 200 ml de agua extraída y 50 g de concentrado. Prepare una mezcla compuesta por 150 ml de acetona y 150 ml de propanol (Ilustración 3-7). Luego, utilice esta mezcla para extraer la mayor cantidad posible de carotenoides. La confirmación de la extracción se llevará a cabo mediante espectroscopia UV-VIS y FT-IR, para lo cual se reserva 50 ml de dicha mezcla para usar como blanco.

Finalmente, separe los 250 ml concentrados (Ilustración 3-8) resultantes de carotenoides disueltos para su posterior envase y uso.



**Ilustración 3-6:** Obtención de concentrado de *Daucus carota*

**Realizado por:** Castillo, R. 2024.



**Ilustración 3-7:** Composición (1:1) acetona y propanol

**Realizado por:** Castillo, R. 2024.



**Ilustración 3-8:** Obtención de carotenoides

**Realizado por:** Castillo, R. 2024.

#### ***3.7.4. Método para Cálculo de carotenoides netos***

Para conocer el peso neto de carotenoides obtenidos se coloca volúmenes de 20 ml (Ilustración 3-9) y 40 ml de la disolución de carotenoides en vasos de precipitación. Se calientan a baño maría controlando que la temperatura no exceda los 70 °C evaporando la mezcla de solventes (Ilustración 3-10). Resulta en un residuo de concentración lipídica de carotenoides pegada a las paredes del vaso de precipitación dispuestas para pesar (Ilustración 3-11). El proceso se realiza con dos volúmenes distintos para confirmar la coherencia de los resultados y comparando el peso del vaso de precipitación limpio y con el residuo. Resultando en una concentración de 0.25 % (g/ml)



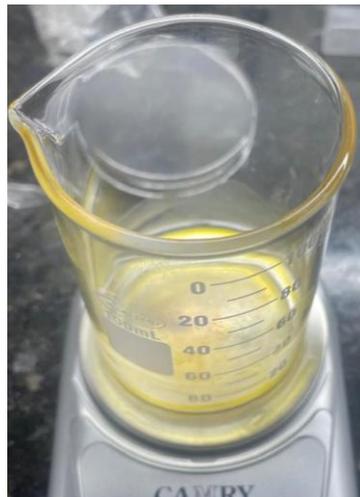
**Ilustración 3-9:** 20 ml Disolución de carotenoides

**Realizado por:** Castillo, R. 2024.



**Ilustración 3-10:** Disolución de carotenoides a baño maría

**Realizado por:** Castillo, R. 2024.

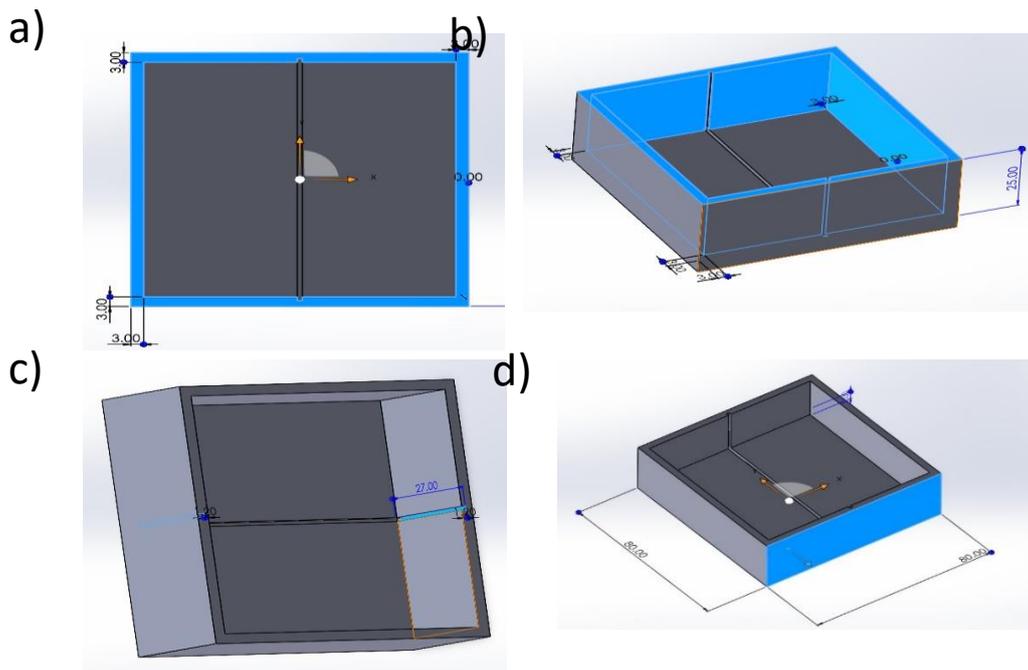


**Ilustración 3-11:** Pesaje de residuos en vaso de precipitación

**Realizado por:** Castillo, R. 2024.

### 3.7.5. Método para elaboración de Celda fotosintética

Para la fabricación se empleó la impresora 3D E160 Anet, cada una de las celdas requirió un aproximado de 43.23 g de ácido poliláctico obteniendo un total de 3 celdas de las cuales solo se usaron 2, garantizando por medio de este tipo de material una toma de datos precisa y sin fugas, según las dimensiones de la Ilustración 3-12.



**Ilustración 3-12:** Celda fotosintética (a y c vistas superiores, b y d vistas laterales)

**Realizado por:** Castillo, R. 2024.

### 3.7.6. Método para la producción de la membrana permeable

Para elaboración de la membrana permeable se llenó una caja Petri de 15 ml solución salina (Ilustración 3-13). Se introduce los 3 porta objetos en el interior de la caja Petri por un periodo de 30 min (Ilustración 3-14). Una vez transcurrido el tiempo se procede al introducir en un vaso de precipitación de 50 ml, para llevarlo al interior del autoclave por 2 horas a 50 °C para la posterior cristalización de la membrana (Ilustración 3-15). Obteniendo por fin la membrana cristalina como se observa en la Ilustración 3-16. Se usa las membranas en donde se note el mayor número de cristales en el portaobjetos para su posterior armado de celda (Ilustración 3-17).



**Ilustración 3-13:** Solución salina

Realizado por: Castillo, R. 2024.



**Ilustración 3-14:** Colocación de portaobjetos

Realizado por: Castillo, R. 2024.



