

UNIVERSIDAD CATÓLICA SEDES SAPIENTIAE

FACULTAD DE INGENIERÍA AGRARIA

CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL



TESIS DE INVESTIGACIÓN

**“EVALUACIÓN DEL DISEÑO DE UN FOTOBIORREACTOR CON
ILUMINACIÓN FOTOVOLTAICA PARA LA OBTENCIÓN DE
BIOMASA *Arthrospira platensis* (Nordstedt) Gomont EMPLEANDO
AGUA RESIDUAL HIDROPÓNICA”**

EJECUTORA:

Bach. KAROL PAOLA SÁNCHEZ AGUIRRE

ASESORA:

Mg. HEIDI ISABEL SÁNCHEZ TORRES

LIMA – 2018

DEDICATORIA

A papá, mi consejero de vida, pese a la infinita distancia física que nos separa, siempre guías y estás presente en cada uno de mis proyectos, éste en uno de los logros que me hubiese gustado compartirlo a tu lado, pero desde donde te encuentres, sé que estás orgulloso de mí.

Te amo pá.

AGRADECIMIENTOS

A mi madre, por trasmitirme fortaleza y valentía frente a todos los desafíos que juntas hemos atravesado durante la ausencia de papá. Gracias mami, por tenerme tanta paciencia, por tu cariño y comprensión infinita. Eres mi TODO.

A mis hermanos, Frank, Katty y Pamela, por siempre estar pendientes del avance de esta tesis y por todo el apoyo incondicional que me han brindado a lo largo de mi carrera.

A Gaby, nuestra nana de toda la vida, por su compañía, sus consejos y sobre todo su deliciosa sazón.

A mi novio, Franco Badajoz, por sus sabios consejos, por estar a mi lado tolerando mi época de estrés durante la ejecución de esta tesis y por siempre motivarme a ser la mejor.

Un agradecimiento especial a mi asesora de tesis, la Mg. Heidi Sánchez Torres, por resolver mis dudas, brindarme su apoyo y mostrarme mucha paciencia. De igual manera, al Blgo. Armando Chiclla Salazar, agradecerle por su apoyo académico y moral en la ejecución de esta tesis. Y a los dos, agradecerles por compartir conmigo sus grandes lecciones de vida, las tengo siempre presente.

Finalmente, agradecer a cada una de las personas que han contribuido a culminar esta tesis como son algunos docentes y amigos.

ÍNDICE GENERAL

CARÁTULA	i
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
ÍNDICE GENERAL	iv
ÍNDICE DE TABLAS	v
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
ÍNDICE DE APÉNDICES	viii
RESUMEN	ix
ABSTRACT	x
INTRODUCCIÓN	xi
CAPÍTULO I: REVISIÓN DE LITERATURA	1
1.1. ANTECEDENTES	1
1.2. BASES TEÓRICAS	6
1.2.1. <i>Arthrospira platensis</i>	6
1.2.2. Fotobiorreactor	14
1.2.3. Energía Solar Fotovoltaica	14
1.2.4. LED	17
1.2.5. Panel solar	18
1.2.6. Zarrouk	20
1.2.7. Importancia de la producción de <i>Arthrospira platensis</i>	22
CAPÍTULO II: MATERIALES Y MÉTODOS	23
2.1. LUGAR Y FECHA	23
2.2. MATERIALES	23
2.2.1. Material biológico	23
2.2.2. Medios de cultivo y reactivos	23
2.2.3. Equipos	24
2.2.4. Otros materiales	24
2.3. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN	25
2.3.1. Descripción del experimento	25
2.3.2. Preparación de los medios de cultivo	29
2.3.3. Diseño del Fotobiorreactor	30
2.3.4. Producción escalar de biomasa de <i>A. platensis</i>	33
2.3.5. Descripción de tratamientos	34
2.3.6. Medición de variables	37
2.4. DISEÑO ESTADÍSTICO DE EXPERIMENTACIÓN	41
2.4.1. Unidad experimental	42
2.4.2. Análisis estadístico de los datos	42
CAPÍTULO III: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	43
3.1. RESULTADOS	43
3.1.1. Caracterización morfológica de la cianobacteria	44
3.1.2. Características geométricas de la cianobacteria	44
3.1.3. Evaluación de los parámetros físico-químicos para el cultivo de <i>A. platensis</i> en diferentes medios de cultivo (zarrouk y agua residual hidropónica)	45
3.1.3.1 Resultados del análisis del pH	45

3.1.3.2 Resultados de la Temperatura	47
3.1.3.3 Resultados de iluminación.....	49
3.1.3.4 Correlación de los parámetros de Temperatura, pH y Luminosidad	49
3.1.4. Conversión de Absorbancias de los cultivos de <i>Arthrospira platensis</i> en peso seco.....	50
3.1.5. Evaluación del crecimiento de <i>Arthrospira platensis</i> bajo condiciones de medio de cultivo estándar Zarrouk.....	51
3.1.6. Resultados del tratamiento Control (fluorescente + medio de cultivo zarrouk)..	53
3.1.6.1 Resultados del tratamiento T1(Panel solar + medio de cultivo zarrouk) ..	55
3.1.6.2. Resultados del tratamiento T2(Panel solar + ARH)	57
3.1.6.3 Resultados del tratamiento T3(fluorescente + ARH)	59
3.1.6.4 Resultados de los análisis de peso seco entre tratamientos y el control....	61
3.1.6.4.1.Crecimiento, capacidad de carga y tiempo de duplicación	65
3.1.7.Resultados de los análisis de costos de producción	72
3.2. DISCUSIÓN	77
CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES	81
CAPÍTULO V: RECOMENDACIONES	83
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	84
TERMINOLOGÍA	89
APÉNDICES	91

ÍNDICE DE TABLAS

Pág.

Tabla 1 Principales características que separan a los géneros <i>Arthrospira</i> y <i>Spirulina</i>	8
Tabla 2 Especies del género <i>Arthrospira</i>	10
Tabla 3 Composición medio de cultivo Zarrouk	21
Tabla 4 Composición química del agua residual hidropónica	30
Tabla 5 Tratamientos experimentales para evaluación del tipo de energía.	34
Tabla 6 Condiciones experimentales para los tratamientos: Control y T3.....	36
Tabla 7 Condiciones experimentales para los tratamientos: T1 y T2.....	36
Tabla 8 Clasificación taxonómica de la especie <i>Arthrospira platensis</i>	44
Tabla 9 Características geométricas de <i>Arthrospira platensis</i>	44
Tabla 10 Valores de pH para los tratamientos (control, T1, T2 y T3), evaluados durante 30 días. 46	
Tabla 11 Valores de temperatura para los tratamientos (control, T1, T2 y T3), evaluados durante 30 días.....	48
Tabla 12 Valores de iluminación iniciales para los tratamientos (control, T1, T2 y T3), evaluados en el experimento.	49
Tabla 13 Valores de correlación de Pearson de los parámetros pH, temperatura y luminosidad. .	50
Tabla 14 Parámetros evaluados durante la fase exponencial la <i>Arthrospira platensis</i> en el medio de cultivo zarrouk.	52
Tabla 15 Valores promedio del peso seco <i>Arthrospira platensis</i> (g) en el tratamiento control, evaluados en 31 días. Los resultados son los promedios de dos réplicas y la desviación estándar ($\pm D.S$).....	53
Tabla 16 Análisis de la prueba t de los valores promedio del peso seco del tratamiento control de <i>Arthrospira platensis</i> (g), evaluados en 31 días.	54
Tabla 17 Valores promedio del peso seco <i>Arthrospira platensis</i> (g) en el tratamiento T1, evaluados en 31 días. Los resultados son los promedios de dos réplicas y la desviación estándar ($\pm D.S$).	55
Tabla 18 Análisis de la prueba t de los valores promedio del peso seco del T1 de <i>Arthrospira platensis</i> (g), evaluados en 31 días.	56
Tabla 19 Valores promedio del peso seco <i>Arthrospira platensis</i> (g) en el T2, evaluados en 31 días. Los resultados son los promedios de dos réplicas y la desviación estándar ($\pm D.S$).	58
Tabla 20 Análisis de la prueba t de los valores promedio del peso seco del tratamiento T2 de <i>Arthrospira platensis</i> (g), evaluados en 31 días.	59

Tabla 21	<i>Valores promedio del peso seco Arthrospira platensis (g) en el tratamiento T3, evaluados en 31 días. Los resultados son los promedios de dos réplicas y la desviación estándar (\pm D.S).</i>	60
Tabla 22	<i>Análisis de la prueba t de los valores promedio del peso seco del tratamiento T3 de Arthrospira platensis (g), evaluados en 31 días.</i>	61
Tabla 23	<i>Análisis de la varianza del peso seco del control y los tratamientos con respecto al tiempo (d) de cultivo.</i>	64
Tabla 24	<i>Prueba de Tukey de la variación del peso seco en los tratamientos y el control.</i>	65
Tabla 25	<i>Parámetro de crecimiento del cultivo de A. platensis de los tratamientos (control, T1, T2 y T3).</i>	66
Tabla 26	<i>Análisis de prueba de normalidad de Shapiro-Wilk a las tasas crecimiento, capacidad de carga y tiempo de duplicación.</i>	67
Tabla 27	<i>Análisis de la homogeneidad de varianza de Levene a la tasa crecimiento, capacidad de carga y tiempo de duplicación.</i>	67
Tabla 28	<i>Análisis de varianza de los parámetros de crecimiento.</i>	69
Tabla 29	<i>Prueba de Tukey para cada tratamiento.</i>	71
Tabla 30	<i>Costos de producción por litro de Arthrospira platensis.</i>	73
Tabla 31	<i>Costo de producción de proteína de Arthrospira platensis por cada nuevo sol para los tratamiento.</i>	75

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Tipos de filamentos de <i>Spirulina</i> sp.	11
Figura 2. <i>Arthrospira platensis</i> . 2400 X tricoma helicoidal visible, en una muestra de agua de mar	11
Figura 3. Ciclo de vida <i>Arthrospira platensis</i>	13
Figura 4. Clasificación de los sistemas fotovoltaicos.....	15
Figura 5. Componentes esenciales del sistema fotovoltaico.....	17
Figura 6. Esquema para utilización de paneles solares.....	19
Figura 7. Diagrama de flujo de la producción de <i>Arthrospira platensis</i> en condiciones de energía solar.....	28
Figura 8. Diagrama de flujo de la producción de <i>Arthrospira platensis</i> en condiciones de energía eléctrica.....	28
Figura 9. Diseño de los fotobiorreactores acoplados al sistema fotovoltaico.....	32
Figura 10. <i>Arthrospira platensis</i> (10X). Microfotografías A y B se observan células con una sucesión de tricomas helicoidales de forma cilíndrica.....	43
Figura 11. Curva de calibración de peso seco de la biomasa de <i>Arthrospira platensis</i>	51
Figura 12. Curvas de crecimiento de <i>Arthrospira platensis</i> para el tratamiento control durante 28 días.....	47
Figura 13. Curva de valores de biomasa expresada en peso seco (g).....	63

ÍNDICE DE APÉNDICES

	Pág.
APÉNDICE 1: VALORES PROMEDIO DE PESO SECO DE <i>A. platensis</i> PARA EL MEJOR TRATAMIENTO T2.....	91
APÉNDICE 2: VALORES PROMEDIO DE PESO SECO DE <i>A. platensis</i> PARA EL MEJOR TRATAMIENTO T2 PARA ELABORAR CURVA PATRÓN.....	92
APÉNDICE 3: VALORES PROMEDIO DE PESO SECO DE <i>A. platensis</i> EN LOS DIFERENTES TRATAMIENTOS.....	92
APÉNDICE 4: VALORES DE LOS PARÁMETROS DE CRECIMIENTO DE <i>A. platensis</i> EN LOS DIFERENTES TRATAMIENTOS.....	93
APÉNDICE 5: VALORES DE CONCENTRACIÓN DE CLOROFILA “a” de <i>A. platensis</i> EN 28 DÍAS.....	94
APÉNDICE 6: REGISTRO DE LOS VALORES DE pH DE LOS TRATAMIENTOS Y SUS RÉPLICAS.....	95
APÉNDICE 7: REGISTRO DE TEMPERATURA EN MAYO.....	98
APÉNDICE 8: PRUEBA DE TUKEY DE LOS PARÁMETROS DE CRECIMIENTO DE <i>A. platensis</i>	99
APÉNDICE 9: INFORME DE ANÁLISIS EN LABORATORIO.....	100
APÉNDICE 10: REGISTRO FOTOGRÁFICO DE LA INVESTIGACIÓN.....	101

RESUMEN

En la presente investigación se evaluó el diseño de un fotobiorreactor (FBR) con iluminación fotovoltaica para la obtención de biomasa de la cianobacteria *Arthrospira platensis*, empleando agua residual hidropónica. La investigación se llevó a cabo por un periodo de 60 días, desde abril a mayo del año 2017, en el laboratorio de Microbiología y Biotecnología de la Universidad Católica Sedes Sapientiae.

La investigación consistió en la instalación de tres tratamientos con dos réplicas y su control respectivo. El tratamiento T1 consistió en un FBR iluminado con panel solar y medio de cultivo zarrouk; el tratamiento T2, en un FBR iluminado con panel solar y medio de cultivo agua residual hidropónica; el tratamiento T3, FBR iluminado con fluorescente y medio de cultivo de agua residual hidropónica y finalmente el tratamiento control, en un FBR iluminado con fluorescente y medio de cultivo zarrouk. Se inocularon 150 ml de la cepa *Arthrospira platensis* UTEX 1926 en todos los FBRs. Se estudió la tasa de crecimiento (μ) de la cianobacteria, la producción de biomasa, el tiempo de duplicación (t_d) y la capacidad de carga (k). Se evaluó los parámetros físico-químicos como: pH, temperatura, porcentaje de proteína y crecimiento poblacional del cultivo de *A. platensis*.

La cianobacteria *Arthrospira platensis* tuvo una alta producción de biomasa ($1,353 \pm 0,004$ mg.L⁻¹) ($p < 0,001$) y porcentaje de proteína (33,75 por ciento) en el tratamiento T2, un FBR iluminado con panel solar y medio de cultivo agua residual hidropónica. La tasa de crecimiento máxima encontrada con una alta significancia ($p = 0,000$) fue de $\mu = 0,3744 \pm 0,005$ días⁻¹ y capacidad de carga $k = 1,353 \pm 0,004$ mg.L⁻¹ y fueron obtenidos para el tratamiento T2. Además se logró una producción de 530,2 mg de proteína por cada S/. 1,11 invertido, siendo el tratamiento T2 el que alcanzó tener un costo de producción menor. Con respecto a los parámetros físico-químicos evaluados, la temperatura con respecto al pH presentó una alta correlación respecto al pH ($r = 0,915$; $P = 0,000$). Se concluye que *Arthrospira platensis* tuvo una alta producción de biomasa empleando el fotobiorreactor con iluminación fotovoltaica y usando como medio de cultivo el agua residual hidropónica.

Palabras clave: Cianobacteria, *Arthrospira platensis*, fotobiorreactor, agua residual hidropónica, zarrouk.

ABSTRACT

The present investigation evaluated the design of a photobioreactor (FBR) with photovoltaic lighting for obtaining biomass of the cyanobacterial *Arthrospira platensis*, using hydroponic wastewater. The investigation was carried out for a period of 60 days, during the months of april to may of the year 2017, in the Laboratory of Microbiology and Biotechnology of the Universidad Católica Sedes Sapientiae.

The investigation consisted in the installation of three treatments with two replicas and their respective control. The T1 treatment consisted of a FBR illuminated with a solar panel and zarrouk culture media; T2 treatment, in a FBR illuminated with solar panel and hydroponic wastewater culture medium; treatment T3, FBR illuminated with fluorescent and culture medium of hydroponic wastewater and finally the control treatment, in a FBR illuminated with fluorescent and culture medium zarrouk. 150 ml of the *Arthrospira platensis* strain UTEX 1926 were inoculated in all the FBRs. The growth rate (μ) of the cyanobacterial, the biomass production, the doubling time (t_d) and the loading capacity (k) were studied. The physical-chemical parameters were evaluated as: pH, temperature, percentage of protein and population growth of *A. platensis* culture.

The cyanobacterial *Arthrospira platensis* had a high production of biomass ($1,353 \pm 0,004$ mg.L⁻¹) ($p < 0,001$) and percentage of protein (33,75 C) when it was illuminated in the T2 treatment, in a FBR illuminated with solar panel and culture media of cultivation hydroponic wastewater. The maximum growth rate found with a high significance ($p = 0,000$) was $\mu = 0,3744 \pm 0,005$ days⁻¹ and loading capacity $k = 1,353 \pm 0,004$ mg.L⁻¹ and were obtained for the T2 treatment.

Production of 530,2 mg of protein per S /.1,11 inverted, it was achieved with the T2 treatment that reached a lower production cost. With respect to the physical-chemical parameters evaluated, the temperature with respect to pH presented a high correlation with respect to pH ($r = 0,915$; $P = 0,000$). It was concluded that *Arthrospira platensis* had a high production of biomass using the photobioreactor with photovoltaic lighting and using hydroponic wastewater as a culture medium.

Key words: cyanobacterial, *Arthrospira platensis*, photobioreactor, hydroponic wastewater, zarrouk.

INTRODUCCIÓN

Las microalgas son organismos fotosintetizadores que convierten gases como el CO₂ en biomasa gracias a la acción metabólica de sus sistemas enzimáticos y la luz solar produciendo oxígeno como producto de dicho proceso.

Las cianobacterias son un grupo de microalgas procariotas que han sido estudiadas ampliamente; siendo la *Arthrospira platensis* el organismo más representativo empleado a nivel doméstico e industrial, debido a sus metabolitos primarios como las proteínas. Además, cabe resaltar que esta especie puede adaptarse a diferentes condiciones de cultivo debido a su plasticidad metabólica, esto no solo favorece la adaptación de la microalga a los sistemas de cultivo, si no que puede ser explotada para incrementar el contenido de proteínas y así aumentar la productividad del sistema.

Los sistemas de producción para microalgas con potencial industrial como *A. platensis* son realizados mediante dos sistemas, indoor “abierto” y outdoor “cerrado”. Las ventajas del uso de sistemas cerrados es el control total de los parámetros de crecimiento del organismo y evitar la contaminación de partículas, otros organismos, entre otros; mientras que en sistemas abiertos el control de estos parámetros no es tan eficiente. Aunque se han propuesto muchos tipos de fotobiorreactores, no existe un reactor ideal, solo unos pocos pueden utilizarse para la producción de biomasa de cianobacterias. De hecho, la elección del fotobiorreactor depende de muchos factores, como la especie a cultivar, el metabolito que se desea producir y el diseño del equipo, que permita el ingreso eficiente de iluminación, un óptimo intercambio de gases y una correcta homogenización del cultivo.

En la presente investigación se plantea el diseño y ensayo de un sistema de producción de biomasa algal mediante el uso de un fotobiorreactor que presente ventajas como: amigable con el ambiente, facilidad para cosechar la biomasa, mantenimiento del cultivo sin contaminación, mejor control de las condiciones de cultivo, diseño ecológico, por el empleo de energía solar que genera reducción de costos en la producción de biomasa y menor inversión de capital en el fotobiorreactor. Este último factor es un elemento importante en el costo de producción de productos derivados de microalgas

OBJETIVOS

Objetivo General

-Evaluar el diseño de un fotobiorreactor con iluminación fotovoltaica para la obtención de biomasa *Arthrospira platensis*, empleando agua residual hidropónica.

Objetivos Específicos

-Implementar condiciones de iluminación, mediante un sistema fotovoltaico tipo Led (Diodo Emisor de Luz), empleando como soporte las mangas de polietileno en el interior del fotobiorreactor.

-Emplear un medio de cultivo de bajo costo a partir de agua residual hidropónica, proveniente del Centro de Investigación Biológica, para la obtención de biomasa de *Arthrospira platensis*.

-Evaluar los parámetros de la cinética de crecimiento algal en el fotobiorreactor (tasa de crecimiento, tiempo de crecimiento y capacidad de carga) iluminado con luz led del sistema fotovoltaico y con el medio de cultivo basado en agua residual hidropónica.

-Comparar los parámetros de producción cinéticas obtenidas con valores reportados en la literatura para otros fotobiorreactores a bajo costo.

CAPÍTULO I: REVISIÓN DE LITERATURA

1.1. ANTECEDENTES

Huarachi et al. (2015) en una investigación desarrollada en Perú, evaluaron la productividad de *Arthrospira platensis*, empleando un fotobiorreactor bajo condiciones ambientales. Ellos propusieron el diseño y desarrollo de un fotobiorreactor aprovechando la luz solar como fuente energética; logrando disminuir costos y aumentando la máxima producción de algas. El diseño del sistema propuesto se constituyó por tres partes: Un fotobiorreactor curvado de 4,0 m, construido con policloruro de vinilo (PVC), un desgasificador de 4,0 L y una bomba de aire. Las variables analizadas fueron: tasa de crecimiento de *Arthrospira platensis*, cuantificación de la biomasa y cantidad de energía irradiada. Los resultados mostraron que la radiación solar incidente sobre el cultivo afecta la morfología y la productividad de la cianobacteria *Arthrospira platensis*, cambiándola de una forma espiralada típica, a una forma recta por exposición directa a la radiación UV de los rayos solares a una irradiancia de $774,0 \text{ W.m}^{-2}$. En esta investigación se obtuvo una concentración de biomasa de $1,5 \text{ g.L}^{-1}$, mientras que la productividad fue de $0,298 \text{ g.m}^{-2}.\text{día}^{-1}$, con una irradiancia de $11,700 \text{ lx}$ en el interior de fotobiorreactor. Se concluyó que la cantidad de radiación solar empleada en este sistema de cultivo de fotobiorreactor al aire libre, no fue óptima debido a que la productividad de biomasa y el contenido de clorofila obtenidos fueron bajos.

Fernandes, Mota, Texeira y Vicente (2015) realizaron una revisión completa sobre los últimos avances del cultivo de microalgas en Portugal, en cuanto a las mejoras tecnológicas y los procesos en sistemas de cultivo continuo de microalga y cianobacterias, con el objetivo de simular modelos matemáticos que permitan determinar la viabilidad económica y la aplicabilidad del cultivo continuo a gran escala. Los autores mostraron que el crecimiento de la biomasa del alga en un fotobiorreactor es un proceso complejo, condicionado por varios parámetros, tales como: actividad fotosintética, cantidad de luz, absorción de nutrientes y la hidrodinámica del sistema. Los resultados de esta investigación mostraron que es importante reducir los costos operacionales referidos al empleo de fotobiorreactores eficientes y formulaciones de medios de nutricionales que permitan altas tasas de crecimiento para cianobacterias. Se concluyó que el cultivo continuo en fotobiorreactores resulta ser factible para la producción de la biomasa de cianobacterias.

Huarachi, Dueñas, Soto y González (2013) evaluaron la producción de la cianobacteria *Spirulina (Arthrospira platensis)*, a través de un fotobiorreactor tubular cónico, que presentó un área basal de 0,221 m y un cono de 0,56 m de alto por 0,60 m diámetro superior. Los ensayos se realizaron bajo condiciones de laboratorio. El experimento consistió en evaluar el crecimiento de *Arthrospira platensis* mediante la determinación cuantitativa de la clorofila “a” por espectrofotometría. Además, se determinó la morfología y se estableció la taxonomía correspondiente a la especie algal, para lo cual se realizaron observaciones ultramicroscópicas de los filamentos de *Spirulina Arthrospira platensis*. Los resultados obtenidos en esta investigación mostraron una tasa de producción de biomasa seca de 3,362 g.m⁻² y una concentración de clorofila “a” de 0,056 mg.L⁻¹, con una iluminación de 5617,23 lx. El crecimiento de *A. platensis* en el fotobiorreactor tubular cónico fue evaluado durante 22 días, encontrándose que en el día 11 se presentó el punto más alto de crecimiento. Con los datos obtenidos en esta investigación, se modeló la curva de crecimiento para *A. platensis*, la cual se ajustó al modelo matemático de crecimiento “S”. Se concluyó que la cianobacteria *Arthrospira platensis* es una excelente candidata para cultivo al aire libre, siendo

termófila, porque su desarrollo sigue óptimo a temperaturas mayores de 31°C y alcalófila ya que alcanzó un pH de alrededor de 10.

Seijas (2012) realizó un estudio en Perú, que tuvo como objetivo la reducción de las emisiones de CO₂ provenientes de gases de combustión. Se acopló, un sistema de combustión estacionario que tuvo por finalidad suministrar un flujo de CO₂ al sistema de producción de biomasa de la microalga *Arthrospira jenneri* Stizenberger ex Gomont, en un fotobiorreactor. El sistema estacionario se conformó por una caldera acuotubular de 1,0 BHP (Caballo Fuerza de Caldera). Se evaluó el secuestro de CO₂ y el tiempo óptimo de producción de la biomasa microalgal; además, se analizó el flujo de gases de combustión hacia el fotobiorreactor. Posteriormente, se realizó el escalamiento de la biomasa algal, la cual fue evaluada con la ayuda de un algoritmo y empleo del software MATLAB. Los resultados, muestran que la combustión en la caldera tuvo una mayor eficiencia de combustión, empleando un rango entre 5,0 y 7,0 por ciento como exceso de aire con un contenido promedio de 11,63 por ciento de CO₂ en los gases de combustión.

Mezzomo et al. (2010) en Brasil, emplearon la microalga *Arthrospira platensis* como posible solución ambiental, para el tratamiento de aguas residuales domésticas, para lo cual realizaron un CCD (diseño central compuesto) que se utilizó para estudiar la influencia del bicarbonato de sodio en la tasa de crecimiento del alga. Además, los autores evaluaron la capacidad del alga de remover las sustancias contaminantes presentes en el agua residual doméstica. Los resultados para el cultivo de la microalga *Arthrospira platensis*, mostraron una concentración máxima celular (204,6 cells.ml⁻¹), la tasa máxima de crecimiento específico (0,4 d⁻¹) y la máxima eliminación de fósforo (41,6 por ciento). Se concluyó que el cultivo de *Arthrospira platensis*, realizado dentro del agua residual doméstica, tuvo una elevada de producción de biomasa, por lo tanto los autores concluyeron, que esta microalga es una alternativa para ayudar en el tratamiento de aguas residuales, permitiendo reducir el impacto ambiental en Brasil. Además, la biomasa microalgal

obtenida, tiene un uso comercial en la alimentación animal, en la producción de pigmentos, vitaminas, polisacáridos y otros.

Ravelonandro, Dominique, Ratianarivo y Raherimandimby (2008) propusieron el uso de un sistema de columna de burbujas, capaz de cultivar *Arthrospira platensis* en Toliara (Madagascar), con la finalidad de obtener una concentración de biomasa elevada y emplearlo con fines comerciales para erradicar problemas nutricionales, debido al elevado contenido en proteínas que contiene esta microalga. El diseño del fotobiorreactor consistió en mantenerlo iluminado de forma continua con fluorescentes blancos verticales, en una dirección paralela al reactor se colocaron luces de diferentes colores (blanco, verde, rojo y azul). Las variables evaluadas fueron: Influencia del color y la intensidad de la luz en el contenido de *Arthrospira platensis*. Se obtuvo como resultado que la cinética de crecimiento fueron de cuatro colores (verde, blanco, rojo y azul) y cuatro intensidades (400, 800, 1000 y 1200 lux). Se examinó la influencia del color de la luz sobre el crecimiento de la *Arthrospira platensis*. La Luz verde fue el más alto en productividad ($183,6 \text{ mg.L}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$) y concentración ($2,643 \text{ mg.L}^{-1}$), la intensidad de 1200 lux y el contenido en proteína fue del 58 por ciento. Los autores concluyeron que el uso de luz verde permite mejorar el crecimiento de *Arthrospira platensis*.

Muliterno, Vieira, Hemkemeier, Bertolin y Colla (2005) investigaron el uso de nutrientes de bajo costo para el cultivo de *Spirulina platensis*, en base al crecimiento mixotrófico, para ello realizaron pruebas en medio Zarrouk, suplementado con glucosa ($0,5 \text{ g.L}^{-1}$ y $1,0 \text{ g.L}^{-1}$), como fuente de carbono y también investigaron los efectos de dilución (50 y 75 por ciento con agua) e iluminación (1800 Lux y 3000 Lux). Para ello, emplearon un Planeamiento Factorial Completo (PFC), cuyas variables están representadas por: Iluminancia (Lux), dilución del medio Zarrouk y Glucosa. Se obtuvo como resultado que la máxima concentración celular fue de $5,38 \text{ g.L}^{-1}$ y la velocidad máxima de crecimiento específico fue de $0,0063 \text{ h}^{-1}$ cuando se empleó una concentración de glucosa de ($0,5 \text{ g.L}^{-1}$, 75 por

ciento de dilución), y 3000 Lux de iluminancia. Los autores concluyeron que las concentraciones celulares de *Spirulina platensis* se elevaron debido al uso de glucosa, demostrando así la alta capacidad metabólica del alga.

Cañizares, Contreras, Peña y Flores (2003), realizaron una revisión literaria sobre la evolución tecnológica del diseño de fotobiorreactores, que fueron empleados en los últimos 15 años, señalaron que existe un entendimiento limitado sobre, el aprovechamiento de la energía solar durante el proceso fotosintético, debido al uso inadecuado de organismos autótrofos y el desconocimiento de las condiciones ambientales a la que éstos debían estar expuestos y los parámetros que debían de evaluar en el proceso de producción. Los autores mencionan, que antiguamente no se brindaba la importancia necesaria, a la energía solar, como fuente principal para la producción de biomasa microalgal en fotobiorreactores cerrados. Por otro lado, mencionan algunas recomendaciones, para optimizar la producción de microalgas y cianobacterias en fotobiorreactores solares, como: La trayectoria de la luz pequeñas (2,5 cm); mantener alta densidad celular ($> 8-15 \text{ g.L}^{-1}$); usar tramos cortos de tubería (20-30 m) para evitar la inhibición del crecimiento por acumulación de O_2 ; evitar la acumulación de sustancias inhibitoras de crecimiento; mantener la temperatura y pH en condiciones óptimas, uso de paletas rotatorias para generar circulación del medio de cultivo. Concluyeron, que existe una limitante para lograr los estimados teóricos revisados en la literatura, debido a que el sistema de los fotobiorreactores fueron diseñados tipo carrusel, que inicialmente fue el mejor sistema para desarrollar cultivos en masa por su facilidad de construcción y operación, pero paradójicamente resultó inapropiado como punto de partida para el desarrollo de sistemas de cultivo de alta productividad.

Morist, Montesinos y Cusido (2001) cultivaron *Arthrospira platensis* dentro de un fotobiorreactor continuo, con el fin de emplear la biomasa, como fuente nutricional. Para ello aplicaron una tecnología conocida como “sistema de filtrado”, es decir, coagulación, floculación y filtración de la biomasa obtenida. El inóculo se cultivó

en matraces de 500 ml que contienen 250 ml del medio de cultivo zarrouk y que se mantuvieron iluminadas constantemente por (50 W.m^{-2}), por un periodo de 3 semanas. Las variables analizadas fueron: Condiciones de cultivo y el porcentaje nutricional y la intensidad de luz. Los resultados mostraron que, el contenido de ácidos grasos aumentó con la temperatura de cultivo del alga. El porcentaje nutricional del alga fue 20 por ciento mayor de los ácidos grasos palmíticos y linoleico y finalmente la intensidad de la luz durante la fase estacionaria, redujo el contenido nutricional del alga en 1 por ciento. Los autores concluyeron que el alga, es un buen ejemplo de microorganismo fotosintético comestible, por el elevado contenido químico y nutricional.

1.2. BASES TEÓRICAS

1.2.1. *Arthrospira platensis*

Spirulina antes de los años 50, incluía dos géneros distintos, *Spirulina* y *Arthrospira*. En la actualidad *Spirulina* y *Arthrospira* generan confusión, debido a los errores que surgieron cuando se llevó a cabo las nominaciones científicas en el año 1950. Sin embargo, desde el año 1989 se reconoció oficialmente la división entre estos géneros que son mencionados en el Manual de Bacteriología Sistemática de Bergey. Las principales características que separan el género *Spirulina* del género *Arthrospira* son: Las dimensiones de la hélice que poseen los tricomas, la carencia de septos celulares observables al microscopio y los poros de la pared celular. Igualmente, las especies del género *Spirulina* son de menor tamaño que las del género *Arthrospira* (Tomaselli, 1997; Vonshak & Tomaselli, 2000; Sánchez, Bernal, Rozo, C. y Rodríguez, 2003; Antenna, 2005).

Arthrospira maxima (Setchell & N.L.Gardner) y *Arthrospira platensis* son dos especies empleadas en el ámbito comercial como un suplemento dietético

debido a su elevado valor nutricional en el mercado. Hasta el año 1989 estas especies pertenecieron al género *Spirulina* y por ende, sus nombres científicos eran respectivamente *Spirulina maxima* y *Spirulina platensis*, y ambas eran conocidas bajo la denominación de «spirulina». Al reconocerse la separación del género *Spirulina*, dichas especies llegaron a ser clasificadas nuevamente, dentro del género *Arthrospira*, por ende los nombres científicos fueron modificados la denominación actual de *Arthrospira maxima* y *Arthrospira platensis*. Sin embargo, el término “Espirulina” es la denominación comercial de algunas bacterias de índole alimentario con importancia económica, ya que son cultivadas y comercializadas para elaborar una gran cantidad de productos con valor nutricional, importante para la salud. También, El género *Arthrospira* engloba un conjunto de cianobacterias de tipo alimentario que son comercializadas bajo la denominación de “Espirulina” (Castenholz & Waterbury, 1989).

1.2.1.1. Características

En la Tabla 1 se pueden apreciar las diferencias morfológicas entre los diferentes géneros hallados durante las observaciones realizadas al microscópico electrónico de barrido, en casi todos los casos las cápsulas pudieron observarse con mayor nitidez que los comprimidos, ya que éstos contienen excipientes que enmascararon, en algunas ocasiones, la morfología de los organismos.

Tabla 1

Principales características que separan a los géneros Arthrospira (Stizenberger, 1852) y Spirulina (Turpin, 1829)

Carácter	<i>Arthrospira</i>	<i>Spirulina</i>
Diámetro del tricoma	2,5-16 µm	0,5-5 µm
Tipo de hélice	hélice abierta	Hélice cerrada
Septos	Visible al microscopio de luz	Invisible al microscopio de luz
Patrón de los poros de la pared celular	Una fila alrededor del tricoma	Varias filas en la parte cóncava de la hélice
Tipo de fragmentación	Intracelular	Intercelular
Cuerpos cilíndricos	Presentes	Ausentes
Fotosíntesis anoxigénica	Ausentes	Presente en algunas cepas
C- ficoeritrina	no encontrada	Presente en algunas cepas
Ácido γ-Linoleico(GLA)	Presente	Ausente

Fuente: Modificado de Vonshak y Tomaselli (2000).

La mayoría de las especies del género *Arthrospira* se han localizado, habitando cuerpos de agua alcalinos, donde crecen de forma masiva; sin embargo, algunas se encuentran presentes en cuerpos de agua dulce como ríos, manantiales y estanques, no existe revisiones para ecosistemas de tipo marino. Con un adecuado suplemento de HCO₃, K⁺ y Na⁺ en conjunto con pH y salinidad adecuados, las especies de *Arthrospira* pueden ser altamente productivas en agua de mar (Vonshak & Tomaselli, 2000).

En la Tabla 2, se mencionan las características de cada especie de *Arthrospira*. La morfología de la *Arthrospira platensis* contiene un grupo semejante de cianobacterias de tipo filamentosas caracterizadas por poseer células en forma de espiral (tricomas) y una delgada membrana externa denominada vaina. Las dimensiones celulares dependen del enrollamiento celular y del largo que puedan llegar los filamentos. Estas dimensiones varían según la especie. Las condiciones ambientales de crecimiento, tienen una influencia directa en el tipo de configuración morfológica, sin embargo siempre permanecerá constante la forma helicoidal (Spiller, Denbeaux y Jones, 2001).

Tabla 2

Especies del género Arthrospira (Stizenberger, 1852)

Especie	Primera descripción
<i>A. fusiformis</i>	Estepa siberiana, Rusia, Lago Tunatan
<i>A. gomontiana</i>	América del Norte, agua estancada
<i>A. indica</i>	Madurai, India, estanque natural
<i>A. jenneri</i>	Europa, agua estancada
<i>A. khannae</i>	Rangoon, Myanmar, estanque natural
<i>A. massartii</i>	Luxemburgo, agua de manantial
<i>A. máxima</i>	Oakland, California, poza salina
<i>A. platensis</i>	Montevideo, Uruguay, agua estancada

Fuente: Modificado de Vonshak y Tomaselli (2000).

En la figura 1 se muestra éste tipo de característica empleando la microscopia electrónica de alta resolución, mientras que en la figura 2 se muestra la fotografía microscópica. Observando la morfología más exacta de la cianobacteria.

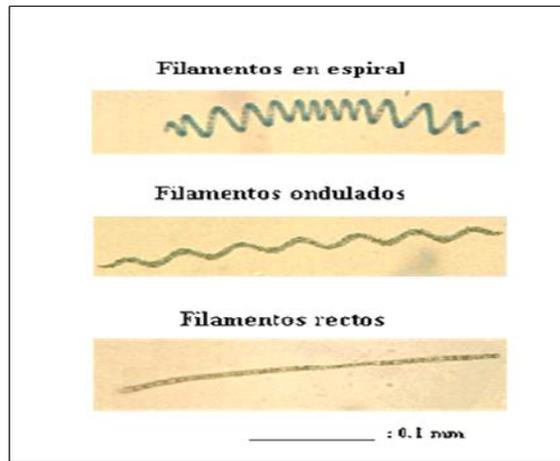


Figura 1. Tipos de filamentos de *spirulina* sp.

Fuente: Antenna technology (2005).

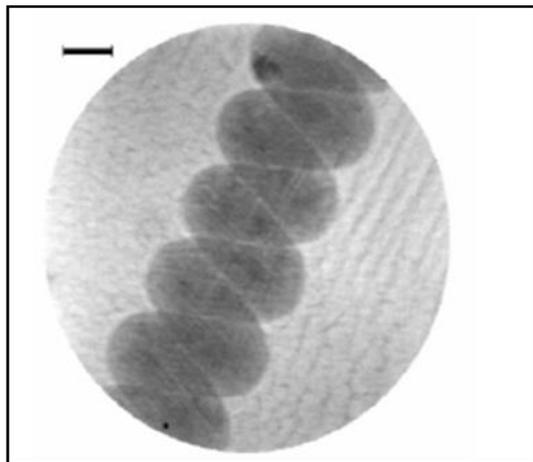


Figura 2. *Arthrospira platensis* 2400 X tricoma helicoidal visible, en una muestra de agua de mar.

Fuente: Spiller et al. (2001).

1.2.1.2. Cinética de crecimiento

El crecimiento de *Arthrospira platensis*, presenta las siguientes fases de desarrollo (Becker, 1982) (ver Figura 3):

- a) **Fase de adaptación:** El cultivo de *Arthrospira platensis* se acopla a las condiciones establecidas, la tasa de crecimiento específico es baja y se incrementa paulatinamente con el tiempo del cultivo y la capacidad biológica de adaptación de la cepa utilizada.

- b) **Fase Crecimiento exponencial:** El cultivo de *Arthrospira platensis* se ha adaptado a las condiciones de crecimiento. Se evidencia la multiplicación celular, hasta llegar a ocultarse las células una sobre otra, lo que genera una reducción del ingreso de luz. También se refleja una inhibición del crecimiento de la cianobacteria, Debido a la pérdida de nutrientes, existe una interferencia de la respiración celular.

- c) **Fase estacionaria:** Se evidencia una reducción de la tasa de crecimiento, además el ingreso de luz en las células de *Arthrospira platensis* es limitado y la respiración celular se incrementa. Debido al metabolismo oxidativo de la cianobacteria, se produce una reducción de la biomasa. En esta etapa, la curva de crecimiento logra alcanzar un valor aproximado máximo de concentración de biomasa, es así como lo llega al equilibrio entre la concentración máxima de biomasa y la pérdida de la misma. debido a los procesos de degradación.

d) **Fase de muerte:** Las células de *Arthrospira platensis* van disminuyendo, liberando en su medio de crecimiento, materia orgánica. Esta fase es la final del ciclo de crecimiento de *Arthrospira platensis*, se caracteriza por tener un limitado ingreso de nutrientes y luz (Becker, 1982).

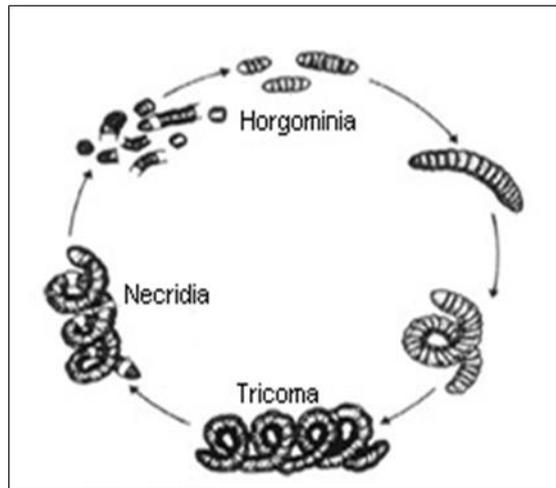


Figura 3. Ciclo de vida Arthrospira platensis.
Fuente: Ciferri et al. (1983).

1.2.2. Fotobiorreactor

Denominado como un sistema de tipo hermético, que tiene por finalidad brindar las condiciones básica para la producción de microorganismos fotótrofos (Seijas, 2012), logrando reducir su exposición a agentes de tipo contaminantes y permitiendo así el crecimiento óptimo de los microorganismos (Molina et al., 1999).