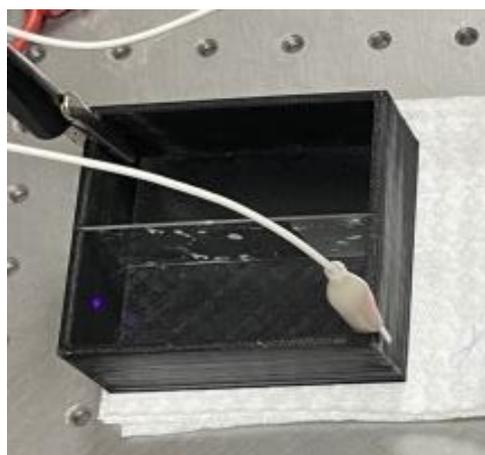
**Ilustración 3-15:** Cristalización de la membrana

Realizado por: Castillo, R. 2024.



**Ilustración 3-16:** Colocación de portaobjetos en la celda.

Realizado por: Castillo, R. 2024.



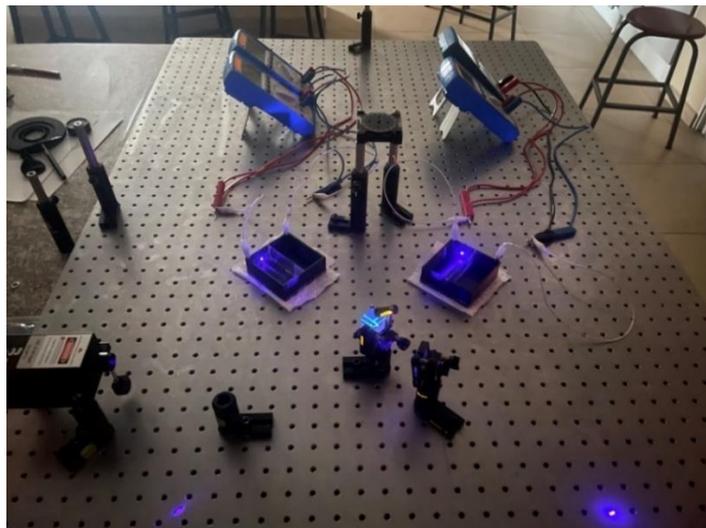
**Ilustración 3-17:** Preparación de celda

Realizado por: Castillo, R. 2024.

### 3.7.7. Irradiación luz láser 405 nm

En el proceso de ensamblaje de la mesa óptica, se utilizaron soportes universales y sujetadores para asegurar de manera precisa el láser, los espejos y los difractores. Esto se hizo con el objetivo de generar dos haces de luz descendientes que incidieran directamente a las dos celdas nombradas alfa y beta en su respectivo compartimento que llevaría la disolución de carotenoides tal como se aprecia en la Ilustración 3-18. Fue necesario el proceso de encerado que consto en irradiar una celda con 40 ml de solución salina en ambos compartimentos como se puede observar en el Anexo A durante 15 iteraciones, de tal forma que el promedio de producción energética de la solución salina se resta de las mediciones que se tomaran en las celdas con carotenoides.

El compartimento irradiado contiene el 12 ml de disolución de carotenoides más 40 ml de solución salina y en el otro compartimento 40 ml de solución salina (Ilustración 3-19). Posteriormente se mide con el intensitómetro (equipo N°10 de la tabla 3-3) la corriente incidente (después de restar las pérdidas por reflexión observadas en la Ilustración 3-20) fue de: en la celda alfa 18.277 nA y en la celda beta 20.287 nA. Se irradia por un lapso de 1.25 horas en oscuridad (Ilustración 3-21) mientras se realizaban mediciones continuas de voltaje y resistencia (15 iteraciones). En otro periodo de 1.25 horas (15 iteraciones) se apagó el láser para ver el comportamiento de la celda sin estímulos del láser (Ilustración 3-22). Estos datos (Anexo B y Anexo C) se tomaron a intervalos de cinco minutos (1 iteración), la finalidad de este proceso es analizar con graficas el comportamiento de los carotenoides transformando energía lumínica en eléctrica en función del tiempo al reaccionar con el haz del láser 405 nm.



**Ilustración 3-18:** Preparación calibración de mesa óptica

**Realizado por:** Castillo, R. 2024.



**Ilustración 3-19:** Preparación de celdas con carotenoides y solución salina.

**Realizado por:** Castillo, R. 2024.



**Ilustración 3-20:** Cálculo de pérdidas

**Realizado por:** Castillo, R. 2024.



**Ilustración 3-21:** Irradiación de celdas

**Realizado por:** Castillo, R. 2024.



**Ilustración 3-22:** Observación del comportamiento de celdas.

Realizado por: Castillo, R. 2024.

### 3.7.8. Estudios espectroscópicos

Espectroscopia UV- VIS del carotenoide mediante el su uso fue bajo la configuración de la tabla 3-1. La grafica se obtiene después de encerar el equipo con 1ml de solvente (acetona-propanol, 1:1) en la celda de cuarzo y realizar una segunda medición con 1 ml de disolución de carotenoides. Se empleó un barrido de 750 nm a 350 nm.

**Tabla 3-4:** Información de configuración de la Espectroscopia UV- VIS

Elemento	Valor
Archivo de libro	sin nombre
Accesorios	Accesorio: Detector estándar
Software	INSIGHT: 2.1.133
microprograma, software inalterable	3.0.0.109
Aplicación	Barrido-Barrido
Formato de datos	Absorbancia
Nivel de suavizado	Ninguno
Orden derivativo	Ninguno
iniciar longitud de onda	750.00 nm
Detener longitud de onda	350.00 nm
Velocidad de barrido	1200.00 nm/min
Intervalo de datos	1.00 nm
Tiempo de integración	0.050 sec
Ancho de banda	1 nm
Corrección de línea base	100 %T

Realizado por: Castillo, R. 2024.

Para los estudios espectroscópicos FT-IR del carotenoide se empleó el Espectrofotómetro FT-IR (FT/IR-4100) en el cual se empleó la configuración detallada en la tabla 3-2. La grafica se obtiene después de encerrar el equipo con una gota de solvente (acetona-propanol, 1:1) en el portamuestras y realizar una segunda medición con la disolución concentrada de carotenoides. Se empleó un barrido de 528.4  $\text{cm}^{-1}$  a 4003.5  $\text{cm}^{-1}$ .

**Tabla 3-5:** Información de configuración de la Espectroscopia FT-IR

<b>ELEMENT</b>	<b>WORTH</b>
Data array type	Linear data array
Horizontal axis	Wavenumber [cm-1]
Vertical axis	%T
Start	528.4 $\text{cm}^{-1}$
End	4003.5 $\text{cm}^{-1}$
Data interval	3.85693 $\text{cm}^{-1}$
Data points	902
<b>[Measurement Information]</b>	
Model Name	FT/IR-4100typeA
Serial Number	B170861016
Accessory	ATR PRO450-S
Accessory S/N	A046461272
Light Source	Standard
Detector	TGS
Accumulation	100
Resolution	16 $\text{cm}^{-1}$
Zero Filling	On
Apodization	Cosine
Gain	Auto (16)
Aperture	Auto (7.1 mm)
Scanning Speed	Auto (2 mm/sec)
Filter	Auto (30000 Hz)

Realizado por: Castillo, R. 2024.