La finalidad de los fotobiorreactores, es lograr optimizar la producción de la biomasa microalgal, que estará condicionada por la velocidad de crecimiento del cultivo. Cuando no hay irradiación solar, el fenómeno de respiración ocurre en el reactor, donde la biomasa es convertida en dióxido de carbono representando pérdida de biomasa. Mientras que, durante el periodo solar, las microalgas realizan la fotosíntesis, lo que genera el crecimiento de la cianobacteria. Sin embargo, el crecimiento de las células provoca un efecto de sombra en el reactor, causando una caída substancial en la velocidad de crecimiento del cultivo. Además, otros efectos de limitación de crecimiento están presentes en los fotobiorreactores, tales como falta de nutrientes y presencia de compuestos inhibidores en el medio de cultivo. Finalmente, la velocidad de crecimiento del cultivo puede ser mejorada mediante una gestión adecuada del caudal de medio del cultivo (Becerra-Celis, Tebbani, Dumur y Isambert, 2008; Grogard et al., 2014, citado por Andrade, Pagano, Guzmán y Berenguel, 2014).

1.2.3. Energía Solar Fotovoltaica

El inicio de los sistemas fotovoltaicos se remonta al siglo XIX, cuando en 1873 el científico británico Willoughby Smith observó que el selenio era sensible a la luz y que su capacidad de conducción de electricidad aumentaba en proporción directa con la exposición a la luz. Ya en 1880, Charles Fritts

desarrolló la primera celda eléctrica que producía electricidad sin consumir ninguna sustancia ni producir calor. La energía solar fotovoltaica, es una fuente de energía tipo renovable y, por ende, inagotable, limpia y se puede aprovechar en el mismo lugar que se lleva a cabo la producción. Además, permite transformar en electricidad, la radiación solar por medio de células fotovoltaicas integradas a los módulos solares. Esta electricidad puede utilizarse de manera directa, se puede almacenar en acumuladores para un posterior uso e incluso se puede introducir a la red de distribución eléctrica. Mientras que los sistemas fotovoltaicos son los conjuntos de componente mecánicos, eléctricos y electrónicos que concurren para captar la energía solar disponible y transformarlas en utilizable como energía eléctrica.

Los especialistas predicen que la tecnología fotovoltaica será la forma de energía comercial de más rápido crecimiento hasta el 2030. Estos sistemas independientemente de su utilización y del tamaño de potencia, se pueden clasificar (ver Figura 4).

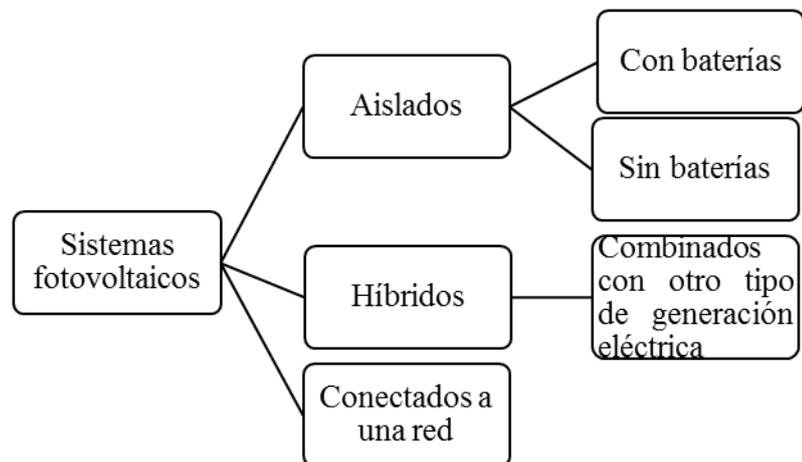


Figura 4. Clasificación de los sistemas fotovoltaicos

Fuente: Méndez & Cuervo (2008).

Hay diferentes opciones para construir un sistema fotovoltaico, pero esencialmente son los siguientes componentes:

- **Generador fotovoltaico:** Es el encargado de captar y convertir la radiación solar en corriente eléctrica mediante módulos fotovoltaicos.
- **Baterías o acumuladores:** Almacenan la energía eléctrica producida por el generador fotovoltaico para poder utilizarla en periodos en los que la demanda exceda la capacidad de producción del generador fotovoltaico.
- **Regulador de carga:** Encargado de proteger y garantizar el correcto mantenimiento de la carga de la batería y evitar sobretensiones que puedan destruirla.
- **Inversor o acondicionador:** Encargado de transformar la corriente continua producida por el generador fotovoltaico en corriente alterna, necesaria para alimentar algunas cargas o para introducir la energía producida en la red de distribución eléctrica.
- **Elementos de protección del circuito:** Como interruptores de desconexión, diodos de bloqueo, etc. Dispuestos entre diferentes elementos del sistema, para proteger la descarga y derivación de elementos en caso de fallo o situaciones de sobrecarga (Méndez & Cuervo, 2008). En la figura 5 se muestra cada uno de los elementos que conforman el sistema fotovoltaico.

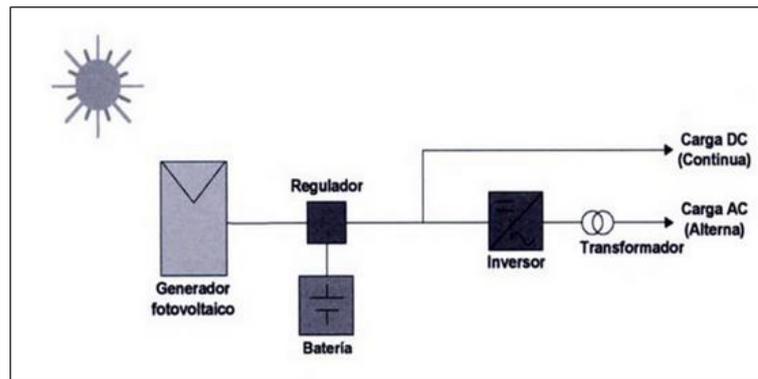


Figura 5. Componentes esenciales del sistema fotovoltaico.

Fuente: Méndez & Cuervo (2008).

1.2.4. LED

Proveniente de las siglas en inglés Light Emitting Diode (diodo emisor de luz), considerado con un dispositivo semiconductor que emite luz policromática (distintas longitudes de onda), debido a la continuada evolución de los LEDs hacia la eficiencia energética, no se puede comparar el rendimiento lumínico del LED con su consumo, por este motivo no se mide su eficiencia con watts, sino con los cálculos de lúmenes por watt o lúmenes por LED. La luz del LED es totalmente direccional, por lo que no existen pérdidas lumínicas por reflexión. Esto contribuye notablemente a aumentar la eficiencia y rentabilidad de las luminarias.

El diodo Led, tiene la característica de emitir luz en corriente de tipo continuo. Todos los diodos logran emitir una cantidad de radiación, en el momento en el que los electrones caen desde la banda de conducción de mayor energía a la banda de valencia de menor energía, llegando emitir fotones en el proceso. El color del tipo de luz estará relacionado a la distancia de la altura de valencia de la banda de conducción y la de valencia (Menéndez, 2013).

El funcionamiento de un diodo luminoso se compone de varias capas de material semiconductor. Si el diodo se activa en el sentido conductor, la luz se genera en una de estas delgadas capas, la capa activa. Al contrario que en las lámparas incandescentes, en las que se emite un espectro continuo, un LED emite luz en un determinado color, que va a estar condicionado por el tipo de material empleado. Se emplean dos tipos de materiales para lograr producir un LED de elevada luminosidad, que va desde el color azul hasta el color rojo. La eficiencia del LED, ha generado que incremente su comercialización en el mercado, debido a su alta calidad e innovación tecnológica (Diewald, 2004).

1.2.5. Panel solar

Los paneles solares fotovoltaicos son sistemas ecológicos, que se encuentran formados por un conjunto de celdas que tiene por objetivo generar una alta electricidad a partir de la radiación solar ya sea de tipo directa o indirecta. Actualmente existen diferentes características para un panel solar, dependiendo del método y material con el que fue fabricado se emplean de tres clases: amorfo, policristalino y monocristalino, cada uno de los cuales mantiene un tipo de eficiencia diversa, pues cada material posee un modelo semiconductor distinto. Los paneles solares, funcionan en base al efecto fotoeléctrico, donde los fotones contenidos en la luz llegan transmitir su energía a los electrones de los materiales semiconductores que pueden entonces salir del semiconductor mediante un circuito externo, produciéndose así la corriente eléctrica (López, 2012).

No sólo una célula tiene la capacidad de brindar una tensión que pueda utilizarse en la práctica, para obtener tensiones y potencias adecuadas es necesario llevar a cabo una conexión entre sí en serie, de un determinado

número de células fotovoltaicas, para producir tensiones de 6 - 24 voltios, siendo admitidas en la mayor parte de utilidades. A las células interconectadas, protegidas y acopladas contra agentes externos, se le denomina panel o módulo fotovoltaico.

La conexión de las células es intuitivo, llevándose a cabo mediante soldaduras especiales que unen la cara frontal de una célula con la cara posterior adyacente. Se necesitan 30- 40 células, según las características de las mismas para producir un panel de 12 voltios nominales (Barrera, 2010). La instalación, precisa de llevar a cabo un control del voltaje, a través del regulador, y direccionar la corriente hacia una batería, para luego poder almacenarla. Entonces, como la corriente eléctrica producida es directa, se requiere, muchas veces de un inversor para convertirla en corriente alterna. La figura 6 muestra un esquema completo para la utilización del panel solar (López, 2012)

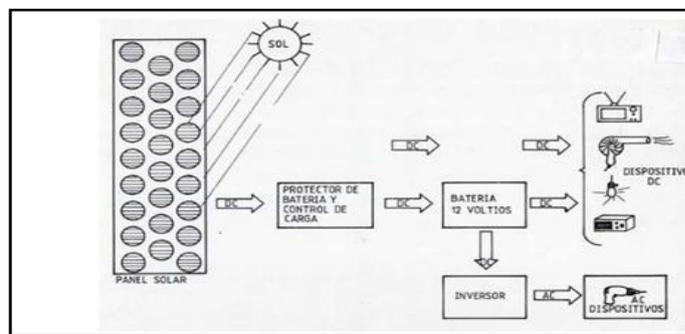


Figura 6. Esquema para utilización de paneles solares

Fuente: López (2012).

1.2.6. Zarrouk

Es el medio de cultivo usado a escala industrial para la producción de *Arthrospira platensis* según la composición que indica la tabla 3, con un pH que oscila entre 9,5 - 10,5 cuando se cultiva en forma de batch, se cosecha en promedio de 30 días. Debido a su composición química, éste medio de cultivo es el más usado en la producción de cianobacterias, especialmente de *Arthrospira platensis*.

El Medio de Zarrouk ha servido con éxito como medio estándar (ME) para el cultivo de *Spirulina* y *Arthrospira platensis*, durante muchos años (Zarrouk, 1966). En consecuencia, muchos medios han sido desarrollados utilizando agua de mar (Faucher, Coupal y Leduy, 1979), aguas servidas y efluentes industriales. La *Arthrospira platensis*, se cultiva mayormente utilizando medios químicamente definidos (Belay & Ota, 1994). Una parte significativa de los costos de producción es atribuida por estos productos químicos. Por lo que la alternativa del uso de medios de bajo costos como agua de mar, contribuye a hacerla más competitiva para la producción de productos de valor agregado. El desarrollo de los cultivos de *Spirulina* en agua de mar, es inevitable para propagar cultivos al aire libre de esta cianobacteria en muchas zonas áridas tropicales, donde las condiciones climáticas son favorables, pero el agua dulce es escasa (Bo-tang, Wen-zhou y Cheng-kui, 1998). Se han reportado pocos trabajos de investigación sobre el uso de agua de mar como un medio alternativo, después de un pretratamiento (Faucher et al., 1979) o suplementación con un bajo nivel de nutrientes específicos en condiciones de laboratorio (Materassi, Tredici y Balloni, 1984) o en piletas al aire libre (Tredici, Papuzzo y Tomaselli, 1986) (ver Tabla 3).

Tabla 3

Composición medio de cultivo Zarrouk

Sal	Concentración g.L⁻¹
NaHCO ₃	13,61
Na ₂ CO ₃	1,03
K ₂ HPO ₄	0,50
NaNO ₃	2,50
KSO ₄	1,00
NaCl	0,20
MgSO ₄ 7H ₂ O	0,04
CaCl ₂ 2H ₂ O	0,01
FeSO ₄ 7H ₂ O	0,05
Sol A5 +CO *	1,00 ml
Sol B6 *	1,00 ml

Fuente: Zarrouk (1966)

1.2.7. Importancia de la producción de *Arthrospira platensis*

Arthrospira platensis, es un organismo fototrófico, es decir que tiene la capacidad de convertir energía solar y obtener una gran variedad de metabolitos. En la actualidad es el centro de atención para la producción de una variada comercialización a nivel industrial: Biocombustible, biofertilizantes, control de contaminación ambiental y como fuente de nutrientes en alimentación humana y animal. Es debido a su elevado nivel proteico, que la producción de esta especie resulta ser rentable, por ejemplo, dentro de las plantas acuicultoras, porque se ha demostrado que el consumo directo de esta cianobacteria, ha generado que se incremente el desarrollo y metabolismo de especies como la tilapia. Además, debido a que la cianobacteria no posee pared celular, ésta no necesita un tratamiento previo para poder ser digerida. Es así, como el consumo de la proteína resulta ser factible para el consumo humano, contribuyendo de esta manera a erradicar problemas de salud como: Anemia y desnutrición crónica.

CAPÍTULO II: MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. LUGAR Y FECHA

La presente investigación se realizó en los siguientes Laboratorios: Ciencias Básicas de la Universidad Católica Sedes Sapientiae (UCSS), Laboratorio “B₂” de Ciencias Biológicas de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM) y el Laboratorio de Investigación de biopolímeros y metalofármacos de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI).

2.2. MATERIALES

2.2.1. Material biológico

- *Arthrospira platensis* cepa UTEX 1926 de la colección de cepas del laboratorio de Microbiología y Biotecnología de la Universidad Católica Sedes Sapientiae.

2.2.2. Medios de cultivo y reactivos

- Medios de cultivo: Zarrouk y la solución hidropónica La Molina® A y B. Agua residual hidropónica, procedente del Centro de Investigación Biológica (CIB).
- Reactivos: metanol, bicarbonato de sodio, agua destilada.

2.2.3. Equipos

- Espectrofotómetro modelo Genesys 20, microscopio binocular marca Beltec Scientific, autoclave marca Greetmed modelo YX-280D, fotómetro photoflex WTW ®, balanza digital, balanza analítica, estufa, desecador, centrífuga de tubos marca Greetmed modelo GT119-300, baño maría marca Thermostatic.
- Selladora marca Samwin modelo SF-300S.
- pH-metro digital.
- Termómetro digital Beurer.
- Panel solar de 85 W.
- Controlador solar Eco 10 de 10 A.
- Batería y cargador solar.

2.2.4. Otros materiales

- Material de vidrio: tubos de prueba con tapa rosca, pipetas Pasteur, pipeta de vidrio, matraces Erlenmeyer de 100, 250, 500 y 1000 ml luna de reloj, vaso precipitado.
- Propipeta.
- Tips de pipeta.
- Material de plástico: viales de 3 ml y 100 ml, mangueras de silicona.
- Celda/cubetas de cuarzo de 3 ml.
- Bolsas de polietileno (mangas), tubos de PVC de 4 pulgadas, tapas de PVC. Gradilla, piseta.
- Papel Whatman (paso rápido y lento).
- Rollo cinta Led tipo cálida, fluorescente.
- Bombas de aireación.
- Alcohol, algodón.
- Anaquel de madera.
- Papel tissue.
- Cable transparente mellizo.
- Soldador.

- Cintillos.
- Materiales extras: caja tecnopor, pabilo, marcadores.

2.3. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

El diseño de la investigación es de tipo experimental, debido a los análisis que se tienen que llevar a cabo para poder determinar el tratamiento eficaz en la producción de *Arthrospira platensis*.

2.3.1. Descripción del experimento

La investigación consta de dos fases experimentales, como se muestra en los flujogramas (ver Figura 7 y 8).

-I Fase: Preparación de los medios de cultivo Zarrouk y Agua residual hidropónica, en esta fase también se realiza el diseño y fabricación de los fotobiorreactores de PVC (policloruro de vinilo), el sellado, según las dimensiones necesarias para el volumen de producción. Posteriormente se procedió a realizar la instalación del panel, la conexión a la batería y el regulador de carga respectivamente. Finalmente se procedió a cargar los fotobiorreactores con el medio de cultivo correspondiente (zarrouk, agua residual hidropónica) y el inóculo de *Arthrospira platensis* (10 por ciento del volumen final del medio de cultivo).

-II Fase: Consistió en evaluar diariamente las absorbancias de los cultivos de cada tratamiento mediante un espectrofotómetro Genesys 20 UV-visible (670 nm) durante un periodo de 31 días. Con los datos obtenidos de las lecturas. Las observaciones realizadas al cultivo de la cepa de *Arthrospira platensis* UTEX 1926, fueron empleando el microscopio binocular marca Beltec Scientific, se graficó la curva de crecimiento poblacional con el programa Excel, previa conversión de los datos a través de una curva patrón de peso

seco de la biomasa (g). Finalmente, se obtuvieron los parámetros de crecimiento poblacional (tasa de crecimiento, μ ; capacidad de carga, k y tiempo de duplicación, t_d) y se determinó el mejor tratamiento.

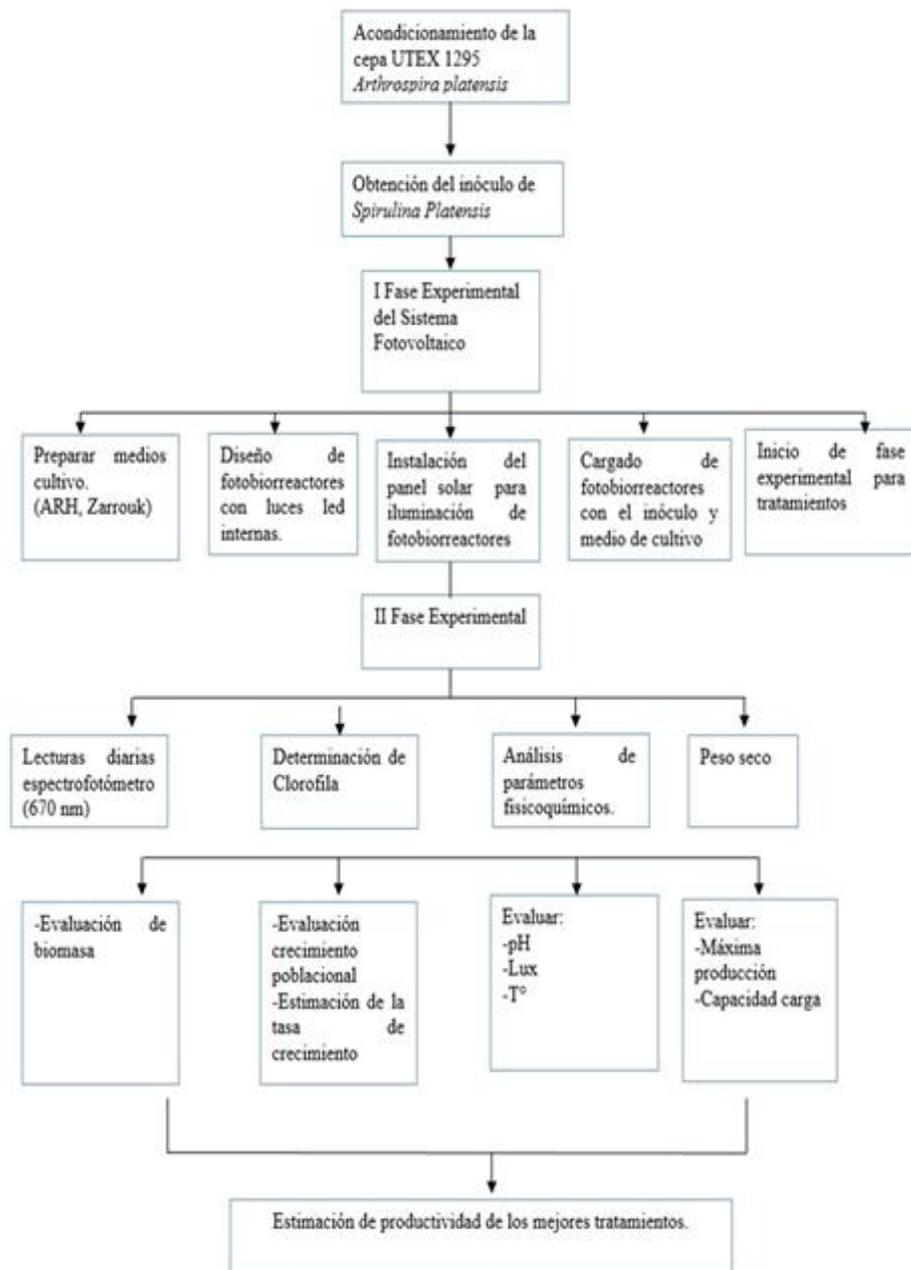


Figura 7. Diagrama de flujo para la producción de *Arthrospira platensis* en condiciones del sistema fotovoltaico

Fuente: Elaboración propia.

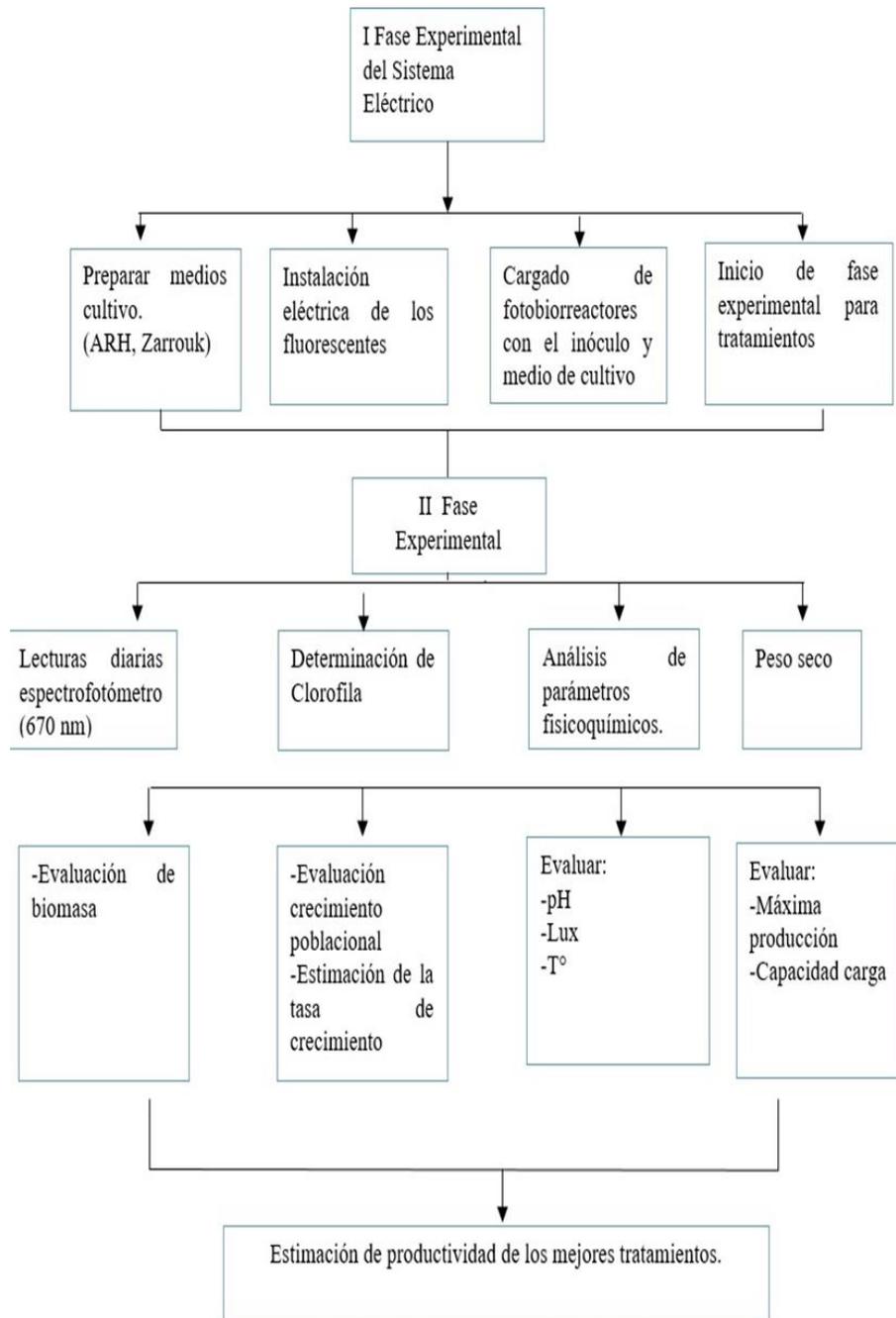


Figura 8. Diagrama de flujo para la producción de *Arthrospira platensis* en condiciones de energía eléctrica.

Fuente: Elaboración propia.

2.3.2. Preparación de los medios de cultivo

a) Medio Zarrouk

El medio de cultivo estándar se preparó a partir de la formulación de sales que se están establecidas en la Tabla 3, para un volumen determinado en cada unidad experimental del tratamiento control. Previamente se realizó un escalamiento a partir de 10 ml repartidos en 10 tubos de ensayo, hasta lograr obtener un volumen final de 500 ml. El medio de cultivo Zarrouk fue esterilizado en la autoclave a 121 °C, 15Lb.In⁻² por 15 minutos.

b) Agua residual hidropónica

Se colectó un volumen aproximado de 10 L de agua residual hidropónica procedente, del Centro de Investigación Biológica (CIB) de la Universidad Católica Sedes Sapientiae. Inmediatamente se procedió a tamizar en una malla de plástico de 400 mesh (=0,037mm), para retirar las impurezas que se encontraban en la misma. Debido a que el agua residual hidropónica presenta nutrientes disponibles como N, P, K, es empleada como un medio de cultivo alternativo al medio de cultivo zarrouk (ver Tabla 4).

Tabla 4

Composición química del agua residual hidropónica

Nutrientes	Valores
N	35± 1,5 ppm
P	12± 0,8 ppm
K	19 ± 1,9 ppm

Fuente: Elaboración propia.

**Los datos obtenidos fueron realizado utilizando el photoflex WTW ® y para cada la lectura de los elementos se realizaron tres repeticiones.*

2.3.3. Diseño del Fotobiorreactor

Para diseñar el fotobiorreactor, se tuvo que considerar varios factores como: el ingreso de la luz, el cual influye directamente en el crecimiento del alga. El material de soporte, que debe ser lo más traslúcido posible, de tal manera que permita la trayectoria de la luz. Una condición importante de los fotobiorreactores, es realizar el mezclado y la aireación del cultivo algal, logrando que todas las células reciban por igual la misma cantidad de luz. Por lo que el fotobiorreactor debe contar con una entrada y una salida para el intercambio gases.

Además, evita la sedimentación de células, la concentración de nutrientes en un solo lugar (Cañizares et al., 2003). Se consideró emplear bombas de aire conectadas a mangueras hacia el interior del fotobiorreactor. Otros factores que se deben de considerar en el diseño son: La capacidad del fotobiorreactor para una productividad volumétrica diaria ($\text{g.L}^{-1}.\text{día}^{-1}$), la productividad por área de la biomasa ($\text{g.m}^{-2}.\text{día}^{-1}$), el color de la tira led que sea tipo cálido y las características óptimas de las mangas de polietileno (sellado adecuado, dimensiones de grosor, etc.) (Cañizares et al., 2003).

Los fotobiorreactores con iluminación artificial Led, serán conectados a una batería solar que proporcionará energía a doce focos Led longitud de la tira Led, los cuales estarán debidamente cubiertas de una manga de polietileno de 30 micras de grosor y una dimensión de corte de 15x30 cm. La estructura externa rígida de fotobiorreactor estará formada por un tubo de PVC de 4 pulgadas de diámetro, con tres aberturas de 3x20 cm, 12x20 cm y 3x20 cm respectivamente que faciliten el ingreso de la luz. El software que se utilizó para el diseño del fotobiorreactor fue AutoCAD (ver Figura 9).

FOTOBIORREACTOR

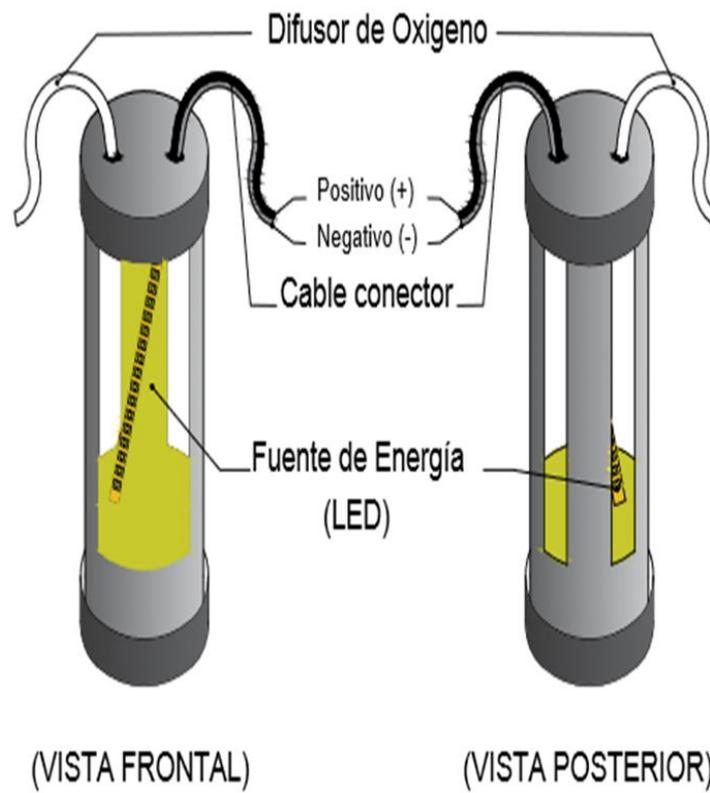


Figura 9. Diseño de los fotobiorreactores acoplados al sistema fotovoltaico.

Fuente: Elaboración propia.

2.3.4. Producción escalar de biomasa de *A. platensis*

Una vez esterilizado el medio de cultivo Zarrouk, se añadió 2,0 ml de la cepa de *Arthrospira platensis* a tubos de ensayo que contenían 10 ml medio de cultivo. Posteriormente se agregó 30 ml de la cepa a un matraz que contenía un volumen de 500 ml de medio de cultivo Zarrouk. Luego se escaló a un volumen de 1000 ml, para lo cual se empleó 10 por ciento de la cepa, completándose con medio de cultivo zarrouk hasta un volumen de 1000 ml, adicionalmente se conectó una fuente de iluminación artificial (lámpara con un foco led), y una bomba de aireación (13 L.h^{-1}), por un periodo de dos semanas. Al finalizar la segunda semana se procedió a escalar en bidones con una capacidad de 7 L, obteniéndose el volumen de biomasa para abastecer a los fotobiorreactores y continuar con los ensayos correspondientes.

La temperatura ambiental osciló entre ($25 \pm 1^\circ\text{C}$) durante todo el procedimiento de producción de biomasa y fue monitoreada constantemente. El factor de iluminación para esta etapa fue sin fotoperiodo (luz constante) (Zarrouk, 1966).

2.3.5. Descripción de tratamientos

Los tratamientos empleados se observan en la Tabla 5.

Los tratamientos se analizaron por un periodo de 30 días, la evaluación de la cinética de crecimiento de *A. platensis* se llevó a cabo de manera diaria mediante lecturas en el espectrofotómetro. Además, se realizaron dos réplicas para cada tratamiento.

Tabla 5

Tratamientos experimentales para evaluación del tipo de energía

Tratamientos	
Control	FBR iluminado con fluorescente en medio cultivo Z +150 ml de inóculo <i>A. platensis</i> .
T ₁	FBR iluminado con panel solar en medio cultivo Z +150 ml de inóculo <i>A. platensis</i> .
T ₂	FBR iluminado con panel solar en medio de ARH +150 ml de inóculo <i>A. platensis</i> .
T ₃	FBR iluminado con fluorescente en medio cultivo de ARH +150 ml de inóculo <i>A. platensis</i> .

Fuente: Elaboración propia.

*Fotobiorreactor: FBR, Agua residual hidropónico: ARH, medio de cultivo Zarrouk: medio Z, panel solar: sistema fotovoltaico, energía eléctrica: fluorescente, *Arthrospira platensis*: *A. platensis*.

Para el tratamiento Control se consideró 1,350 L de medio de cultivo Zarrouk (estándar) en el cual se inoculó 150 ml de *Arthrospira platensis* la iluminación fue de tipo convencional, es decir, utilizando un fluorescente de 14 W.

Para el T1, se consideró emplear 1,350 L del medio de cultivo Zarrouk, en el cual se inoculó 150 ml de *Arthrospira platensis*, la iluminación se llevó a cabo por medio del panel solar, que abasteció de energía a la batería solar y logró distribuirla hacia los diodos de las tiras Led, en el interior del fotobiorreactor.

El T2, se consideró emplear 1,350 L de agua residual hidropónica como medio de cultivo, en el cual se inoculó 150 ml de *Arthrospira platensis*, y donde la iluminación fue a través del panel solar. Finalmente para el T3 se empleó 1,350 ml de agua residual hidropónica sobre el cual se inoculó 150 ml de *Arthrospira platensis*, iluminado con un fluorescente.

Tabla 6

Condiciones experimentales para los tratamientos: Control y T3

Características del experimento	Descripción
Duración	cuatro semanas
Temperatura	27±1 °C
Iluminación	Una lámpara fluorescente 14W.
Fotoperiodo	No
Aireación	13 L.h ⁻¹
Volumen	2 L
pH inicial	8,72
N° de Repeticiones	2

Fuente. Elaboración propia.

Tabla 7

Condiciones experimentales para los tratamientos: T1 y T2

Características del experimento	Descripción
Duración	cuatro semanas
Temperatura	27,0±1 °C
Iluminación	panel solar de 85W(conectado a tiras led)
Fotoperiodo	12 con Luz:12 sin luz

Aireación	13 L.h ⁻¹
Volumen	2 L
pH inicial	8,72
N° de repeticiones	2

Fuente. Elaboración propia.

2.3.6. Medición de variables

a) Evaluación crecimiento poblacional por extracción de clorofila “a”

Una vez instalados los bidones, se evaluó el crecimiento poblacional mediante la cuantificación de clorofila “a”, para lo cual se emplearon bidones de 7 L de *A. platensis*, cultivados bajo los parámetros anteriormente mencionados en medio de cultivo Zarrouk. El protocolo de extracción de clorofila “a” fue según el método de extracción alcohólica propuesto por (Asimov, 1980)

- Se tomó 10 ml del cultivo original y centrifugó a 3500 rpm durante 15 minutos.
- Se retiró el sobrenadante con la pipeta.
- Se suspendió el precipitado en 5 ml de acetona al 90 por ciento de concentración.
- Se transfirió la biomasa a un homogenizador de tejidos (baño maría), hasta obtener una suspensión homogénea.
- Se guardaron las muestras durante 24 horas a 4°C en la oscuridad.
- Pasadas las 24 horas, se completó el volumen a 10 ml con metanol al 90 por ciento.

- Se centrifugó a 3500 rpm por 15 minutos.
- Al sobrenadante (3 ml) se le determinó, por espectrofotometría, la absorbancia con dos longitudes de ondas diferentes (750 nm y 665 nm.), con un blanco de metanol al 90 por ciento.
- Se restó la absorbancia obtenida de 665 nm a cada una de las otras lecturas de 750nm
- La concentración para cada clorofila en $\mu\text{g.L}^{-1}$ (mg.m^{-3}) se obtuvo a partir de la siguiente ecuación (SCOR-UNESCO, 1980):

$$\% \text{Clorofila (mg/L)} = 13,9(665A - 750A) / \frac{U}{V}$$

Donde:

U: Gasto en metanol (ml)

V: Volumen de la muestra (ml)

A: Absorbancia

b) Estimación de la tasa de crecimiento

El crecimiento poblacional de *Arthrospira platensis* se estimó mediante la concentración de clorofila “a”, cada 24 horas por 28 días y se determinó la cinética de crecimiento de la cianobacteria (ver Figura 12). Con los datos obtenidos se elaboró una curva de crecimiento y se determinó los parámetros cinéticos: tasa máxima de crecimiento durante la fase exponencial, tiempo de duplicación y capacidad de carga (Sánchez, 2014).

- Tasa de crecimiento continuo: Para el cálculo de la tasa de crecimiento continuo se usó la siguiente ecuación:

$$\ln N_t = a + bt \quad (1)$$

Que es equivalente a la siguiente expresión:

$$N_t = N_0 e^{\mu t} \quad (2)$$

Dónde:

N_t : Población final

N_0 : Población inicial

e : Constante neperiano

μ : Tasa de crecimiento exponencial

t_d : Tiempo duplicación

- Tiempo de duplicidad (t_d):

$$T = \frac{\ln(2)}{r}$$

Donde r : tasa de crecimiento exponencial

- Capacidad de Carga (k):

$$N_t = \frac{K}{1 - \left(1 - \frac{K}{N_0}\right) e^{-\mu t}}$$

Donde:

N_t : es la población en el tiempo t

μ_{max} : tasa máxima de crecimiento

k : la capacidad de carga del cultivo.

c) Estimación de parámetros fisicoquímicos

- Evaluación del potencial de hidrógeno (pH) para cada tratamiento

Se realizó la calibración del equipo, haciendo uso de las soluciones buffer de 4 y 7 pH. La medición se llevó a cabo, haciendo uso del pH-metro digital, que permitió realizar las lecturas directas en los tratamientos, de manera diaria y por un periodo de cuatro semanas.

Para realizar la medición, se extrajo alícuotas de 5 ml para cada tratamiento y se colocó dentro de un vial, en el cual se insertó el sensor del pH-metro, que señaló un valor determinado. Además, el sensor se mantuvo insertado por un periodo de 10 – 15 segundos, para comprobar si existía variación entre los datos obtenidos.

Finalmente, la limpieza del sensor se realizó con 3 ml de agua destilada para cada medición.

- Medición de temperatura del medio cultivo para cada tratamiento

Se realizó haciendo uso de un termómetro digital modelo Beurer, se registraron los datos de temperatura de manera diaria, por un tiempo de cuatro semanas.

Para la medición, se extrajo alícuotas de 5 ml, por cada tratamiento y se procedió a colocar la muestra extraída, en viales estériles, para posteriormente introducir el sensor térmico por aproximadamente 10 segundos y obtener un valor exacto de la temperatura del cultivo.

La limpieza, de sensor térmico se llevó a cabo lavándolo con 3 ml de agua destilada para cada medición hecha.

- Estimación de la temperatura ambiental para T1 y T2

Se tuvo como referencia los datos registrados por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), desde el 04 de abril al 04 de mayo del año 2017, tiempo en el cual se inició y finalizó el proyecto, siendo cuatro semanas las evaluadas.

T1 y T2, fueron los tratamientos que tuvieron repercusión directa sobre como la temperatura influenció en el crecimiento de la *Arthrospira platensis*, pues ambos fueron iluminados con la energía obtenida del panel solar, a través de las tiras Led.

Los datos consignados pertenecen a la estación meteorológica del distrito de Los Olivos (ver Apéndice 7).

d) Evaluación del porcentaje de nitrógeno total (NT) de la biomasa de *Arthrospira platensis*

Se llevó a cabo el análisis de la composición química de la biomasa proveniente del tratamiento óptimo cultivado en los fotobiorreactores. El análisis fue realizado por el Laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas y Fertilizantes, de la Universidad Nacional Agraria La Molina (ver Apéndice 9).

2.4. DISEÑO ESTADÍSTICO DE EXPERIMENTACIÓN

Se usó un diseño completo al azar (DCA) con tres tratamientos: a) tratamiento 1, correspondiente al fotobiorreactor iluminado con panel solar en medio de cultivo zarrouk inoculado con 150 ml de *A. platensis*, b) el tratamiento 2, correspondiente al fotobiorreactor iluminado con panel solar cultivado en agua residual hidropónica

inoculado con 150 ml de *A. platensis* y finalmente c) el tratamiento 3, correspondiente al fotobiorreactor iluminado con fluorescente cultivado en agua residual hidropónica inoculado con 150 ml de *A. platensis*. Además el tratamiento control.

2.4.1. Unidad experimental

Cada unidad experimental está representada por un fotobiorreactor que tiene una capacidad de volumen de 2 litros, se considera realizar 2 repeticiones por tratamiento, totalizando 12 unidades experimentales, con igual número de repeticiones.

2.4.2. Análisis estadístico de los datos

Las tablas, gráficos así como las desviaciones estándar se realizaron usando el programa Excel versión 16.

Se empleó la prueba de “t” de Student para determinar si existían diferencias significativas entre los tratamientos y los valores promedio del peso seco. Se realizó el análisis de correlación de Pearson entre los parámetros fisicoquímicos obtenidos. Posteriormente se realizó un análisis de varianza (ANOVA) entre tasa de crecimiento versus los medios de cultivo (zarrouk, agua residual hidropónica) y los parámetros de crecimiento: tasa de crecimiento (μ). Tiempo de duplicación (td) y capacidad de carga (k) con la finalidad de conocer la mayor producción de *Arthrospira platensis* en un medio de cultivo. El análisis estadístico se hizo con un valor de significancia de $p < 0,05$ y se empleó el software SPSS versión

CAPÍTULO III: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. RESULTADOS

3.1.1. Caracterización morfológica de la cianobacteria

Se pudo determinar que morfológicamente la cianobacteria muestra una sucesión de tricomas helicoidales que tienen forma cilíndrica y son multicelular. Además, los filamentos mostraron capacidad de movimiento, deslizando a lo largo de su eje, cuyas dimensiones se observan en la Tabla 9 (ver Figura 10).