## CAPÍTULO IV

### 4. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

#### 4.1. Estudios espectroscópicos

##### 4.1.1. Espectroscopia UV- VIS del carotenoide

El análisis espectroscópico UV-Vis es una herramienta fundamental para la caracterización de los carotenoides, ya que permite identificar sus bandas de absorción distintivas. En el espectro UV-Vis de los carotenoides, es común observar tres bandas características: una banda central y dos hombros. Este patrón, claramente visible en la ilustración 4-1, es un indicador de la presencia de carotenoides en la solución analizada, conforme a lo señalado en estudios previos de Burgos y Calderón (análisis uv).

La banda I generalmente se encuentra en una longitud de onda más baja dentro del espectro, típicamente alrededor de los 400 nm o un poco menos, y presenta una absorbancia menor en comparación con las bandas II y III. Esta banda indica la presencia de varios tipos de carotenoides, lo cual genera una variedad de estructuras moleculares que disminuyen la intensidad de la absorción. La absorbancia menor sugiere que esta banda está más influenciada por los extremos de la conjugación de dobles enlaces, como se ha reportado en estudios sobre la estructura y propiedades de los carotenoides (Goodwin, 1980)

La banda II, que suele observarse alrededor de los 450 nm, es la que presenta el pico de mayor absorbancia en los carotenoides. Este máximo de absorción se asocia con una extensa conjugación de dobles enlaces (d.e.c.) característica en estos compuestos.

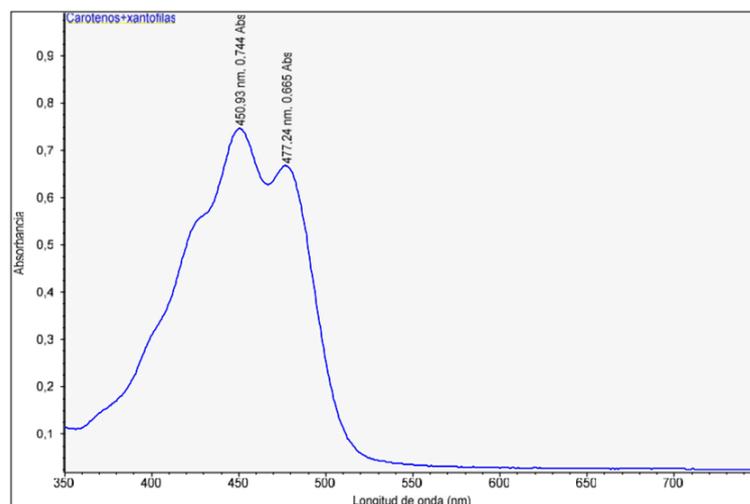
La banda II refleja el cambio de estado electrónico más significativo debido a la conjugación extendida de enlaces. El valor máximo en 450 nm está relacionado con un número efectivo de dobles enlaces conjugados (aproximadamente  $n = 10$ ) que optimiza la absorción en esta longitud de onda. Este fenómeno ha sido ampliamente documentado en investigaciones sobre la espectroscopía de carotenoides, destacando su importancia en la caracterización de la estructura molecular (Britton, 1995)

La banda III, observada cerca de 477 nm, presenta una absorbancia menor que la banda II, pero mayor que la banda I. La posición de esta banda hacia el extremo superior del rango visible indica el final de la cadena conjugada de dobles enlaces en la molécula. Este pico proporciona

información adicional sobre el tamaño de la cadena de conjugación y la geometría molecular del carotenoide, que ha sido descrita en estudios como los de Krinsky y Johnson (2005), quienes exploraron la relación entre longitud de conjugación y absorbancia en carotenoides.

La combinación de estas tres bandas proporciona un perfil característico de los carotenoides, el cual depende de la longitud y tipo de conjugación en la molécula. La absorbancia en el rango azul (400-500 nm) resulta en los colores visibles amarillo y rojo, típicos de los carotenoides. Este comportamiento espectral es fundamental para diferenciarlos de otros pigmentos y permite realizar un análisis detallado de su estructura molecular. Estudios como los de Britton (1995) han destacado este perfil de absorción para la identificación de carotenoides en diversas muestras biológicas y ambientales.

En particular, la banda II, con un máximo de absorción alrededor de 450 nm, exhibe una absorbancia más alta que las bandas I y III. Esta banda corresponde a un sistema conjugado extenso de dobles enlaces (d.e.c.) en la molécula, característico de los carotenoides, lo que sugiere una estructura con un número efectivo de conjugación ( $n$ ) cercano a 10. Esta propiedad permite que la molécula transite entre estados electrónicos, absorbiendo energía en una longitud de onda óptima para este tipo de compuestos



**Ilustración 4-1:** Gráfica espectro de absorción UV- VIS de carotenoides en disolución

Realizado por: Castillo, R. 2024.

#### 4.1.2. Espectroscopia FT-IR del carotenoide

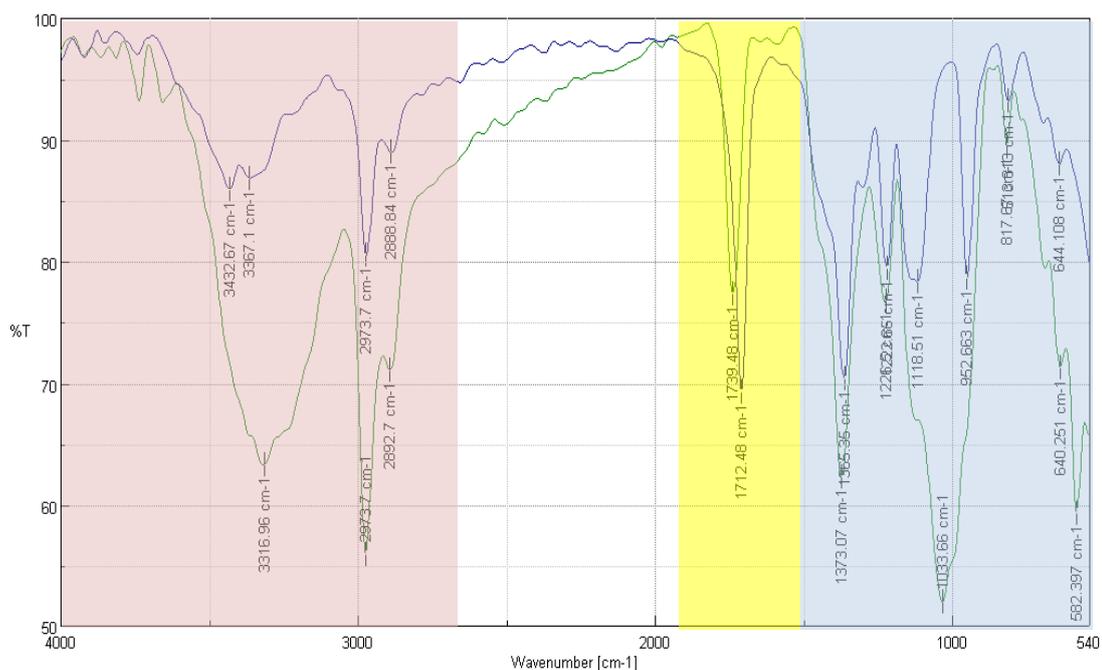
El estudio espectroscópico FT-IR se realizó con el objetivo de identificar los grupos funcionales de la molécula. En la ilustración 4-2 se puede observar un espectro en color azul que representa el blanco y uno en color verde que representa la muestra de carotenoides.

En la zona naranja de la ilustración 4-2 se destacan tres mínimos de la muestra, los grupos OH del blanco en  $3432\text{ cm}^{-1}$  y  $3367\text{ cm}^{-1}$  contrastan con la muestra de carotenoides en  $3316\text{ cm}^{-1}$  confirmando la presencia de xantofilas, mientras que el mínimo del blanco en  $2973\text{ cm}^{-1}$  se intensifica en la muestra de carotenoides junto con el mínimo de  $2892\text{ cm}^{-1}$  debido a la presencia de mayor cantidad de radicales CH en los carotenoides por su larga cadena de carbonos.

En la zona amarilla de la ilustración 4-2 se puede observar que el blanco tiene un mínimo significativo en  $1712\text{ cm}^{-1}$  por la acetona, la muestra corre a  $1739\text{ cm}^{-1}$  y reduce la longitud del mínimo atribuible al menor contenido de acetona.

En la zona azul de la ilustración 4-2 conocida como la región de huella digital el primer mínimo en  $1373\text{ cm}^{-1}$  del espectro de la muestra es más notorio que el mínimo en  $1365\text{ cm}^{-1}$  del blanco, esta diferencia se interpreta como un aumento en la cantidad de grupos  $\text{CH}_3$  ya que mientras en el solvente (blanco) se encuentran 4 de estos grupos en la muestra se encuentran 10 de los grupos  $\text{CH}_3$  y la cadena de carbonos d.e.c. se manifiesta en el mínimo  $1033\text{ cm}^{-1}$ , además de los mínimos de identificación como  $582\text{ cm}^{-1}$ ,  $640\text{ cm}^{-1}$  y  $818\text{ cm}^{-1}$ . Adicionalmente se puede corroborar que las bandas presentes en la muestra de carotenoides (espectro verde) concuerdan con el trabajo realizado por Salehi y Taghian Dinani, 2020.

En la ilustración 4-2 el espectro en color verde presenta una banda a  $3316\text{ cm}^{-1}$  correspondiente al estiramiento OH, las bandas  $2973\text{ cm}^{-1}$  y  $2892\text{ cm}^{-1}$  corresponden al estiramiento asimétrico de grupos metil, una banda a  $1739\text{ cm}^{-1}$  correspondiente al estiramiento aromático  $\text{C}=\text{C}$ , una banda a  $1033\text{ cm}^{-1}$  correspondiente al estiramiento  $\text{C}-\text{OH}$ , una banda a  $818\text{ cm}^{-1}$  correspondiente al grupo  $\text{R}-\text{CH}=\text{CH}-\text{R}$  y una banda a  $640\text{ cm}^{-1}$  correspondiente al estiramiento vibratorio  $\text{CH}=\text{CH}$ .



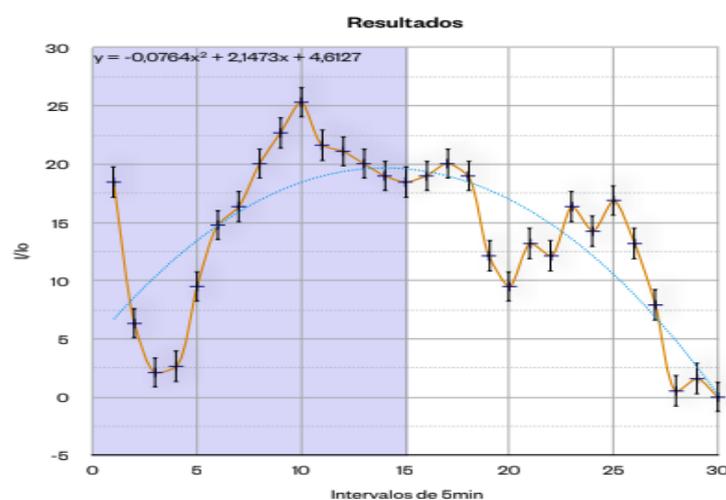
**Ilustración 4-2:** Gráfica espectro de absorción FT-IR carotenoides vs blando (franjas subrayadas)  
**Realizado por:** Castillo, R. 2024.

#### 4.2. Caracterización de la producción energética de los carotenoides

La caracterización de la producción energética de los carotenoides inmersos en un medio salino dentro de una celda fotosintética se llevó a cabo mediante la medición corriente en la celda a intervalos constantes de tiempo, producto de la irradiación (1.25 horas) de luz láser con distinta intensidad para cada celda como también la eliminación del estímulo (1.25 horas) para observar la descarga de la celda, mediciones realizadas durante un tiempo total de 2.5 horas. Por la naturaleza de las operaciones implicadas en el cálculo de los resultados (tablas excel) conviene ocupar la regla del neperiano para calcular el error de los resultados provenientes de las medidas tomadas resultando en un evidente error mayor en los resultados de la celda alfa y menor en la celda beta.

La ilustración 4-3 muestra la celda alfa con una transformación de energía lumínica (18.227 nA) en eléctrica (%) durante las iteraciones en el tiempo (intervalos de 5 min) en presencia de irradiación y en ausencia de la misma con el siguiente comportamiento: durante las primeras 3 iteraciones se observa que en cuanto el láser incide en la celda hay un pico de energía que decrece hasta un mínimo de 2.11 % (0.38 nA) en la iteración #3, de las iteraciones #4-10 existe un aumento de energía hasta llegar al máximo de la gráfica (25 %, 4.62 nA), desde la iteración #11 hasta el apagado de laser en la iteración #15 (18.46 %, 3.37 nA) existe un decrecimiento constante.