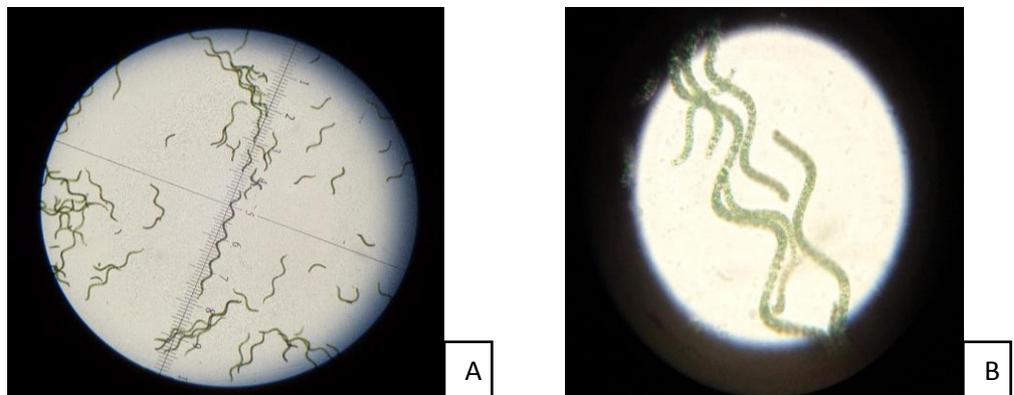


Figura 10. Arthrospira platensis (10X). Microfotografías A y B se observan células con una sucesión de tricomas helicoidales de forma cilíndrica.

Fuente: Elaboración propia.

3.1.2. Características geométricas de la cianobacteria

Para la identificación taxonómica de la cianobacteria se tuvo que recurrir a la base de datos (Guiry & Guiry, 2018) y se describen en la Tabla 8 y 9.

Tabla 8

Clasificación taxonómica de la especie Arthrospira platensis

Característica	Descripción
Dominio	Bacteria
Sub-dominio	Gracilicutes
División	Cyanobacteria
Clase	Cyanophyceae
Orden	Chroococcale
Familia	Spirulinaceae
Género	<i>Arthrospira</i>
Especie	<i>Arthrospira platensis</i>

Fuente: Guiry & Guiry (2018).

Tabla 9

Características geométricas de Arthrospira platensis

<i>Arthrospira platensis</i>	
Forma geométrica	Espiral
Diámetro	10 µm
Largo	340 µm

Fuente: Elaboración propia.

3.1.3. Evaluación de los parámetros físico-químicos para el cultivo de *A. platensis* en diferentes medios de cultivo (zarrouk y agua residual hidropónica)

3.1.3.1. Resultados del análisis del pH

Los valores promedio de pH del control, T1, T2, y T3 se presentan en la Tabla 10. Los valores del pH se incrementaron constantemente durante los 30 días del experimento manteniéndose dentro del rango de alcalinidad ideal para el cultivo de *Arthrospira platensis*. El valor mínimo de pH se registró el día 0, para el tratamiento control fue de $8,71 \pm 0,015$, para el T1 fue de $8,72 \pm 0,01$, para el T2 fue de $8,71 \pm 0,01$ y finalmente el T3 fue de $8,71 \pm 0,015$. El valor máximo de pH se registró el día 29, para el tratamiento control fue de $10,54 \pm 0,01$, para los demás tratamientos se registró el máximo valor el día 30, para el T1 fue de $10,72 \pm 0,20$, para el T2 fue de $10,72 \pm 0,107$ y finalmente para el T3 fue de $10,85 \pm 0,13$.

Tabla 10

Valores de pH para los tratamientos (control, T1, T2 y T3), evaluados durante 30 días

Días	Control	T1	T2	T3
0	8,71±0,015	8,72±0,010	8,71±0,010	8,71±0,015
1	8,73±0,015	9,17±0,020	8,73±0,015	8,74±0,010
2	9,50±0,020	9,33±0,020	9,29±0,020	9,38±0,015
3	9,69±0,025	9,51±0,020	9,58±0,025	9,52±0,035
4	9,75±0,030	9,61±0,020	9,73±0,020	9,68±0,080
5	9,77±0,040	9,65±0,020	9,70±0,040	9,72±0,090
7	9,81±0,050	9,68±0,040	9,86±0,030	9,84±0,100
8	9,87±0,020	9,74±0,010	9,92±0,030	9,86±0,100
9	9,89±0,030	9,74±0,040	9,92±0,040	9,89±0,100
10	9,9±0,010	9,76±0,020	9,92±0,030	9,98±0,150
11	9,91±0,020	9,86±0,050	9,94±0,040	10,15±0,120
12	9,92±0,015	10,01±0,260	9,97±0,050	10,19±0,170
13	9,94±0,015	10,09±0,360	10,01±0,060	10,27±0,150
14	9,96±0,010	10,11±0,360	10,07±0,025	10,32±0,180
15	9,97±0,005	10,13±0,370	10,12±0,050	10,39±0,150
16	10,00±0,026	10,14±0,380	10,17±0,049	10,45±0,177
17	10,02±0,035	10,16±0,380	10,24±0,050	10,51±0,160
18	10,04±0,045	10,18±0,390	10,28±0,060	10,58±0,240
20	10,14±0,085	10,28±0,370	10,34±0,060	10,78±0,250
21	10,21±0,040	10,27±0,330	10,37±0,048	10,65±0,130
22	10,23±0,030	10,29±0,410	10,45±0,078	10,71±0,150
23	10,27±0,040	10,36±0,390	10,47±0,076	10,72±0,150
25	10,36±0,070	10,54±0,270	10,54±0,060	10,77±0,130
26	10,39±0,050	10,62±0,200	10,61±0,060	10,79±0,120
27	10,43±0,046	10,66±0,200	10,62±0,067	10,81±0,120
28	10,46±0,028	10,67±0,200	10,65±0,070	10,83±0,120
29	10,54±0,040	10,69±0,200	10,67±0,072	10,85±0,120
30	10,53±0,010	10,72±0,200	10,72±0,107	10,85±0,130

*Tratamiento control (fluorescente + medio de cultivo zarrouk), T1 (panel solar + medio de cultivo zarrouk), T2 (panel solar + medio de cultivo agua residual hidropónica) y T3 (fluorescente + medio de cultivo de agua residual hidropónica).

3.1.3.2. Resultados de la temperatura

Los valores promedio de temperatura de los tratamientos: control, T1, T2, y T3 se presentan en la Tabla 11. Los valores de la temperatura se incrementaron constantemente durante los 30 días del experimento manteniéndose dentro del rango ideal para para el cultivo de *Arthrospira platensis*. El valor mínimo de temperatura se registró el día 1, para el tratamiento control fue de 22,5, mientras que para los demás tratamientos el valor máximo se registró el día 1, para el T1 fue de 22, para el T2 fue de 21,9 y finalmente para el T3 fue de 22,1. El valor máximo de temperatura se registró el día 30, para el tratamiento control fue de 31,9, para el T1 fue de 31,3, para el T2 fue de 31,9 y finalmente fue de 31,5.

Tabla 11

Valores de temperatura para los tratamientos (control, T1, T2 y T3), evaluados durante 30 días

Días	Control	T1	T2	T3
0	22,5	22,6	22,4	22,5
1	22,8	22,0	21,9	22,1
2	22,3	22,1	22,0	22,0
3	23,0	23,5	23,1	23,0
4	23,8	23,6	23,8	23,6
5	24,4	24,3	24,6	24,7
6	24,9	25,0	25	25,1
7	25,1	25,0	25,0	25,0
8	25,2	25,3	25,1	25,0
9	25,7	25,8	25,3	25,4
10	26,1	26,3	26,2	26,4
11	26,7	26,5	26,7	26,8
12	27,1	27,3	27,6	27,5
13	27,4	27,7	27,8	27,8
14	28,2	28,4	28,2	28,1
16	28,7	28,9	28,9	28,7
17	28,9	29,2	29,2	28,9
18	29,3	29,5	29,3	28,5
19	29,4	29,7	29,5	28,7
20	29,7	29,9	29,6	28,8
21	30,1	30,2	29,9	28,9
22	30,3	30,5	30,2	29,1
24	30,8	30,8	30,6	29,6
25	30,9	31,2	30,9	29,8
26	31,2	31,4	31,1	29,9
27	31,4	31,7	31,3	30,5
30	31,5	31,9	31,6	30,7

Fuente: Elaboración propia.

3.1.3.3. Resultados de la iluminación

Los valores promedio de iluminación registrados para el control (fluorescente + medio de cultivo zarrouk) fue de $4680,3 \pm 74,21$ lux, para el T1 (panel solar + medio de cultivo zarrouk) fue de 7000,0 lux, para el T2 (panel solar + medio de cultivo agua residual hidropónica) 4000 lux y finalmente T3 (fluorescente + medio de cultivo de agua residual hidropónica) fue 7000 lux.

Tabla 12

Valores de iluminación iniciales para los tratamientos (control, T1, T2 y T3), evaluados en el experimento

Control	$4680,3 \pm 74,2$ lux
T1	$7000,0 \pm 0,00$ lux
T2	$4000,0 \pm 86,60$ lux
T3	$7000,0 \pm 0,00$ lux

*Tratamiento control (fluorescente + medio de cultivo zarrouk), T1 (panel solar + medio de cultivo zarrouk), T2 (panel solar + medio de cultivo agua residual hidropónica) y T3 (fluorescente + medio de cultivo de agua residual hidropónica).

Fuente: Elaboración propia.

3.1.3.4. Correlación de los parámetros de pH, Temperatura y Luminosidad

Los parámetros se correlacionaron con la prueba de Pearson observados en la Tabla 13.

Tabla 13

Valores de correlación de Pearson de los parámetros pH, temperatura y luminosidad

	pH	Temperatura	Luminosidad
pH		0,915**	0,032
		P=0,000	P=0,85
Temperatura	0,91**		0,006
	P=0,000		P=0,969
Luminosidad	0,032**	0,006	
	P=0,85	P=0,96	

****.** La correlación es significativa en el nivel 0,01(bilateral).

El pH y la temperatura alcanzaron una correlación alta y directa $P=0,915$, el pH con la luminosidad presentó una correlación baja $P=0,032$ Finalmente los valores de luminosidad con temperatura presentaron una correlación muy baja $P=0,006$.

3.1.4. Conversión de las absorbancias de los cultivos de *Arthrospira platensis* en peso seco

La información obtenida de absorbancia de la biomasa en ambas etapas experimentales fueron convertidos a peso (g), para lo cual se realizó una curva de calibración del peso seco versus absorbancia, y con la ecuación de regresión lineal ($y= a + bx$) se convirtieron los datos de absorbancia a peso seco (ver Figura 11)

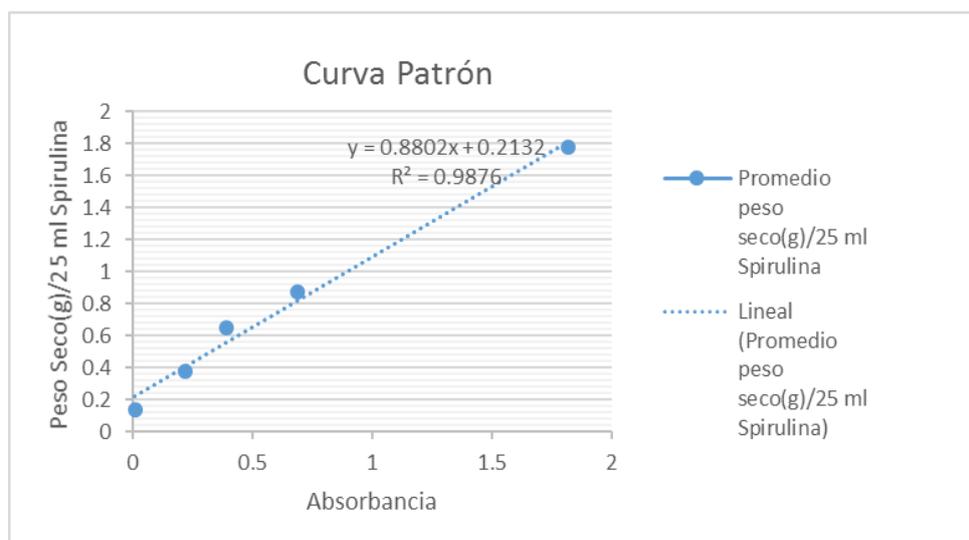


Figura 11. Curva de calibración de peso seco de la biomasa de la *Arthrospira* en relación al tiempo.

3.1.5. Evaluación del crecimiento de *A. platensis* bajo condiciones del medio de cultivo estándar zarrouk

En la figura 12 se observa la curva de crecimiento expresada en mg.L^{-1} de clorofila “a” de *Arthrospira platensis* por un tiempo de 28 días, en el medio de cultivo estándar Zarrouk. La tendencia que se observó en la curva, fue un aumento en la concentración de clorofila “a” (mg.L^{-1}) en el tiempo, mostrando una buena correlación lineal ($R=0,7282$), lo cual indica que la población de *A. platensis* se encuentra en óptimas condiciones fisiológicas ya que su metabolismo principal es la fotosíntesis. Cabe resaltar que se observan todas las fases de crecimiento, encontrándose que el desarrollo exponencial, alcanzó la capacidad de carga (k) correspondiente a $6,55 \text{ mg.L}^{-1}$ y un $\mu= 0,21 \text{ (días}^{-1}\text{)}$. Así mismo, el tiempo de duplicación es de 2,25 días, periodo en el cual el número de células se duplica (ver Tabla 14).

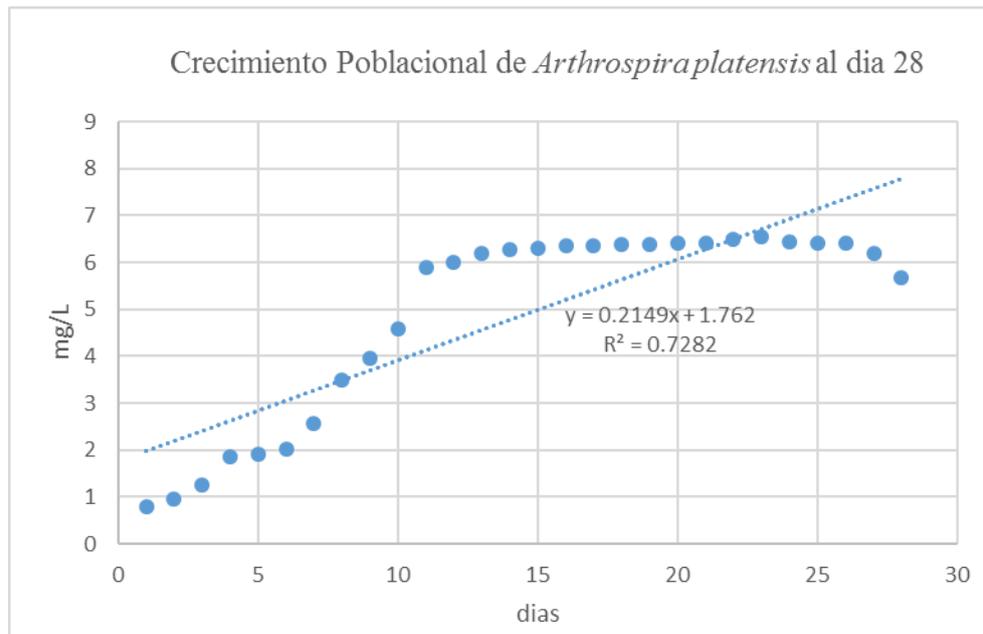


Figura 12. Curvas de crecimiento de *Arthrospira platensis* para el tratamiento control durante 28 días.

Tabla 14

Parámetros evaluados durante la fase exponencial la Arthrospira platensis en el medio de cultivo zarrouk

	$\mu(\text{días}^{-1})$	0,21
Parámetros cinéticos de crecimiento	$k (\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	6,55
	$t_d (\text{días})$	2,25

Fuente: Elaboración propia.

3.1.6. Resultados del tratamiento Control (fluorescente + medio de cultivo zarrouk)

La concentración inicial de peso seco de *A. platensis* en el tratamiento control fue de $0,346 \pm 0,008$ g. En la Tabla 15 se observó que la cantidad de peso seco de la cianobacteria alcanzó un valor mínimo de $0,346 \pm 0,008$ g en el día cero y un valor máximo de $1,167 \pm 0,0015$ g en el día 25 del cultivo.

El análisis de la prueba “t” respecto a los valores del tratamiento control en relación con los días evaluados, mostró diferencias significativas ($t= -4,626$; $p=0,000$) en cuanto al aumento de la biomasa en gramos durante los días del cultivo (ver Tabla 16).

Tabla 15

Valores promedio del peso seco Arthrospira platensis (g) en el tratamiento control, evaluados en 31 días. Los resultados son los promedios de dos réplicas y la desviación estándar ($\pm D.S$)

Días	Promedio	\pm	D.S
1	0.3461102	\pm	0.000880234
2	0.3654746	\pm	0.000880233
3	0.3767705	\pm	0.004522835
4	0.3832253	\pm	0.000254092
5	0.4317833	\pm	0.000508184
7	0.4209272	\pm	0.010671858
8	0.4834214	\pm	0.001524551
9	0.4901696	\pm	0.002540919
11	0.5843512	\pm	0.001016367
15	0.6517156	\pm	0.000609827
17	0.7372124	\pm	0.005590021
18	0.7483616	\pm	0.001524551
19	0.8674822	\pm	0.000508184
20	1.0156499	\pm	0.000508989

Días	Promedio	±	D.S
21	0.9574384	±	0.001931098
22	1.0534976	±	0.001016367
24	1.1676302	±	0.008639123
25	1.1206862	±	0.001524551
26	1.0740356	±	0.003049102
27	0.9895364	±	0.009147307
30	0.9092034	±	0.006504751

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 16

Análisis de la prueba t de los valores promedio del peso seco del tratamiento control de Arthrospira platensis (g), evaluados en 31 días

Prueba t de muestras emparejadas				
Diferencias Emparejadas				
	Desviación estándar	t	gl	sig(bilateral)
<i>Fuente:</i> Elaboración propia.				
	-,24878	0,294558	4,626	29 0,000

Fuente: Elaboración propia.

3.1.6.1. Resultados del tratamiento T1 (panel solar + medio de cultivo zarrouk)

La concentración inicial de peso seco de *A. platensis* en el tratamiento T1 fue de $0,359 \pm 0,0013$ g. En la Tabla 17 se observó que la cantidad de peso seco de la cianobacteria alcanzó un valor mínimo de $0,359 \pm 0,0013$ g en el día 0 y un valor máximo de $1,2145 \pm 0,022$ g en el día 26 del cultivo.

El análisis de la prueba “t” respecto a los valores del tratamiento T1 en relación con los días evaluados, mostró diferencias significativas ($t = -4,626$; $p = 0,000$) en cuanto al aumento de la biomasa en gramos durante los días del cultivo (ver Tabla 18).

Tabla 17

Valores promedio del peso seco Arthrospira platensis (g) en el tratamiento T1, evaluados en 31 días. Los resultados son los promedios de dos réplicas y la desviación estándar ($\pm D.S$)

Días	Promedio		D.S
1	0.3590198	±	0.0013445
2	0.3788243	±	0.0040555
3	0.3868928	±	0.0005082
4	0.3915872	±	0.0010164
5	0.4127122	±	0.0101637
6	0.4490936	±	0.0091473
7	0.4640577	±	0.0015246
8	0.4690448	±	0.0025409
9	0.4740326	±	0.0020327
11	0.4185888	±	0.0142291
12	0.4778468	±	0.0020327
13	0.4819544	±	0.0005082
14	0.4942772	±	0.0055956
15	0.5274314	±	0.0091473
16	0.5288984	±	0.0040655
17	0.5403411	±	0.0035573
18	0.6089966	±	0.0111889
19	0.6227864	±	0.0055569
20	0.9155996	±	0.0228658
21	0.9733994	±	0.0116882
22	1.0364804	±	0.0142357

23	1.0848914	±	0.0116882
24	1.0385342	±	0.0040655
25	1.0534976	±	0.0010164
26	1.2145742	±	0.0223601
27	1.2084128	±	0.0177864
28	1.1969702	±	0.0040655
29	1.1227444	±	0.0101637
30	1.0807838	±	0.0142294

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 18

*Análisis de la prueba t de los valores promedio del peso seco del T1 de *Arthrospira platensis* (g), evaluados en 31 días*

Prueba t de muestras emparejadas						
Diferencias Emparejadas						
Par1	control-días	Media	Desviación estándar	t	gl	sig(bilateral)
		-,28489	0,31408	-4,626	29	0,000

Fuente: Elaboración propia.

3.1.6.2. Resultados del tratamiento T2 (panel solar + medio de cultivo agua residual hidropónica)

La concentración inicial de peso seco de *A. platensis* en el tratamiento T2 fue de $0,3910 \pm 0,031$. En la Tabla 19 se observó que la cantidad de peso seco de la cianobacteria alcanzó un valor mínimo de $0,3793 \pm 0,0008$ g en el día 0 y un valor máximo de $1,353 \pm 0,00457$ g en el día 24 del cultivo.