En la ausencia de luz láser la iteración #16 y #17 muestra un aumento de energía (20.04 %, 3.65 nA), pese a que esa energía decrece hasta la iteración #20 (9.5 %, 1.73 nA) se observa un crecimiento oscilatorio hasta la iteración #25 (16.88 %, 3.08 nA), seguido de un decrecimiento significativo hasta la iteración #28 (0.53 %, 0.1 nA) un último pico de energía en la iteración #29 (1.58 %, 0.29 nA) y en la iteración #30 se observa que la celda no produce más energía. Esta descripción da un precedente para asumir que la corriente no fue suficiente para pasar más allá de la resonancia en este grupo de carotenos lo que explica el comportamiento de la gráfica, esto quiere decir que el caroteno pasó de conformación cis-trans constantemente con cierta sincronía en la emisión de energía durante los picos descritos.



**Ilustración 4-3:** Resultados variación de corriente en función del tiempo (celda alfa)

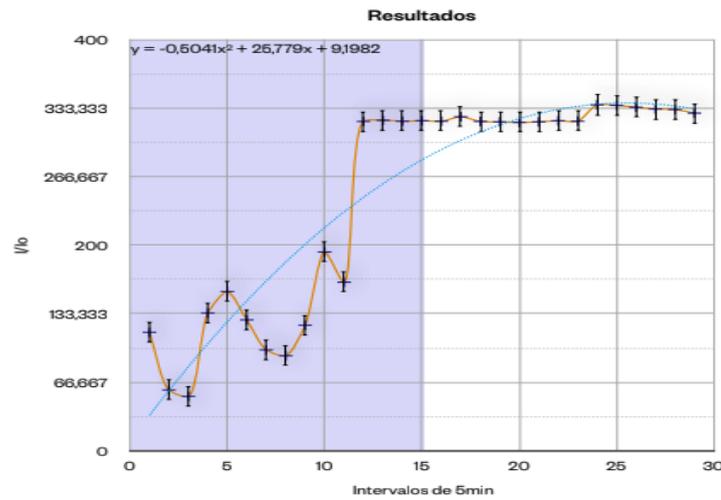
Realizado por: Castillo, R. 2024.

La ilustración 4-4 muestra la celda beta con una transformación de energía lumínica (20.287 nA) en eléctrica (%) durante las iteraciones en el tiempo (intervalos de 5 min) en presencia de irradiación y en ausencia de la misma con el siguiente comportamiento: en esta celda arranca equiparando la energía ingresada en su primera iteración, hasta la iteración #10 se observa una oscilación de energía con mínimos en la iteración #3 (52.92 %, 10.73 nA), #8 (92.49 %, 18.76 nA) y máximos en la iteración #5 (154.9 %, 31.43 nA) y #10 (193.44 %, 39.24 nA), alrededor de la iteración #11 mientras que la iteración anterior denota una leve disminución de energía la iteración posterior muestra un abrupto crecimiento de la misma, las iteraciones #12 - #15 muestran una estabilidad de la producción (~320 %, ~64.9 nA).

En ausencia de luz láser la energía medida es significativamente estable durante las iteraciones #16 - #23 con excepción de un leve pico en la iteración #17 (325.09 %, 65.95 nA), en la iteración

#25 ocurre un leve aumento de energía (336.26 %, 68.31 nA) para empezar a decrecer lentamente junto a la curva de proyección hasta la iteración #29 (328.65 %, 66.67 nA). A partir de la curva de proyección se asume que la energía llegaría a 0 en la iteración número 50 (4.17 horas).

Esta descripción da un precedente para asumir que la corriente fue suficiente para pasar más allá de la resonancia en este grupo de carotenos lo que explica el comportamiento de la gráfica, esto quiere decir que una porción de los carotenos  $\alpha$  y  $\beta$  fueron hidroxilados y transformados en xantofilas en dicha muestra mientras otra porción de carotenos pasó de conformación cis-trans constantemente con bastante sincronía en la emisión de energía durante los picos descritos.



**Ilustración 4-4:** Resultados variación de corriente en función del tiempo (celda beta)

Realizado por: Castillo, R. 2024.

## CAPÍTULO V

### 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

#### 5.1. CONCLUSIONES

La investigación logró caracterizar la producción energética de 30 mg de carotenoides disueltos en 12 ml acetona-propanol (1:1), irradiados con luz de aproximadamente 405 nm en una celda fotosintética de transporte de iones a través de membranas permeables. Los resultados demostraron que la exposición prolongada de las celdas fotosintéticas a la longitud de onda 405 nm, en combinación con el transporte iónico, afecta significativamente la estabilidad y eficiencia de los carotenoides, se concluye que debido a sus propiedades físicoquímico y estructurales estos resonaron al ser irradiados con alrededor de 18 nA produciendo un máximo de 25.32 % de la corriente incidente y se hidroxilaron produciendo mayor porción de xantofilas por la acción del ascorbato cuando fueron irradiados con alrededor de 20 nA resultando en una producción máxima de 336.73 % de la corriente incidente.

Se construyó paneles fotosintéticos que demostraron ser efectivos en el transporte de iones a través de membranas permeables. Estos paneles fueron diseñados para optimizar el transporte iónico y facilitar la interacción entre los carotenoides y los iones. Se deduce que presentan una resistividad significativamente elevada, lo que minimiza las posibles fugas de residuos y los hace óptimos para el transporte de iones a través de la membrana. Los experimentos mostraron que los paneles funcionaron según lo esperado, ya que en la celda beta se hidroxilan los carotenoides esto conlleva a una mayor diferencia iónica como se declara en los resultados.

Se obtuvo una disolución de carotenoides a partir de *Daucus Carota* mediante la disolución del concentrado lipídico de carotenoides en acetona-propanol 1:1. Una forma diluida fue fundamental para las etapas subsiguientes del experimento. Este concentrado diluido mostró una alta estabilidad bajo las condiciones de almacenamiento controladas, lo que asegura su utilidad en aplicaciones fotosintéticas.

La exposición de los paneles fotosintéticos a un haz de luz de aproximadamente 405 nm permitió medir eficazmente la producción energética de los carotenoides en un medio iónico. Los resultados indicaron que la luz de esta longitud de onda induce una resonancia cis-trans como un cambio estructural por hidroxilación, afectando su capacidad para generar energía a través de la transferencia de electrones.

Estos hallazgos son cruciales para entender cómo optimizar las condiciones de irradiación y transporte iónico para aplicaciones prácticas en energía renovable y biotecnología. El experimento incluyó la exposición del panel fotosintético a diversas intensidades de luz con el fin de determinar la producción energética de la concentración, lo que proporcionó información valiosa sobre los cambios en la estructura de los carotenos a lo largo del proceso experimental.

Se destaca la importancia de realizar análisis adicionales para validar los resultados obtenidos, como pruebas de replicabilidad y comparaciones con estudios similares. Esto contribuiría a fortalecer la robustez de las conclusiones y de la base más sólida para futuras investigaciones en este campo.

En el Campo de Investigación de Carotenoides los resultados sugieren que la irradiación puede tener un impacto positivo en la transformación de energía de los carotenoides en *Daucus carota* en celdas que usan transporte de iones a través de membrana permeable.

En la Investigación de Fotosíntesis la respuesta fluctuante en la corriente eléctrica indica una complejidad en el transporte de electrones durante la fotosíntesis bajo condiciones de irradiación. Esto puede ser un área de interés para investigaciones más detalladas sobre los mecanismos fotosintéticos.

En Biotecnología la aplicación práctica de estos resultados podría influir en la ingeniería genética de plantas para mejorar la resistencia a la irradiación de plantas con escasos carotenoides. Esto sería relevante en la mejora de cultivos y la producción de alimentos en condiciones de luz intensa.

## 5.2. RECOMENDACIONES

Se sugiere emplear extractores industriales con el propósito de facilitar la extracción y el uso de un solo solvente, para lograr así una obtención de concentrado lipídico con menos residuos y menos ruido en los estudios.

Se recomienda considerar mejoras futuras en el diseño de la celda fotosintética, evaluando posibles ajustes en parámetros como sustratos, dimensiones u otros factores que puedan optimizar el transporte de iones a través de la membrana.

Se puede mejorar la precisión de los resultados al aislar la concentración lipídica, lo que contribuiría a una mayor claridad en los datos obtenidos. Sin embargo, con este cambio, se perdería la hidroxilación que tiene un gran impacto en el potencial eléctrico a lo largo de la membrana.

Así mismo, se aconseja realizar un estudio más exhaustivo con láseres de 450 nm que puedan mejorar la exposición y, por ende, la absorbancia del concentrado de carotenoide, con el objetivo de obtener datos más precisos y completos en futuras investigaciones.

Se recomienda que futuros en experimentos se aumente el tiempo de exposición y descarga, además, considerar condiciones ambientales (actualmente condiciones de laboratorio) como la temperatura, la humedad a la intemperie y exposición al espectro de luz solar para mejorar la percepción del rendimiento de los paneles fotosintéticos. Estas condiciones podrían influir significativamente en la actividad fotosintética y, por ende, en los resultados obtenidos.

Se sugiere la incorporación de técnicas analíticas avanzadas, como la espectrometría de masas o la cromatografía líquida de alto rendimiento (HPLC), para un análisis más preciso de los compuestos presentes en la concentración lipídica. Esto proporcionaría una mayor resolución en la identificación y cuantificación de los componentes específicos, enriqueciendo la comprensión de la composición lipídica.

## BIBLIOGRAFÍA

**ACACIO Chirino, et al.** Desarrollo de un procedimiento para la extracción de  $\beta$ -caroteno y glicerol a partir de la microalga *Dunaliella* sp. en la salina Las Cumaraguas. [en línea] *Revista Cubana de Química*, XXV (2), 214-228. [Consulta: 2024 17-10-24]. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=443543735009>

**ARATHI, B. & LAKSHMINARAYANA, R.** Concept Notes on Carotenoid Metabolites., [en línea] 01(01). (enero de 2015). [Consulta: 2024 21-10-24] Disponible en: <https://doi.org/10.21767/2573-5365.100002>

**ARÀNDIGA G., & DÍAZ, S.** Estudio del licopeno del tomate como colorante natural desde la perspectiva analítica e industrial. [en línea] (junio de 2024). Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/5544/Resum.pdf?sequence=1&isAllowed=>

**BERGANTIN, C., et al.** N. HPLC-UV/Vis-APCI-MS/MS Determination of Major Carotenoids and Their Bioaccessibility from “Delica” (*Cucurbita maxima*) and “Violina” (*Cucurbita moschata*) Pumpkins as Food Traceability Markers. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, [en línea] 23(11), 2791-2791. (octubre de 2024). Disponible en: <https://doi.org/10.3390/molecules23112791>

**BURGOS, J. & CALDERON, F.** *Universidad de El Salvador Sistema Bibliotecario*. [en línea] (04 de 12 de 2012). [Consulta: 2024 12-09-24] Disponible en: <https://ri.ues.edu.sv/id/eprint/2545>

**BRITTON G.** Structure and properties of carotenoids in relation to function. *FASEB J* 1995; 9: 1551-1558. Disponible en: <https://doi.org/10.1096/fasebj.9.15.8529834>

**BRITTON, G.** Carotenoids in Photosynthesis. Springer Science & Business Media. Carranco Jáuregui, M. E., Calvo Carrillo, M. d., & Pérez-Gil Romo, F. (2011). Carotenoides y su función antioxidante. *SCIELO*, 9. (1995).

**CASTILLO, R.** Panel fotosintético, que utiliza transporte de iones a través de una membrana permeable, irradiando carotenoides. [en línea] *Optica Publishing Group*, 25. (2016, pág.25). [Consulta: 2024 23-08-24]. Disponible en: <https://opg.optica.org/abstract.cfm?URI=OSE-2016-JW4A.10>

**CORTEZ P.M.M.** (2020). *Capítulo 6. Análisis de los espectros de infrarrojo*. Disponible en: <https://ciatej.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1023/743/1/Cap%206%20Análisis%20de%20los%20espectros%20de%20infrarrojo.pdf>

**FARRÉ, G., et al.** (julio de 2010). Travel advice on the road to carotenoids in plants. [en línea] Elsevier BV, 179(1-2), 28-48. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2010.03.009>

**FLORES, J.** *Obtención y caracterización de carotenoides como material fotosensible*. [en línea] México: INAOE. (2005). [Consulta: 2024 23-05-24] Disponible en: <https://inaoe.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1009/1579>

**GOODWIN, T. W.** *The Biochemistry of the Carotenoids*. Springer Netherlands. (1980).

**HERNANDEZ, J.** Metabolismo del oxígeno activado en cloroplastos y mitocondrias de plantas de *pisum sativum* L. En condiciones de salinidad. [en línea] (enero de 2024) Disponible en: <https://www.educacion.gob.es/teseo/createpdf?origen=3&idFicha=34335>

**IGREJA, W S.** Biotechnological Production of Carotenoids Using Low Cost-Substrates Is Influenced by Cultivation Parameters. [en línea] A Review. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 22(16), 8819-8819. (Agosto de 2024). Disponible en: <https://doi.org/10.3390/ijms22168819>

**KRINSKY, N. I., & JOHNSON, E. J.** Carotenoid actions and their relation to health and disease. *American Journal of Clinical Nutrition*, 83(6), 1265S-1271S. (2005).