El análisis de la prueba “t” respecto a los valores del tratamiento T2 en relación con los días evaluados, mostró diferencias significativas ($t = -4,503$; $p = 0,000$) en cuanto al aumento de la biomasa en gramos durante los días del cultivo (ver Tabla 20).

Tabla 19

Valores promedio del peso seco Arthrospira platensis (g) en el T2, evaluados en 31 días. Los resultados son los promedios de dos réplicas y la desviación estándar (\pm D.S)

Días	Promedio		D.S
1	0.391024	\pm	0.0031736
2	0.3890052	\pm	0.0026131
3	0.379323	\pm	0.0008639
4	0.3881544	\pm	0.0003557
5	0.4127123	\pm	0.0101637
7	0.4642917	\pm	0.0097063
8	0.4901696	\pm	0.0066064
9	0.4643504	\pm	0.0055923
10	0.5450354	\pm	0.0167701
11	0.5696811	\pm	0.0015246
13	0.5646932	\pm	0.0020327
14	0.5300722	\pm	0.0106719
15	0.5236172	\pm	0.0188028
16	0.6406838	\pm	0.0055988
17	0.6213194	\pm	0.0071146
19	1.0602458	\pm	0.0498028
20	1.0570184	\pm	0.0203274
21	1.0810772	\pm	0.0106719
22	1.0385342	\pm	0.0040655
23	1.0892924	\pm	0.0025409
24	1.3530599	\pm	0.0457365
25	1.2750146	\pm	0.0101637
26	1.2436208	\pm	0.0111823
28	1.2621053	\pm	0.0431956
29	0.8741128	\pm	0.0585936
30	0.7665524	\pm	0.0386224

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 20

Análisis de la prueba t de los valores promedio del peso seco del tratamiento T2 de Arthrospira platensis (g), evaluados en 31 días

Prueba t de muestras emparejadas						
Diferencias Emparejadas						
Par1	Trat.2- días	Media	Desviación estándar	t	gl	sig(bilateral)
		-	0,31981	-	29	0,000
		,26043		4,503		

Fuente: Elaboración propia.

3.1.6.3. Resultados del tratamiento T3 (fluorescente + medio de cultivo de agua residual hidropónica)

La concentración inicial de peso seco de *A. platensis* en el tratamiento T3 fue de $0,3575 \pm 0,0023$ g. En la Tabla 21 se observó que la cantidad de peso seco de la cianobacteria alcanzó un valor mínimo de $0,3575 \pm 0,0023$ g en el día 0 y un valor máximo de $1,264 \pm 0,0015$ g en el día 26 del cultivo.

El análisis de la prueba “t” respecto a los valores del tratamiento T3 en relación con los días evaluados, mostró diferencias significativas ($t = -4,995$; $p = 0,000$) en cuanto al aumento de la biomasa en gramos durante los días del cultivo (ver Tabla 22).

Tabla 21

Valores promedio del peso seco Arthrospira platensis (g) en el tratamiento T3, evaluados en 31 días. Los resultados son los promedios de dos réplicas y la desviación estándar (\pm D.S)

Días	Promedio		D.S
1	0.3575528	\pm	0.00232879
2	0.3745777	\pm	0.00451684
3	0.3736898	\pm	0.00559002
4	0.3905016	\pm	0.00238846
5	0.4132988	\pm	0.01016367
6	0.4335434	\pm	0.00406547
7	0.4602428	\pm	0.00355729
8	0.4661108	\pm	0.00508184
9	0.4843016	\pm	0.00457365
10	0.4555484	\pm	0.01727825
11	0.4825412	\pm	0.00457365
12	0.5107076	\pm	0.01372096
13	0.5465024	\pm	0.00050818
14	0.5274314	\pm	0.00914731
15	0.5321258	\pm	0.00254092
16	0.5465024	\pm	0.00508184
17	0.6004888	\pm	0.02439282
19	0.7935452	\pm	0.01931098
20	0.9302696	\pm	0.01270459
21	1.0364804	\pm	0.01422914
22	1.0869452	\pm	0.00813094
24	0.9661230	\pm	0.02713701
25	1.2577044	\pm	0.05081837
26	1.2641588	\pm	0.00152455
27	1.2445011	\pm	0.00508184
28	1.1999042	\pm	0.00152455
29	1.1470922	\pm	0.0060982
30	1.0452824	\pm	0.03913015

Tabla 22

*Análisis de la prueba t de los valores promedio del peso seco del tratamiento T3 de *Arthrospira platensis* (g), evaluados en 31 días*

Prueba t de muestras emparejadas						
Diferencias Emparejadas						
Par1	tratamiento	Media	Desviación estándar	t	gl	Sig.(bilateral)
	3-días					
		-,28534	0,31286	-4,995	29	0,000

Fuente: Elaboración propia.

3.1.6.4. Resultados de análisis del peso seco entre tratamientos y el control

Se observan las curvas de los valores de biomasa expresada en pesos secos de los tratamientos (T1, T2 y T3) comparados con el tratamiento control (ver Figura 13).

Los valores del primer tratamiento comparadas con el control (fluorescente + medio de cultivo zarrouk) muestran un crecimiento muy similar hasta el día 11 con un valor de 0,477 g para el tratamiento 1 (panel solar + medio de cultivo zarrouk) posteriormente dicho tratamiento T1, mostró un ascenso menor que el control en el día 20 con un valor de 0,97 g. El día 26 de cultivo el tratamiento 1 alcanzó su valor máximo de 1,21 g similar al control.

Los valores del segundo tratamiento (panel solar + medio de cultivo agua residual hidropónica) muestran un ascenso con un crecimiento similar al del control al día 19 con un valor de 1,045 g. El día 21 el tratamiento control presenta un decrecimiento con un valor de 0,95 g. Mientras que el tratamiento T2 presenta un valor de 1,057 g, posteriormente el tratamiento 2 presenta su máximo crecimiento con un valor de 1,35 g para el día 25. Mientras que el control tuvo un valor máximo de 1,27 g para el día 26.

Los valores del tratamiento T3 (fluorescente + medio de cultivo de agua residual hidropónica) muestran un ligero ascenso con el control hasta el día 11 un valor de 0,48 g. El control se incrementa en los días 13, 15, 17 y 19 con valores de 0,64 g, 0,73 g, 0,86 g y 1,01 g respectivamente. Mientras que para el tratamiento 3 mostró una estabilidad en los días 13, 15 y 17 con valores de 0,54 g, 0,53g y 0,60 g respectivamente. Posteriormente los valores de este tratamiento se incrementaron en los días 19 con un valor de 0,79 g y en el día 20 con un valor de 0,93 g y en el día 22 se registra un incremento del tratamiento 3 con un valor de 1,08 g superando el control que obtuvo un valor de 1,01 g. Los valores máximos de crecimiento del tratamiento 3 y el control fueron de 1,26 g.

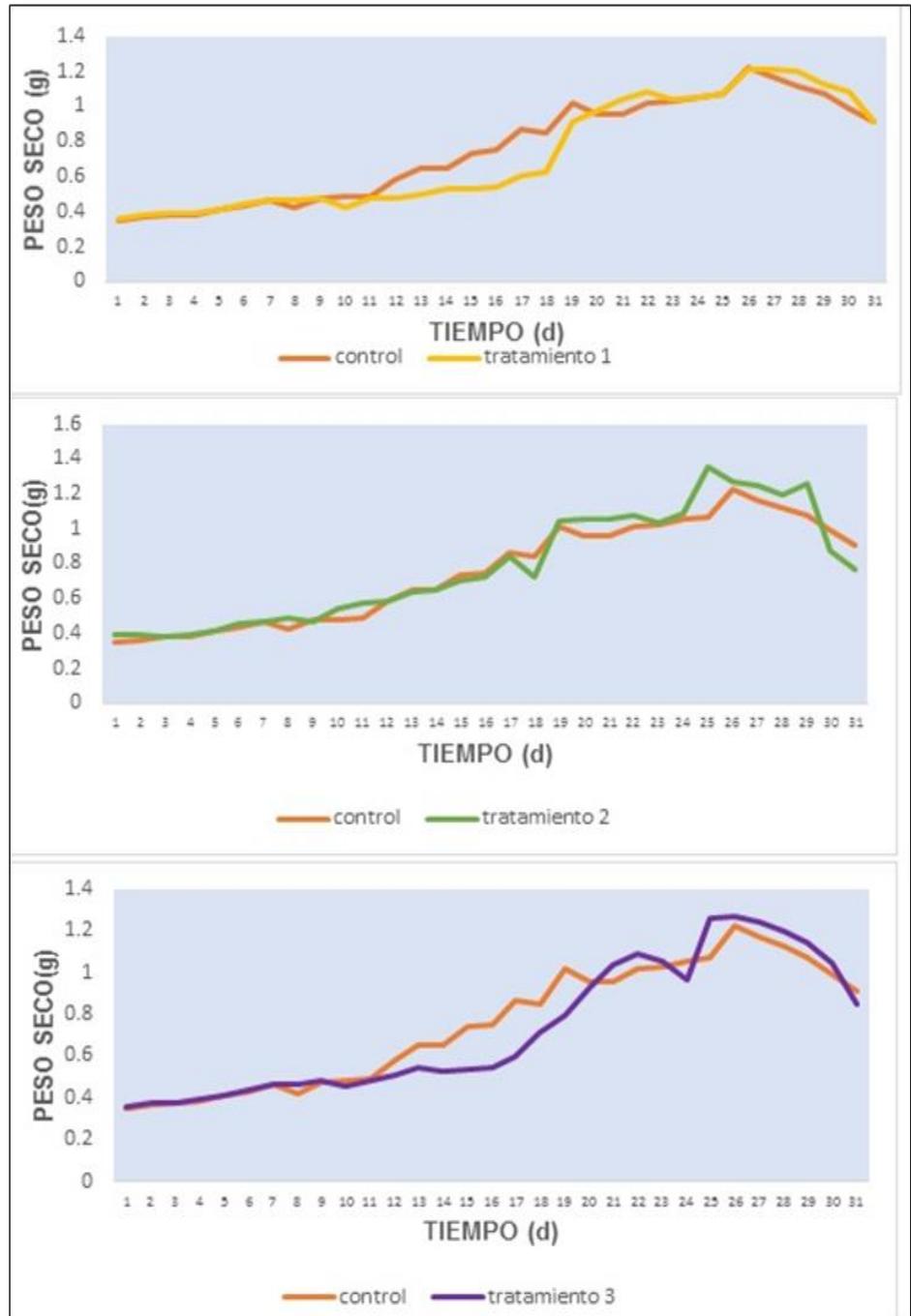


Figura 13. Curva de valores de biomasa expresada en peso seco (g) de *Arthrospira* en relación con el tiempo.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 23

Análisis de la varianza del peso seco del control y los tratamientos con respecto al tiempo (d) de cultivo

Peso seco	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	0,040	3	0,013	11,093	0,003
Dentro de grupos	0,010	8	0,001		
Total	0,049	11			

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 23, muestra el análisis de la Varianza del valor de peso seco del control y los tratamientos con respecto al tiempo (d) de cultivo el cual mostró diferencias significativas ($p=0,003$) entre ellos. Se realizó el análisis de Tukey, el cual mostró que no hay diferencias significativas ($p > 0,05$) entre los tratamientos independientes (T1, T2 y T3) en comparación con el control (ver Tabla 24).

Tabla 24

Prueba de Tukey de la variación del peso seco en los tratamientos y el control

HSD Tukey^a		
TRATAMIENTOS	N	Subconjunto para alfa = 0.05
TRATAMIENTO 1	30	0.7151
TRATAMIENTO 3	30	0.7202
TRATAMIENTO 2	30	0.7396
CONTROL	30	0.7512
Sig.		0.970

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 30,000.

Fuente: Elaboración propia.

3.1.6.4.1. Crecimiento, capacidad de carga y tiempo de duplicación de los tratamientos y el control

El valor promedio de la tasa de crecimiento (μ) para el tratamiento control fue de $0,2207 \pm 0,0106$ para el tratamiento T1 fue de $0,2325 \pm 0,014$, mientras que para el T2 fue de $0,3744 \pm 0,005$ y finalmente para el T3 fue de $0,2973 \pm 0,034$.

El valor promedio de la capacidad de carga (k) para el tratamiento control fue de $1,225 \pm 0,012$, para el tratamiento T1 fue de $1,214 \pm 0,002$, mientras que para el T2 fue de $1,353 \pm 0,004$ y finalmente para el T3 fue de $1,257 \pm 0,005$.

El valor promedio del tiempo de duplicación (t_d) para el tratamiento control fue de $3,1404 \pm 0,005$, para el T1 fue de $2,9807 \pm 0,012$, mientras que para el T2 fue de $1,8512 \pm 0,004$ y finalmente para el T3 fue de $2,3313 \pm 0,005$.

Tabla 25

Parámetro de crecimiento del cultivo de A. platensis de los tratamientos (control, T1, T2 y T3)

Parámetro	Control	T1	T2	T3
$\mu(\text{días}^{-1})$	0,2207 $\pm 0,010$	0,2325 $\pm 0,014$	0,3744 $\pm 0,005$	0,2973 $\pm 0,034$
$k(\text{mgL}^{-1})$	1,225 $\pm 0,012$	1,214 $\pm 0,0022$	1,353 $\pm 0,004$	1,257 $\pm 0,005$
$t_d(\text{días})$	3,1404 $\pm 0,005$	2,9807 $\pm 0,012$	1,8512 $\pm 0,004$	2,3313 $\pm 0,005$

*Tratamiento control (fluorescente + medio de cultivo zarrouk), T1 (panel solar + medio de cultivo zarrouk), T2 (panel solar + medio de cultivo agua residual hidropónica) y T3 (fluorescente + medio de cultivo de agua residual hidropónica).

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 26

Análisis de prueba de normalidad de Shapiro-Wilk a las tasas crecimiento, capacidad de carga y tiempo de duplicación

Prueba Normalidad						
	Kolmogorow-Smimov			Shapiro-wilk		
	Estadístico	gl	Sig	Estadístico	gl	Sig
Tasas	0,164	12	0,200	0,915	12	0,245
<i>K</i>	0,273	12	0,0014	0,781	12	0,09
<i>t_d</i>	0,2336	12	0,064	0,859	12	0,065

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 27

Análisis de la homogeneidad de varianza de Levene a la tasa crecimiento, capacidad de carga y tiempo de duplicación

Prueba de Homogeneidad de Varianzas				
	Estadístico de Levene	gl	gl2	Sig.
Tasa crecimiento (μ)	,872	3	8	,495
Capacidad carga(<i>k</i>)	1,697	3	8	,244
Tiempo duplicación (<i>t_d</i>)	1,251	3	8	,354

Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 26, se observan los valores de las pruebas de normalidad de Shapiro-Wilk y en la Tabla 27 muestra la prueba de homogeneidad de varianza de Levene de la tasa de crecimiento (μ), capacidad de carga (k) y tiempo de duplicación (td). Para la prueba de normalidad todos los valores analizados dieron como resultado un valor de $p > 0,005$ concluyéndose que se trata de valores normales.

El valor de Levene tuvo un valor de $p > 0,005$ y esto corresponde a datos homogéneos, siendo condiciones necesarias para realizar los análisis de varianzas (ANOVA).

Tabla 28

Análisis de varianza de los parámetros de crecimiento

ANOVA						
		Suma de cuadrad os	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Tasas	Entre grupos	0,034	3	0,011	44258	0,00
	Dentro de grupos	0,002	8	0,000		
	Total	0,036	11			
K	Entre grupos	0,031	3	0,010	11312	0,03
	Dentro de grupos	0,007	8	0,001		
	Total	0,038	11			
ta	Entre grupos	2,789	3	0,930	127495	0,00
	Dentro de grupos	0,058	8	0,007		
	Total	2,847	11			

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 28, muestra el análisis de la varianza de las tasas de crecimiento (μ) y los tratamientos (control, T1, T2 y T3), los cuales mostraron diferencias significativas ($p=0,000$) entre

ellas. Se realizó el análisis de Tukey para verificar si existieron diferencias significativas entre los promedios de las tasas de crecimiento analizadas. Se mostró que el T2 presentó una mayor significancia ($p=0,000$) respecto a los demás tratamientos como se detallan en el Apéndice 8.

El análisis de la varianza de la capacidad de carga (k) y los tratamientos (control, T1, T2 y T3), mostraron diferencias significativas entre ellas ($p=0,003$). Se realizó el análisis de Tukey para verificar si existieron diferencias significativas entre los promedios de las capacidades de carga analizadas. Los promedio de la capacidad de carga del T2 una mayor significancia ($p=0,000$), mientras que los demás tratamientos mostraron una capacidad de carga (k) con una significancia de $p > 0,000$ durante el experimento (ver Apéndice 8).

El análisis de la varianza del tiempo de duplicación (td) y los tratamientos (control, T1, T2 y T3), mostraron diferencias significativas ($p=0,000$) entre ellas. Se realizó el análisis de Tukey para verificar si existieron diferencias significativas entre los promedios del tiempo de duplicación analizada. Se mostró que el T1, T2 y T3 mostraron bajos valores de tiempo de duplicación y alta significancia ($p < 0,005$), mientras que el tratamiento control presentó un valor alto de duplicación y una significancia de ($p > 0,005$) respecto a los demás tratamientos (ver Apéndice 8).

Tabla 29

Prueba de Tukey para cada tratamiento

Tasas				
HSD Tukey ^a				
Tratamiento	N	1	2	3
Control	3	0,210		
Tratamiento 1	3	0,233		
		3		
Tratamiento 3	3		0,280	
			0	
Tratamiento 2	3			0,350
				0
Sig		0,349	1,000	1,000

se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos
a: Utiliza el tamaño de la muestra de la media
armónica=3,000

Fuente: Elaboración propia.

Se realizó el análisis de varianza a las tasas de crecimiento (μ) para evaluar la eficacia de los tratamientos con respecto al control. Se obtuvieron diferencias significativas ($p=0,000$) (ver Tabla 28) entre las tasas de crecimiento de los tratamientos, por lo que se realizó la prueba de Tukey la cual mostró una alta diferencia significativa para la tasa de crecimiento del T2 ($p=0,000$) con respecto a los demás tratamientos y el control (ver Apéndice 8).

Se realizó Prueba de Tukey (ver Tabla 29) la cual mostró valores de diferencias significativas entre los tratamientos y el control.

3.1.7. Resultados de los análisis de costos de producción

Los cálculos para obtener costos de producción fueron realizados considerando dos variables como: consumo de energía diario, costo de reactivos para la preparación de los medios de cultivo. Cada tratamiento tuvo condiciones distintas, para determinar el costo de producción (ver Tabla 30).

Tabla 30

Costos de producción por litro de Arthrospira platensis

Control	FZarrouk			Agua residual hidropónica			
	S/.	T1	S/.	T2	S/.	T3	S/.
Energía fluorescente						Energía fluorescente	
36W Watts*hora*día*1000	8,80	Energía solar	-	Energía solar	-	36W Watts*hora*día*1000	8,80
36W*24h*30d*0,34/1000		Reactivos zarrouk	176,00	agua residual hidropónica	-	36W*24h*30d*0,34/1000	
Reactivos Zarrouk	176,00			pasajes	10,00	pasajes	10,00
Costos de producción 9L medio de cultivo	184,8	Costos de producción 9L medio de cultivo	176,00	Costos de producción 9L medio de cultivo	10,00	Costos de producción 9L medio de cultivo	18,80
Costos de producción 1L medio de cultivo	20,53	Costos de producción 1L medio de cultivo	19,56	Costos de producción 1L medio de cultivo	1,11	Costos de producción 1L medio de cultivo	2,09

Fuente: Elaboración propia.

De modo que el tratamiento control, se llegó a gastar un aproximado de S/.184,80 para la producción de los 9 L de medio de cultivo zarrouk que se necesitó para el cargado de los fotobiorreactores, que al calcular cuánto fue el gasto por litro se procedió a dividir, dicho gasto entre 9L, obteniendo S/.20,53 que fue el costo de producción del medio de cultivo zarrouk, para 1 L del mismo.

Para el tratamiento T1, no existió gasto de energía, porque se empleó el panel solar, sin embargo, se realizó gastos en el compra de reactivos para la producción de los 9 L medio de cultivo zarrouk que ascendió a S/.176,00 que dividirlo entre 9, se obtuvo un costo de producción por litro de zarrouk de S/.19,56.

En el tratamiento T2, no se realizaron tantos gastos, debido a que la energía provino del panel solar. Además, el medio de cultivo fue el agua residual hidropónico que no significó costo alguno, pues lo obtuvimos del Centro de Investigación biológica (CIB), que para el traslado del distrito de Ancón hacia Los Olivos, sólo se gastó en transporte S/.10,00 que al dividirlo entre 9, que fueron los litros de medio de cultivo, ascendió a S/.1,11 el costo de producción por litro del medio de agua residual hidropónica. Es notoria la diferencia en costos con respecto a los tratamientos anteriormente mencionados.

Finalmente, en el tratamiento T3 se gastó en consumo energético y transporte un aproximado de S/. 18,80 para los 9 L de medio de cultivo residual hidropónico, que al ser dividido entre 9, se obtuvo un costo aproximado de S/. 2,09 la producción por litro del medio de agua residual hidropónico.

Tabla 31

Costo de producción de proteína de Arthrospira platensis por cada nuevo sol para los tratamientos

Costo de producción de proteína de Arthrospira platensis por cada nuevo sol(mg.L⁻¹)

Tratamientos	P1	CLMC	TO	PP	Ciclo	Cos.	P2	P3	PPCS
Control (fluorescente + medio de cultivo zarrouk)	46	20,53	21	1	1,2	1220	1464	677	32,98
T1 (panel solar + medio de cultivo zarrouk)	53	19,55	22	1	1,2	1214	1457	765	39,12
T2 (panel solar + ARH)	36	1,11	21	1	1,2	1353	1624	589	530,23
T3 (fluorescente +A.R.H)	28	2,08	22	1	1,2	1257	1508	424	240,0

Fuente: Elaboración propia.

*ARH: agua residual hidropónica, *P1(%): producción de proteína, CLMC(S/.): costo por litro de medio de cultivo, TO(días): tiempo óptimo, PP(días): tiempo de puesta para cargado de fotobiorreactores, Ciclos(días): número de cosecha por 30 días, Cos(mg.L⁻¹): Cosecha de máxima producción, P2(mg.L⁻¹): producción de

biomasa, P3(mg.L⁻¹) : producción de proteína y PPCS(mg/S/.): proteína producida por cada sol.

Con la información anterior, se realizaron cálculos para determinar el costo de producción de la proteína *Arthrospira* por cada nuevo sol gastado.

Por cada nuevo sol invertido en la producción de *Arthrospira platensis*, se obtuvo 677 mg de proteína para el tratamiento control, mientras que para los tratamientos T1, T2 y T3 se obtuvieron: 765, 589 y 424 mg de proteína respectivamente.

Para dicha valoración se consideraron variables como: el costo por litro del medio de cultivo, el tiempo óptimo de cosecha, producción de la biomasa y el porcentaje de proteína de *A. platensis*.

El tiempo óptimo, se consideró como la duración que tuvo la producción óptima de biomasa, al ser ejecutado el proyecto.

Finalmente, la proteína, tuvo como referencia el análisis llevado a cabo de la biomasa final de *A. platensis* en el laboratorio de suelos, plantas, aguas y fertilizantes de la Universidad Agraria La Molina.

3.2. DISCUSIÓN

En esta investigación el valor del pH con respecto al tiempo, en todos los tratamientos realizados se incrementó, de igual manera hubo un aumento de la biomasa de *Arthrospira platensis* existiendo una correlación directamente proporcional entre estas dos variables anteriormente mencionadas ($P=0,915$). En la investigación el intervalo registrado del pH se encontró dentro del rango óptimo ($8,71 \pm 0,015$ y $10,85 \pm 0,13$), siendo congruente con el estudio Zarrouk (1966), en donde la *A. platensis* crece a condiciones alcalinas con un pH que inicia aproximadamente en 8,3 y conforme se incrementa la biomasa alcanza un pH de aproximadamente 11,0. Similares resultados del incremento del pH en cultivo de *A. platensis* fueron encontrados por Rodríguez y Triana (2006) en medio de cultivo zarrouk, sometido a una condición lumínica de 3000 lux. El incremento del pH en el medio de cultivo es debido al tipo de metabolismo fotosintético que tiene la cianobacteria. Se cree que la *A. platensis* libera grupo OH^- al medio alcalinizándolo a lo largo del crecimiento, esta alcalinidad protege al cultivo de contaminación por otros microorganismos y en especial de otras microalgas (Berry, Bolychevtseva, Rogner y Karapetyan 2003).

Según González, Parra y Cifuentes (1995), la temperatura del cultivo tiene una influencia directa sobre el crecimiento de *A. platensis*, por lo que refiere que esta cianobacteria no inicia su crecimiento exponencial cuando se encuentra en condiciones de temperatura por debajo de los 20 °C. La máxima velocidad de crecimiento se alcanza entre los 30 °C - 35°C, mientras que cuando se supera éste rango existe un riesgo de destrucción rápida de la cianobacteria. En general los cambios bruscos de temperatura traen como consecuencia la reducción en la producción de biomasa. En la presente investigación la fase exponencial del crecimiento de *A. platensis* se evidenció entre los valores mínimo de $22^\circ\text{C} \pm 4,5^\circ\text{C}$ y máximo de $30^\circ\text{C} \pm 3,6^\circ\text{C}$, siendo las temperaturas entre 27°C - 30°C donde se registró el mayor aumento de la biomasa de *A. platensis* para el tratamiento T2 (panel solar + medio de cultivo agua residual hidropónica). Similares resultados en la evaluación de la temperatura fue reportado por Zarrouk (1966), quien comunicó que la temperatura óptima de crecimiento de *A. platensis* estuvo dada dentro del rango de 30°C - 35 °C, en medio de cultivo diseñado por el autor para el

crecimiento de ésta cianobacteria. Posteriormente Oliveira et al. (2013) también generó el aumento de la biomasa de *A. platensis* manteniendo controlada la temperatura a 30°C en medio zarrouk, logrando optimizar la producción de la biomasa a ésta temperatura. Recientemente Sánchez (2014) reportó resultados de temperatura similares a esta investigación con valores que oscilan entre 25-28 °C para la producción de biomasa de *A. platensis* en medio zarrouk.

Uno de los factores que influye en la producción de biomasa de *A. platensis* es la luminosidad, debido a que esta especie es un organismo fotosintético (Zarrouk, 1966). Los resultados obtenidos en esta investigación de luminosidad aplicada al cultivo de *A. platensis* en los fotobiorreactores, muestran un valor de $7000,0 \pm 0,01$ lux para el tratamiento T3 emitido por las tiras led y un valor de $4680,3 \pm 74,2$ lux, para el tratamiento T2 que fue iluminado por la lámpara fluorescente. Estos resultados son similares a los obtenidos por Radmann, Reinehr y Costa (2007), quienes en su investigación emplearon lámparas fluorescentes manteniendo la *A. platensis* iluminada durante un fotoperiodo de 12 horas luz, con una intensidad de 3000 lux. Por otro lado, la producción de biomasa fue de $1,353 \pm 0,004$, siendo congruente con lo obtenido por Pelizer et al. (2003) y Quintero et al. (2016) quienes también evaluaron la producción de biomasa de *A. platensis*, empleando tiras Led. Ambos autores alcanzaron valores cercanos a los 3500 lux de emisión en fotoperiodos de 12 horas luz, empleando lámparas fluorescentes.

En esta investigación la intensidad luminosa aplicada a los tratamientos anteriormente mencionados, estuvieron dentro de los rangos mencionados por Vonshak (1996) y Gitelson, Qiuang y Richmonds (1996) con una intensidad luminosa que oscila entre 3000- 7000 lux, siendo un rango de valor óptimo para el desarrollo de *A. platensis*. Por otro lado Vasquez et al. (2014) realizaron una investigación donde evaluaron la influencia de la intensidad luminosa en la producción de *A. platensis*, empleando tiras Led en un diseño central rotacional logrando emitir 2700 lux por fotoperiodo de 12 horas luz, llegando a aproximarse a los valores obtenidos en la presente investigación.

En cuanto a la tasa de crecimiento (μ) de *Arthrospira platensis* para el tratamiento T2 (panel solar + medio de cultivo agua residual hidropónica) presentó un valor promedio de $0,3744 \pm 0,005$ días⁻¹; estos resultados son comparables con los resultados de Vasquez-Villalobos et al.(2014), quienes reportan que la producción de biomasa de *A.platensis*, influenciados por la aplicación de la luz led con una emisión de 3000 lux + medio de cultivo Zarrouk, tuvo una tasa de crecimiento de $0,40$ días⁻¹, mientras que Sánchez (2014), obtuvo como resultado de su investigación que a una concentración de $0,5$ ml.L⁻¹ de Fast Biol T20 se alcanzó una mayor tasa de crecimiento de *A. platensis* con un valor de la tasa de crecimiento de $0,153$ d⁻¹, empleando energía eléctrica, siendo el menor valor de tasa de crecimiento que reporta de $0,093$ d⁻¹ en agua destilada combinada con bicarbonato de sodio. También en el estudio de Madkour, Wahab y Shafik (2012), obtuvieron una tasa de crecimiento de *A. platensis* con un valor de $0,321$ días⁻¹ empleando energía eléctrica + medio de cultivo Zarrouk, siendo muy cercano al valor del T3 (fluorescente + medio de cultivo de agua residual hidropónica) de $0,324$ d⁻¹. Por otro lado, Andrade y Costa (2007) cultivaron *Arthrospira platensis* en un medio de cultivo suplementada con melaza de caña en una concentración de $0,5$ mgL⁻¹ y empleando energía eléctrica; en este estudio se obtuvo una tasa de crecimiento de $0,062$ d⁻¹, que es menor a las tasas obtenidas en esta investigación para los tratamientos: control, T1, T2 y T3. Por tanto, con respecto a la tasa de crecimiento, se resalta la importancia de la presente investigación al reportar valores óptimos en comparación a lo obtenido por los autores citados.

Con respecto a la capacidad de carga el tratamiento T2 (panel solar + medio de cultivo agua residual hidropónica), es el que presenta el mayor valor ($1,353 \pm 0,004$ mg.L⁻¹), con respecto a los demás tratamientos donde de utilizó el medio de cultivo zarrouk, por lo que éste medio de cultivo considerado óptimo para el cultivo de *Arthrospira platensis* puede ser reemplazado por el agua residual hidropónica generando un crecimiento de esta cianobacteria. Similares resultados fueron mostrados por Vasquez et al. (2014)

quienes obtuvieron como resultados que la producción máxima de *A. platensis* fue con una concentración de 0,813 mgL⁻¹.

Con los costos de producción, por cada nuevo sol invertido en el tratamiento T2, empleando agua residual hidropónica y panel solar como fuente de energía; se obtuvo 530,2 mg de proteína producida obtenida de la biomasa de *A. platensis*. En contraste en el estudio de Sánchez (2014), se obtuvo 225,14 mg para el tratamiento T20 (Fast Biol), lo que demuestra que en el presente estudio la producción de proteína es mayor y a bajo costo. Así mismo el costo para la producción por litro de medio de cultivo de agua residual hidropónica fue de S/. 1,11, mientras que en el estudio de Sánchez (2014) el costo de producción por litro de medio de cultivo Zarrouk, indica que el tratamiento T20 (Fast Biol) fue de S/. 2,23, por lo que la producción con agua residual hidropónica resultó ser más económica.

Finalmente, el porcentaje más alto de proteína obtenida en esta investigación fue de 46,25 por ciento (=74000 mg.L⁻¹) para el tratamiento T1 (panel solar + medio de cultivo zarrouk); mientras que Sánchez (2014) logró alcanzar un porcentaje de proteína de 34,94 por ciento para el tratamiento T2 (suplementado con NaNO₃ y NaHCO₃ y basado en Fast Biol) para la producción de *Arthrospira platensis*. Entre tanto, López (2009), utilizando urea obtuvo en su investigación un porcentaje de proteína de 45 por ciento para el cultivo de *Arthrospira platensis*. Los resultados obtenidos muestran que, en comparación a los trabajos citados, el medio de cultivo (panel solar + medio de cultivo zarrouk), fue óptimo en la producción de proteína, esto debido al elevado porcentaje de minerales que presenta el medio de cultivo Zarrouk y también la influencia de la intensidad luminosa que mostró el panel solar, a través de las tiras led.

CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES

- El diseño del fotobiorreactor diseñado con mangas de polietileno, implementando iluminación mediante un sistema fotovoltaico de iluminación Led (Diodo Emisor de Luz) y haciendo empleo del medio de cultivo de agua residual hidropónica, resultó ser beneficioso; abarató costos de producción y se obtuvo una alta producción de biomasa de *Arthrospira platensis*.
- El rendimiento de la biomasa obtenida en 1,2 ciclos de cosecha cuando se cultivó con el tratamiento T2 (panel solar + medio de cultivo agua residual hidropónica) dio como resultado de producción de 530,2 mg de proteína de *Arthrospira platensis* por cada nuevo sol invertido.
- Los parámetros de crecimiento algal, en el tratamiento T2 (panel solar + medio de cultivo agua residual hidropónica) fueron los óptimos durante la producción *Arthrospira platensis*, con una tasa de crecimiento, $\mu=0,3744 \pm 0,005$, capacidad de carga $k=1,353 \pm 0,004 \text{ mg.L}^{-1}$ y tiempo de duplicación $t_d=1,85 \pm 0,004$ días. En el tratamiento T2 (panel solar + medio de cultivo agua residual hidropónica) la producción de la biomasa mostró un menor costo de producción por litro de medio de cultivo(S/.1,11).
- En el tratamiento Control (fluorescente + zarrouk) presentó un mayor costo de producción por litro de medio de cultivo (S/.20,53).

CAPÍTULO V: RECOMENDACIONES

- Se debe considerar las condiciones climáticas para la obtención de biomasa de *Arthrospira platensis* ya que son favorables para el crecimiento de la especie para poder lograr producciones a bajo costo.
- La obtención de biomasa de *Arthrospira platensis* debe llevarse a cabo en épocas donde las condiciones climáticas son favorables para el crecimiento de la especie para poder lograr producciones a bajo costo.
- Se debe buscar otras opciones en materiales para el diseño de fotobiorreactores que reúnan características óptimas para la producción de esta especie logrando abaratar costos.
- Se debe buscar otros efluentes como alternativas de medio de cultivo, para la producción de biomasa de *A. platensis*, que puedan lograr una producción similar a las obtenidas en esta investigación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andrade, G. A., Pagano, D. J., Guzmán, J. L. & Berenguel, M. (2014). Optimización de la producción de biomasa en fotobiorreactores tubulares. Proceedings of the 35th Jornadas de Automática, Valencia, Spain, 513-519.
- Andrade, M. & Costa, A. (2007). Mixotrophic cultivation of microalga *Spirulina platensis* using molasses as organic substrate. *Revista Aquaculture*, 264 (6) pp.130-34.
- Antenna Technology (2005). *Spirulina: Some scientific foundations*.www.antenna.com.
- Arenas, S. & Zapata, C. (2011). *Libro interactivo sobre energía solar y sus aplicaciones*. Colombia: Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Tecnologías. Tecnología Eléctrica.
- Asimov, I. (1980). Fotosíntesis. Plaza Janes Editores. Barcelona (España). pp.264.
- Barrera, M. F. (2010). *Energía Solar: electricidad fotovoltaica*. Editorial Liber Factory.
- Becerra-Celis, G., Tebbani, S., Dumur, D., & Isambert, A. (2008). Nonlinear predictive control for continuous microalgae cultivation process in a photobioreactor, 10th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision - ICARCV. Hanoi, Vietnam.
- Becker, E. & Venkataram, L. (1982). *Biotechnology and exploitation of algae the Indian Approach*. GTZ. Agency for Technical Cooperation.
- Belay, A. & Ota, Y. (1994). Production of high quality *Spirulina* at earthrise farms. In: Phang, S.M., Borowitzka, M.A., Whitton, B. (Eds.), *Algal Biotechnology in the Asia-Pacific region*. University of Malaya, Kuala Lumpur.
- Berry, S., Bolychevtseva, S., Rogner, M. & Karapetyan, N.V (2003). Photosynthetic and respiratory electron transport in the alkaliphilic cyanobacterium *Arthrospira (Spirulina) platensis*. *Photosy.Res.*78: 68-76.
- Bo-tang, W., Wen-zhou, X. & Cheng-kui, Z. (1998). *Spirulina Cultivation in China*. *Revista Journal Chinese of Oceanology and Limnology* 16(Suppl 1), pp. 152–157. Recuperado de <https://doi.org/10.1007/BF02849094>

- Cañizares, R., Contreras, C., Peña, J. & Flores, L. (2003). Avances en el diseño conceptual de fotobiorreactores para el cultivo de microalga. *Revista Interciencia* 28(8), pp.450-456.
- Castellano, R. N. (2010). *Solar panel processing*. Paris: Ed. des Archives contemporaines.
- Castenholz, R. & Waterbury, J. (1989). Oxygen photosynthetic bacteria. Section 19. *Manual of systematic Bacteriology* (3), USA. pp 1710-1806.
- Ciferri, O. (1983). *Spirulina*, the edible microorganism. *Revista Microbil* (47), pp.551-578.
- Diewald, W. (2004). Nuevas posibilidades de iluminación con LED. *Técnica Industrial. Especial Electricidad y Electrónica*, 42-44.
- Fernandes, B., Mota, A., Teixeira, J. & Vicente, A. (2015). Continuous Cultivation of photosynthetic mos: Approaches, applications and future trends. *Biotechnology Advances*. Portugal.
- Gitelson, A., Qiuang, H. & Richmonds, A. (1996). Photic volume in photobioreactors supporting ultrahigh population densities of the photoautotroph *Spirulina platensis*. *Appl Envir Microb.*, 62 (2): 1570-73.
- Faucher, O., Coupal, B. & Leduy, A. (1979). Utilization of seawater-urea as a culture medium for *Spirulina maxima*. *Can. J. Microbiol.* 25: 752-759.
- González, M., Parra, O. & Cifuentes, A. (1995). Técnicas de cultivo de microalgas en laboratorio. Métodos ficológicos. Chile: Universidad de Concepción, Concepción.
- Guiry, M. D. & Guiry, G.M. (2018). *AlgaeBase*. World-wide electronic publication. National University of Ireland, Galway. Recuperado de <http://www.algaebase.org>
- Huarachi, R., Yapo, U., Dueñas, A., Soto, J. & González, R. (2013). Producción de *Spirulina (Arthrospira platensis)* (cyanophyta) en fotobiorreactor tubular cónico bajo condiciones de laboratorio. *The Biologist* 11(2). Universidad Nacional de San Agustín (UNSA), Arequipa, Perú.
- Huarachi, R., Yapo-Parí, U., Dueñas, A., González, R., Condori, J. & Soto, J. (2015). Adaptabilidad de *Spirulina (Arthrospira) Arthrospira platensis* (Cyanophyta) en fotobiorreactor tubular cónico bajo condiciones ambientales. *IDESIA (Chile)* 33(1). pp.103-112.
- Labarta, J. (2012). Instalaciones solares fotovoltaicas. EDITORIAL DONOSTIARRA SA.

- López, E. F. C. (2012). Control de velocidad de un motor de cd a través de un arreglo en cascada SEPIC-Puente completo alimentado con un panel solar.
- López, R., Rojas, Barajas, A. & Kafarov, V. (2009). Producción de biocombustibles de tercera generación: Diseño de fotobiorreactores a escala de laboratorio para la producción de microalgas. Corporation, the Petroleum Colombian Institute ICP – ECOPEPETROL, the Santander Industrial University and the Iberoamerican Science and Technology Program for Development – CYTED. Memorias del IV simposio de Química Aplicada. SIQUIA. Universidad de Quindío Armenia Colombia. 355-359.
- Madkour, F., Wahab, A. & Shafik, N. (2012). Production and nutritive value of *Spirulina platensis* in reduce cost media. *Revista Egyptian journal of aquatic* 38(1), pp. 51-57
Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.ejar.2012.09.003>.
- Materassi, R., Tredici, M. & Balloni, W. (1984). *Spirulina* culture in seawater. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 19: 384-486.
- Méndez, J., & Cuervo, R. (2008). Energía Solar Fotovoltaica. 2º Edición. ECA. Instituto de Tecnología e Información, España.
- Menéndez, J. (2013). Iluminación led en edificios inteligentes. Libro de comunicaciones, pp.202.
- Mezzomo, N., Galon, A., Siebert, R., Oliveira, P., Lago, M., Hemkemeier, M., Vieira, J., Bertolin & Colla, L. (2010). El cultivo de microalgas *Spirulina (Arthrospira platensis)* procedentes del tratamiento biológico de las aguas residuales porcina. *Revista Ciencia y Tecnología de Alimento*, 30(1).
- Molina, E. & Fernández, F. (1999). Tubular Photobioreacto design for algal cultures. *Journal of biotechnology*.92:113-131.
- Morist, A., Montesinos, J. & Cusido, J. (2001). Recovery and treatment of *Spirulina (Arthrospira platensis)* cells cultured in a continuous photobioreactor to be used as food. *Revista Process Biochemistry* 37 (2001), pp. 535–547. Barcelona, Spain.
- Muliterno, A., Correa, P., Vieira, J., Hemkemeier, M., Bertolin, T. & Colla, L. (2005). Cultivo mixotrófico da microalga *Spirulina platensis* embatelada alimentada. *Revista CiêncAgrotec*, 29 (6), pp. 1132-1138.