**MANRIQUE REOL, E.** Los pigmentos fotosintéticos, algo más que la captación de luz para la fotosíntesis. [en línea] *Ecosistemas*, 1, 11. (2003). [Consulta: 2024 06-04-24] Disponible en: <http://www.aeet.org/ecosistemas/031/informe4.html>

**MELÉNDEZ, A., et al.** Pigmentos carotenoides: consideraciones estructurales y fisicoquímicas. [en línea] *Scielo*, 57(2), (junio de 2024). 1. doi: ISSN 0004-0622

**MELÉNDEZ, A., et al.** Relationship between the colour and the chemical structure of carotenoid pigments. *Food Chem* 2007; 101: 1145-1150.

**MÍNGUEZ M.** Clorofilas y carotenoides en Tecnología de los Alimentos. Sevilla, Spain: Secretariado de publicaciones de la Universidad de Sevilla; 1997.

**NAVARRO, A.** *Repositorio de Tesis de Grado Pontificia Universidad Católica del Ecuador*. [en línea] (2015). Disponible en: <http://repositorio.puce.edu.ec/handle/22000/8730>

**LABORATORIO DE FÍSICA.** Universidad Carlos III de Madrid, Guía practica para la realización de la medida y el cálculo de errores, [en línea] 1998. Disponible en: [https://laboratoriofisica.uc3m.es/guiones\\_esp/errores/Incertidumbres.pdf](https://laboratoriofisica.uc3m.es/guiones_esp/errores/Incertidumbres.pdf)

**LÓPEZ, G.** Extracción y caracterización del colorante del fruto almendra de la india (*Terminalia catappa*). [en línea] (abril de 2024). Disponible en: <http://repositorio.uaaan.mx:8080/bitstream/handle/123456789/492/62120s.pdf?sequence=1>

**QUIJANO, J.** Desarrollo de matrices porosas de ácido poliláctico (pla) y polietilenglicol (peg) mediante impresión 3d, aditivadas con quitosano y ácido úsnico para evaluar su liberación controlada. [en línea] (2017). [Consulta: 2024 16-03-24] Disponible en: [https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/10047/QUIJANO\\_JOSE\\_ACIDO\\_POLILACTICO\\_IMPRESION\\_3D\\_QUITOSANO\\_USNICO.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/10047/QUIJANO_JOSE_ACIDO_POLILACTICO_IMPRESION_3D_QUITOSANO_USNICO.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

**RIVERA, S & CANELA, R.** Analytical tools for the analysis of carotenoids in diverse materials. [en línea] Elsevier BV, 1224, 1-10. (febrero de 2024). Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chroma.2011.12.025>

**SALEHI, L., & TAGHIAN, S.** Application of electrohydrodynamic-ultrasonic procedure for extraction of  $\beta$ -carotene from carrot pomace. [en línea] *Journal of Food Measurement & Characterization*, 14(6), 3031–3039. (2024). Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11694-020-00542-w>

**SUPRIYANTO, A., et al.** Carotenoid pigment as sensitizers for applications of dyesensitized solar cell (DSSC). *IOP Conf. Ser.*, 6. (2018).

**TACO, M.** Uso de pigmentos naturales de mortiño (*Vaccinium floribundum*) como sensibilizadores en celdas solares DSSC. [en línea] (diciembre de 2023). Disponible en: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/19011/3/CD-8408.pdf>

**TAIZ, L., & ZEIGER, E.** (2006). *Fisiología Vegetal* (Vol. II). California, Los Ángeles: Universitat Jaume I.

**WEEDON B. & MOSS G.** Structure and nomenclature. En: Britton G, Liaaen-Jensen S, Pfander H, editores. Carotenoids. Volume 1A: Isolation and analysis. Basel, Switzerland: Birkhäuser; 1995. p. 27-70

**WILLEN Igreja, et al.** Biotechnological Production of Carotenoids Using Low Cost-Substrates Is Influenced by Cultivation Parameters [en línea]: A Review. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 22(16), 8819-8819. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/ijms22168819>

**YOUNG, A., et al.** The xanthophyll cycle and carotenoid-mediated dissipation of excess excitation energy in photosynthesis. *Pure & Applied Chemistry* 1997; 69(10): 2125-2130.

**Total 32 referencias bibliográficas**



## ANEXOS

### ANEXO A: CÁLCULO DE PRODUCCIÓN ENERGÉTICA DEL BLANCO IRRADIADO

Iteraciones (t=n*5min)	Voltaje (V)	Resistencia ( $\Omega$ )	Calculo de corriente (nA)	Porcentaje de producción energética (%)
0	0.22	27106000	8.11628	11.12292
1	0.30	39918000	7.51541	10.29946
2	0.12	11683000	10.27133	14.07629
3	0.15	15028000	9.98137	13.67892
4	0.17	17236000	9.86308	13.51681
5	0.18	18215000	9.88197	13.54270
6	0.19	19055000	9.97114	13.66490
7	0.19	20053000	9.47489	12.98482
8	0.20	20121000	9.93986	13.62203
9	0.20	20169000	9.91621	13.58962
10	0.20	20535000	9.73947	13.34741
11	0.20	20642000	9.68898	13.27821
12	0.14	13755000	10.17812	13.94855
13	0.14	14143000	9.89889	13.56588
14	0.15	14989000	10.00734	13.71451
15	0.14	14087000	9.93824	13.61981
<b>Promedios</b>	0.18063	19170938	9.64891	13.22330

**ANEXO B: DATOS DE MEDICIÓN DE LA CELDA ALFA**

Iteraciones (t=n*5min)	Voltaje (V)	Resistencia ( $\Omega$ )	Calculo de corriente (nA)	Porcentaje de producción energética (%)
0	0.035	9000000	3.37466	18.51462±2.6934
1	0.012	9000000	1.15703	6.34789±2.6928
2	0.004	9000000	.38568	2.11598±2.6925
3	0.005	9000000	.48209	2.64492±2.6926
4	0.018	9000000	1.73554	9.52181±2.6929
5	0.028	9000000	2.69973	14.81171±2.6932
6	0.031	9000000	2.98899	16.39869±2.6933
7	0.038	9000000	3.66392	20.10161±2.6935
8	0.043	9000000	4.14601	22.74653±2.6937
9	0.048	9000000	4.62811	25.39151±2.6938
10	0.041	9000000	3.95317	21.68854±2.6936
11	0.040	9000000	3.85676	21.15960±2.6936
12	0.038	9000000	3.66392	20.10161±2.6935
13	0.036	9000000	3.47108	19.04362±2.6935
14	0.035	9000000	3.37466	18.51462±2.6934
15	0.036	9000000	3.47108	19.04362±2.6935
16	0.038	9000000	3.66392	20.10161±2.6935
17	0.036	9000000	3.47108	19.04362±2.6935
18	0.023	9000000	2.21763	12.16673±2.6930
19	0.018	9000000	1.73554	9.52181±2.6929
20	0.025	9000000	2.41047	13.22472±2.6932
21	0.023	9000000	2.21763	12.16673±2.6930
22	0.031	9000000	2.98899	16.39869±2.6933
23	0.027	9000000	2.60331	14.28271±2.6932
24	0.032	9000000	3.08540	16.92763±2.6934
25	0.025	9000000	2.41047	13.22472±2.6932
26	0.015	9000000	1.44628	7.93482±2.6929
27	0.001	9000000	0.09642	0.52900±2.6924
28	0.003	9000000	0.28926	1.58699±2.6925
29	0	9000000	0	0

**ANEXO C: DATOS DE MEDICIÓN DE LA CELDA BETA.**

Iteraciones (t=n*5min)	Voltaje (V)	Resistencia ( $\Omega$ )	Calculo de corriente (nA)	Porcentaje de producción energética (%)
0	0.889	33000000	23.37720	115.23241±0.6991
1	0.691	50000000	11.99258	59.11461±0.4776
2	0.532	43000000	10.73613	52.92123±0.5473
3	0.940	30000000	27.19013	134.02736±0.7644
4	1.014	28000000	31.42567	154.90546±0.8159
5	0.953	32000000	25.84328	127.38838±0.7196
6	0.826	36000000	19.91050	98.14413±0.6447
7	0.8	37000000	18.76259	92.48578±0.6286
8	0.971	34000000	24.78249	122.15946±0.6801
9	1.221	27000000	39.24249	193.43663±0.8449
10	1.074	28000000	33.28518	164.07147±0.8161
11	1.424	19000000	65.03708	320.58501±1.1834
12	1.429	19000000	65.26544	321.71065±1.1834
13	1.425	19000000	65.08275	320.81012±1.1834
14	1.427	19000000	65.17409	321.26036±1.1834
15	1.425	19000000	65.08275	320.81012±1.1834
16	1.444	19000000	65.95052	325.08759±1.1835
17	1.424	19000000	65.03708	320.58501±1.1834
18	1.422	19000000	64.94573	320.13472±1.1834
19	1.420	19000000	64.85439	319.68448±1.1834
20	1.422	19000000	64.94573	320.13472±1.1834
21	1.427	19000000	65.17409	321.26036±1.1834
22	1.425	19000000	65.08275	320.81012±1.1834
23	1.417	18000000	68.31278	336.73180±1.2468
24	1.415	18000000	68.21636	336.25652±1.2468
25	1.407	18000000	67.83069	334.35545±1.2468
26	1.4	18000000	67.49322	332.69197±1.2467
27	1.398	18000000	67.39680	332.21669±1.2467
28	1.383	18000000	66.67366	328.65214±1.2466

**ANEXO D: DATOS COMPARATIVOS EN CELDA ALFA CON CORRIENTE INICIAL Y FINAL ATREVES DEL TIEMPO**

Iteraciones (t=n*5min)	Calculo de corriente (nA)	Porcentaje de producción energética (%)
0	3.37466	18.51462±2.6934
1	1.15703	6.34789±2.6928
2	.38568	2.11598±2.6925
3	.48209	2.64492±2.6926
4	1.73554	9.52181±2.6929
5	2.69973	14.81171±2.6932
6	2.98899	16.39869±2.6933
7	3.66392	20.10161±2.6935
8	4.14601	22.74653±2.6937
9	4.62811	25.39151±2.6938
10	3.95317	21.68854±2.6936
11	3.85676	21.15960±2.6936
12	3.66392	20.10161±2.6935
13	3.47108	19.04362±2.6935
14	3.37466	18.51462±2.6934
15	3.47108	19.04362±2.6935
16	3.66392	20.10161±2.6935
17	3.47108	19.04362±2.6935
18	2.21763	12.16673±2.6930
19	1.73554	9.52181±2.6929
20	2.41047	13.22472±2.6932
21	2.21763	12.16673±2.6930
22	2.98899	16.39869±2.6933
23	2.60331	14.28271±2.6932
24	3.08540	16.92763±2.6934
25	2.41047	13.22472±2.6932
26	1.44628	7.93482±2.6929
27	0.09642	0.52900±2.6924
28	0.28926	1.58699±2.6925
29	0	0

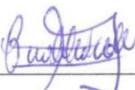
**ANEXO E: DATOS COMPARATIVOS EN CELDA BETA CON CORRIENTE INICIAL Y FINAL ATRAVES DEL TIEMPO**

Iteraciones (t=n*5min)	Calculo de corriente (nA)	Porcentaje de producción energética (%)
0	23.37720	115.23241±0.6991
1	11.99258	59.11461±0.4776
2	10.73613	52.92123±0.5473
3	27.19013	134.02736±0.7644
4	31.42567	154.90546±0.8159
5	25.84328	127.38838±0.7196
6	19.91050	98.14413±0.6447
7	18.76259	92.48578±0.6286
8	24.78249	122.15946±0.6801
9	39.24249	193.43663±0.8449
10	33.28518	164.07147±0.8161
11	65.03708	320.58501±1.1834
12	65.26544	321.71065±1.1834
13	65.08275	320.81012±1.1834
14	65.17409	321.26036±1.1834
15	65.08275	320.81012±1.1834
16	65.95052	325.08759±1.1835
17	65.03708	320.58501±1.1834
18	64.94573	320.13472±1.1834
19	64.85439	319.68448±1.1834
20	64.94573	320.13472±1.1834
21	65.17409	321.26036±1.1834
22	65.08275	320.81012±1.1834
23	68.31278	336.73180±1.2468
24	68.21636	336.25652±1.2468
25	67.83069	334.35545±1.2468
26	67.49322	332.69197±1.2467
27	67.39680	332.21669±1.2467
28	66.67366	328.65214±1.2466



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**CERTIFICADO DE CUMPLIMIENTO DE LA GUÍA PARA**  
**NORMALIZACIÓN DE TRABAJOS DE FIN DE GRADO**

**Fecha de entrega:** 16/ 01 / 2025

<b>INFORMACIÓN DEL AUTOR</b>
<b>Nombres – Apellidos:</b> Richard Andrés Castillo Vivanco
<b>INFORMACIÓN INSTITUCIONAL</b>
<b>Facultad:</b> Ciencias
<b>Carrera:</b> Biofísica
<b>Título a optar:</b> Biofísico
 <b>Biof. Coralía Fabiola Cuadrado Pumalema Msc.</b> <b>Director del Trabajo de Titulación</b>
 <b>Biof. Azucena Nataly Bonilla Garcia Msc.</b> <b>Asesor del Trabajo de Titulación</b>