- Oliveira, I., de Oliveira, R. Arruda, M. Maresca, R., Oliveria, A. & Oliveria, R. (2013). *Spirulina platensis*: otimização de processo para a obtenção de biomassa. *Revista Ciência e Tecnologia de Alimentos Campinas*, 33(1), pp. 179-183. Recuperado de <http://www.scielo.br/pdf/cta/v33s1/v33s1a26.pdf>.
- Pelizer, L., Dalva, E., Rangel, C., Sassano, C., Carvalho, J., Sato, S. & Moraes, I. (2003). Influence of inoculum age and concentration in *Spirulina platensis* cultivation. *Revista Journal of Food Engineering* 56 (1), pp. 371–375. Recuperado de [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(02\)00209-1](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(02)00209-1).
- Quintero, E., Arredondo, B., Flores, E., Virgen, M., Barrera, E., Carballo, M. & Maldonado, A. (2016). *Revista Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 1 (2016), pp. 532-537. Recuperado de <http://www.fcb.uanl.mx/IDCyTA/files/volume1/1/4/91.pdf>.
- Radmann, E., Reinehr, C. & Costa, J. (2007). Optimization of the repeated batch cultivation of microalga *Spirulina platensis* in open raceway ponds. *Revista Aquaculture*, 265 (1-4): 118-126.
- Ravelonandro, P., Dominique, H., Ratianarivo, Arsene, I. & Raherimandimby, M. (2008). Influence of light quality and intensity in the cultivation of *Spirulina* (*Arthrospira platensis*) from Toliara (Madagascar) in a closed system. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*. 83(1), pp. 842–848.
- Rodriguez, A. & Triana, F., (2006). *Evaluación del pH en el cultivo de Spirulina sp (=Arthrospira) bajo condiciones de laboratorio* (Trabajo de Grado). Pontificie Universidad Javeriana.
- Sánchez, H. (2014). *Cultivo de spirulina platensis (gomont) geitler en fast biol T20 para la obtención de biomasa como fuente alternativa de proteína*. (Tesis de maestría). Universidad Nacional Mayor de San Marcos
- Sánchez, M., Bernal, J., Rozo, C. & Rodríguez, I. (2003/a) *Spirulina* (*Arthrospira*): An edible microorganism: A review. *Universitas Scientiarum*.8 (1), pp.11-12.
- SCOR-UNESCO. (1980). Determination of chlorophyll in seawater. UNESCO technical papers in marine science.
- Seijas, P. (2012). *Biosecuestro de dióxido de carbono, procedente de gases de combustión, por Arthrospira jenneri “espirulina” y su influencia en la producción de biomasa*

- microalgal en fotobiorreactor solar*. (Tesis doctoral). Universidad Nacional de Trujillo, Perú.
- Spiller, S., Denbeaux, G. & Jones, G. (2001). Fine structure of cyanobacteria, *spirulina platensis* and *spirulina subsalsa*, as viewed by x-ray microscope, XM-1 beamline 6.1.2. Department of biology, Mills College, Oakland, U.S.
- Stizenberger, E. (1852). *Spirulina* und *Arthrospira* (nov. gen.). *Hedwigia*, 1, 32-34.
- Tomaselli, L. (1997). Morphology, Ultrastructure and Taxonomy of *Arthrospira* (*Spirulina*) *máxima* and *Arthrospira* (*Spirulina*) *platensis*. En *Spirulina platensis* (*Arthrospira*): physiology, cell biology and biotechnology. Taylor & Francis. Londres, pp. 1-15.
- Turpin, P. (1829). *Spirulina* oscillarioide Dictionnaire. *Revisa Sciences Naturelles* 50(1) pp. 309-310. Paris.
- Tredici, M.; Papuzzo, T. & Tomaselli, L. (1986). Outdoor mass culture of *Spirulina maxima* in sea-water. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 24: 47-50.
- Vasquez-Villalobos, V., Vergaray, D., Suarez, S., Zamora A., Gaspar, K. y Escurra, X. (2014). Influencia de la proporción agua de mar y bicarbonato en la producción de biomasa de *Spirulina* sp. con iluminación de diodo emisor de luz. *Revista: Scientia agropecuaria* 5 (1) pp. 199 – 209. Recuperado de www.sci-agropecu.unitru.edu.pe.
- Vonshak A. y Tomaselli, L. (2000). *Arthrospira* (*Spirulina*): Systematics and Ecophysiology. En *The Ecology of Cyanobacteria*. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, Holanda. pp. 505-522.
- Vonshak, A. (1996). *Spirulina platensis* (*Arthrospira*). Physiology, cell biology and biotechnology. Israel: Taylor & Francis. Recuperado de https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-011-1566-7_21.
- Zarrouk, C. (1966). Contribution to the study of a Cyanophyceae influence of various physical and chemical factors on growth and phototsynthesis *Spirulina maxima*. Setch. In addition, Gardner, Geithner (Ph.D. Thesis), University of Paris.

TERMINOLOGÍA

Los términos considerados a continuación se han seleccionado de los libros “*Instalaciones Solares Fotovoltaicas*”, “*Libro Interactivo Sobre Energía Solar y sus Aplicaciones*” y “*Solar Panel Processing*” perteneciente a los autores Labarta (2012), Arenas y Zapata (2011) y Castellano (2010) respectivamente.

Efecto invernadero: Es el efecto por el cual parte de la radiación solar reflejada por la Tierra se queda retenida en la atmósfera. Este fenómeno se debe a la acumulación de gases, como dióxido de carbono, metano o el vapor de agua, que absorben la radiación. Su consecuencia inmediata es el aumento progresivo de la temperatura de la superficie terrestre y el consiguiente cambio climático.

Irradiación: Es la energía solar proyectada por unidad de superficie a lo largo de un tiempo determinado. Las cifras suelen referirse a un día, y se miden en $\text{Wh}\cdot\text{m}^{-2}$.

Irradiancia: Es la potencia solar proyectada por unidad de superficie, su unidad de medida es $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$.

Radiación difusa: Es la radiación obtenida durante un día nublado, procedente de la dispersión atmosférica de la radiación solar.

Radiación directa: Es la radiación directa que procede directamente del sol en un día despejado.

Solsticio: Son los momentos del año en los que el sol alcanza su mayor o menor altura aparente en el cielo y la duración del día o la noche son las máximas en el año, respectivamente.

Célula fotovoltaica: Es el componente fotovoltaico elemental, formado por dos capas de semiconductores con dopados distintos. Al incidir la luz solar sobre ella, se genera en sus terminales, una tensión continua.

Módulo fotovoltaico: su función es captar y convertir la radiación solar en corriente eléctrica. Estos dispositivos se pueden conectar en serie o en paralelo. Cuando se conectan

en serie el voltaje total será la suma de los voltajes individuales de cada uno de los dispositivos. La corriente de salida será igual a la corriente de un módulo.

Regulador de carga: Es el dispositivo que vigila los adecuados ciclos de carga y descarga de los acumuladores de una instalación aislada. De este modo, protege los acumuladores y busca el punto de máxima potencia de la instalación del módulo.

Inversor: Se encarga de adaptar la corriente continua producida por el generador fotovoltaico a las características eléctricas requeridas por las cargas a alimentar. A continuación, en la figura 8 se pueden ver dos modelos de inversores.

Energía renovable: Es aquella energía cuya fuente original se considera inagotable, por su enorme capacidad energética, como es el caso de la energía solar o que procede de una fuente que puede regenerarse de un modo natural en tiempos similares a los del consumo, como es la energía de la biomasa.

Celda solar o celda fotovoltaica: Es un dispositivo que convierte la luz en corriente continua utilizando el efecto fotoeléctrico. También son conocidas como células, celdas o módulos fotovoltaicos.

Generación fotovoltaica: Se denomina energía solar fotovoltaica a una forma de obtención de energía eléctrica a través de paneles fotovoltaicos. Los paneles, módulos o colectores fotovoltaicos están formados por dispositivos semiconductores tipo diodo que, al recibir radiación solar, se excitan y provocan saltos electrónicos, generando una pequeña diferencia de potencial en sus extremos

Elementos de protección del circuito: son elementos como diodos de bloqueo, interruptores para desconexión, tierra, etc., dispuestos entre diferentes parte del sistema, para proteger la descarga y derivación de elementos en caso de falla o situaciones de sobrecarga.

Microalga: Microorganismos unicelulares que tienen la capacidad de realizar la fotosíntesis, capaz de generar biomasa orgánica a partir de CO₂ y luz, usando al agua como dador de electrones, oxidándola a O₂.

Fototrófico: Organismos que utilizan la luz solar como fuente principal de energía, capaz de sintetizar macromoléculas, a partir de intermediarios sencillos, empleando la energía luminosa.

Biomasa algal: Cantidad total microalga presentes en un medio.

Biomitigación: conjunto de procedimientos a través de los cuales se busca bajar a niveles no tóxicos y/o aislar sustancias contaminantes del ambiente

APÉNDICES

APÉNDICE 1

VALORES PROMEDIO DE PESO SECO DE *A. platensis* PARA EL MEJOR TRATAMIENTO T2

Tramitancia (%)	Absorbancia (670 nm)	Peso papel vacío(g)	Peso papel+ <i>A. platensis</i> (g)	Peso seco <i>A. platensis</i> (g)	Promedio peso seco(g)/25 ml <i>A. platensis</i>
1,82	1.82	3,585	5,375	1,79	1,78
		3,586	5,366	1,78	
		3,583	5,353	1,77	
20	0,69	3,574	4,454	0,88	0,87
		3,575	4,433	0,86	
		3,573	4,453	0,88	
40	0,39	3,575	3,643	0,68	0,65
		3,573	3,638	0,65	
		3,568	3,631	0,630	
60	0,22	3,669	3,705	0,36	0,38
		3,667	3,701	0,34	
		3,662	3,706	0,44	
80	0,09	3,682	3,820	0,138	0,14
		3,685	3,814	0,129	
		3,682	3,822	0,14	

APÉNDICE 2

VALORES PROMEDIO DE PESO SECO DE *A. platensis* PARA EL MEJOR TRATAMIENTO (T2) PARA ELABORAR CURVA PATRÓN

Absorbancia Vs. Peso seco	
X	Y
Absorbancia (670 nm)	Promedio peso seco(g)/25 ml de <i>A. platensis</i>
1,82	1,78
0,69	0,87
0,39	0,65
0,22	0,38
0,009	0,14

APÉNDICE 3

VALORES PROMEDIO DE PESO SECO DE *A. platensis* EN LOS DIFERENTES TRATAMIENTOS

Tratamientos	Día con		Promedio de peso seco(g)			
	mayor peso	seco				
Control	21/06/2017	0,478	0,45	0,453	0,460	0,462
	22/06/2017	0,481	0,453	0,456	0,463	
T1	21/06/2017	0,39	0,397	0,408	0,398	0,397
	22/06/2017	0,389	0,389	0,407	0,395	
T2	21/06/2017	0,639	0,556	0,52	0,572	0,569
	22/06/2017	0,63	0,551	0,518	0,566	
T3	21/06/2017	0,468	0,464	0,466	0,466	0,464
	22/06/2017	0,463	0,46	0,464	0,462	

APÉNDICE 4

VALORES DE LOS PARÁMETROS DE CRECIMIENTO DE *A. platensis* EN LOS DIFERENTES TRATAMIENTOS

Parámetro de crecimiento	Control (fluorescente + medio de cultivo zarrouk)	T1 (panel solar + medio de cultivo zarrouk)	T2 (panel solar + medio de cultivo ARH)	T3 (fluorescente + medio de cultivo de ARH)
$\mu(\text{días}^{-1})$	0.2207	0.2325	0.3744	0.2973
$k (\text{mgL}^{-1})$	1.225	1.214	1.353	1.257
t_d (días)	3.1404	2.9807	1.8512	2.3313

APÉNDICE 5

VALORES DE CONCENTRACIÓN DE CLOROFILA “A” EN 28 DÍAS

Crecimiento poblacional de <i>A. platensis</i>	
días	Clorofila(mg/L)
1	0,80
2	0,97
3	1,25
4	1,87
5	1,91
6	2,01
7	2,57
9	3,96
10	4,58
11	5,90
12	6,00
13	6,20
14	6,28
15	6,31
16	6,35
17	6,36
18	6,38
19	6,39
20	6,41
22	6,50
23	6,55
24	6,43
25	6,42
26	6,40
27	6,19
28	5,69

Fuente: Elaboración propia.

APÉNDICE 6

REGISTRO DE LOS VALORES DE pH DE LOS TRATAMIENTOS Y SUS RÉPLICAS

Evaluación del pH a la semana 1

Tratamientos		Día 0	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6	Día 7
Control	R1	8.71	8.73	9.50	9.70	9.78	9.81	9.85	9.86
	R2	8.70	8.75	9.48	9.67	9.76	9.79	9.83	9.82
	R3	8.73	8.72	9.52	9.72	9.72	9.73	9.81	9.75
	X±DE	8.71±0.015	8.73±0.0153	9.5±0.02	9.69±0.025	9.75±0.03	9.77±0.04	9.83±0.02	9.81±0.05
T1	R1	8.72	9.17	9.35	9.51	9.63	9.67	9.70	9.71
	R2	8.71	9.15	9.31	9.49	9.61	9.63	9.65	9.69
	R3	8.73	9.18	9.33	9.53	9.59	9.64	9.69	9.64
	X±DE	8.72±0.01	9.17±0.02	9.33±0.02	9.51±0.02	9.61±0.02	9.65±0.02	9.68±0.03	9.68±0.04
T2	R1	8.70	8.72	9.27	9.56	9.71	9.75	9.82	9.89
	R2	8.72	8.74	9.31	9.59	9.75	9.67	9.85	9.87
	R3	8.71	8.75	9.29	9.61	9.73	9.70	9.86	9.83
	X±DE	8.71±0.01	8.73±0.015	9.29±0.02	9.58±0.025	9.73±0.02	9.70±0.04	9.84±0.02	9.86±0.03
T3	R1	8.70	8.73	9.38	9.56	9.59	9.61	9.67	9.72
	R2	8.72	8.76	9.40	9.52	9.72	9.76	9.83	9.91
	R3	8.73	8.75	9.37	9.49	9.74	9.79	9.79	9.89
	X±DE	8.71±0.015	8.74±0.01	9.38±0.015	9.52±0.035	9.68±0.08	9.72±0.09	9.76±0.08	9.84±0.10

Evaluación del pH a la semana 2

Tratamientos	Día 10	Día 11	Día 12	Día 14	Día 15	Día 17	Día 18
Control	9.91	9.93	9.94	9.97	9.98	10.06	10.09
	9.90	9.91	9.91	9.95	9.97	9.99	10.00
	9.89	9.89	9.93	9.97	9.98	10.03	10.05
	9.9±0.01	9.91±0.02	9.92±0.015	9.96±0.01	9.97±0.005	10.02±0.035	10.04±0.045
T1	9.77	9.81	9.83	9.87	9.88	9.90	9.92
	9.78	9.87	9.89	9.93	9.95	9.98	9.99
	9.74	9.90	10.30	10.52	10.55	10.59	10.63
	9.76±0.02	9.86±0.05	10.01±0.26	10.11±0.36	10.13±0.37	10.16±0.38	10.18±0.39
T2	9.95	10.00	10.03	10.10	10.18	10.29	10.31
	9.92	9.93	9.95	10.05	10.09	10.25	10.32
	9.89	9.91	9.93	10.07	10.09	10.19	10.21
	9.92±0.03	9.94±0.04	9.97±0.05	10.07±0.025	10.12±0.05	10.24±0.05	10.28±0.06
T3	9.81	10.07	10.09	10.23	10.28	10.43	10.45
	10.03	10.09	10.10	10.21	10.34	10.41	10.43
	10.10	10.30	10.40	10.54	10.57	10.71	10.86
	9.98±0.15	10.15±0.12	10.19±0.17	10.32±0.18	10.39±0.15	10.51±0.16	10.58±0.24

Evaluación del pH a la semana 3 y 4

Tratamientos		Día 22	Día 23	Día 24	Día 26	Día 29	Día 30
Control	R1	10.27	10.31	10.33	10.46	10.52	10.53
	R2	10.23	10.29	10.31	10.37	10.59	10.53
	R3	10.21	10.23	10.3	10.35	10.52	10.55
	X±DE	10.23±0.03	10.27±0.04	10.31±0.015	10.39±0.05	10.54±0.04	10.53±0.01
T1	R1	10.01	10.08	10.3	10.56	10.64	10.67
	R2	10.1	10.2	10.4	10.46	10.52	10.54
	R3	10.76	10.8	10.83	10.85	10.91	10.94
	X±DE	10.29±0.41	10.36±0.39	10.51±0.28	10.62±0.20	10.69±0.20	10.72±0.20
T2	R1	10.43	10.46	10.5	10.65	10.71	10.82
	R2	10.54	10.56	10.57	10.64	10.72	10.75
	R3	10.39	10.41	10.43	10.54	10.59	10.61
	X±DE	10.45±0.078	10.47±0.076	10.5±0.07	10.61±0.06	10.67±0.072	10.72±0.107
T3	R1	10.59	10.61	10.62	10.69	10.76	10.74
	R2	10.65	10.67	10.72	10.75	10.81	10.83
	R3	10.89	10.9	10.91	10.93	10.99	11
	X±DE	10.71±0.15	10.72±0.15	10.75±0.14	10.79±0.12	10.85±0.12	10.85±0.13

APÉNDICE 7

REGISTRO DE TEMPERATURA EN MAYO

Departamento:Lima	Provincia: Lima	Los Olivos
días/mes/año	Temperatura máxima(°C)	Temperatura mínima(°C)
04/04/2017	28° ± 3,5	20° ± 2,4
05/04/2017	27° ± 4,0	20° ± 3,5
06/04/2017	27° ± 3,7	21° ± 4,2
07/04/2017	28° ± 3,8	20° ± 2,5
08/04/2017	28° ± 4,5	21° ± 3,5
09/04/2017	26° ± 4,0	20° ± 3,7
10/04/2017	27° ± 3,9	21° ± 3,4
11/04/2017	26° ± 3,8	21° ± 3,2
12/04/2017	27° ± 4,6	20° ± 3,6
13/04/2017	27° ± 3,5	21° ± 3,4
14/04/2017	27° ± 3,2	20° ± 3,1
15/04/2017	28° ± 2,9	20° ± 3,6
16/04/2017	26° ± 3,6	21° ± 3,8
17/04/2017	27° ± 4,6	20° ± 3,2
18/04/2017	30° ± 3,6	20° ± 3,1
19/04/2017	27° ± 2,9	21° ± 2,9
20/04/2017	28° ± 3,1	21° ± 2,7
21/04/2017	24° ± 3,6	20° ± 2,4
22/04/2017	26° ± 3,8	20° ± 2,3
23/04/2017	25° ± 3,9	21° ± 2,7
24/04/2017	24° ± 3,4	20° ± 2,8
25/04/2017	26° ± 3,2	20° ± 2,5
26/04/2017	26° ± 3,6	20° ± 2,3
27/04/2017	27° ± 3,7	20° ± 2,6
28/04/2017	24° ± 3,9	20° ± 2,9
29/04/2017	22° ± 4,5	19° ± 2,4
30/04/2017	23° ± 3,4	19° ± 2,1
01/05/2017	23° ± 3,6	19° ± 2,4
02/05/2017	24° ± 3,7	20° ± 2,8
03/05/2017	23° ± 3,5	20° ± 2,6
04/05/2017	25° ± 2,4	20° ± 2,1

Fuente: Senamhi -Datos Históricos.

APÉNDICE 8

PRUEBA DE TUKEY DE LOS PARÁMETROS DE CRECIMIENTO DE

A. platensis

Variable dependiente	(I) tratamientos	(J) tratamientos	Diferencia (I-J)	Error estándar	Sig.
Tasas	control	Tratamiento 1	-0,2333	0,1312	0,349
		Tratamiento 2	-0,1400 *	0,1312	0,000
		Tratamiento 3	-0,700 *	0,1312	0,003
	tratamiento 1	Control	-0,233	0,1312	0,349
		tratamiento 2	-1,1667*	0,1312	0,000
		tratamiento 3	-0,4667*	0,1312	0,031
	tratamiento 2	Control	-0,1400*	0,1312	0,000
		tratamiento 1	-0,11667*	0,1312	0,000
		tratamiento 3	-0,7000*	0,1312	0,003
	tratamiento 3	control	-0,7000*	0,1312	0,003
		tratamiento 1	-0,4667*	0,1312	0,003
		tratamiento 2	-0,7000*	0,1312	0,031
k	control	Tratamiento 1	-0,1000	0,2461	0,003
		Tratamiento 2	-0,1233*	0,2461	0,976
		Tratamiento 3	-0,1000	0,2461	0,005
	tratamiento 1	Control	-0,100	0,2461	0,976
		tratamiento 2	-0,1133*	0,2461	0,097
		tratamiento 3	-0,0000	0,2461	0,008
	tratamiento 2	Control	-0,1233*	0,2461	1,000
		tratamiento 1	-0,1133*	0,2461	0,005
		tratamiento 3	-0,1133*	0,2461	0,008
	tratamiento 3	control	-0,1000	0,2461	0,008
		Tratamiento 1	-0,0000	0,6972	0,976
		Tratamiento 2	-0,1133*	0,6972	1,000
td	control	Tratamiento 3	-0,11667	0,6972	0,008
		tratamiento 1	-1,16667*	0,6972	0,395
		tratamiento 2	-0,8000*	0,6972	0,000
	tratamiento 1	tratamiento 3	-0,11667	0,6972	0,000
		Control	-1,0500*	0,6972	0,395
		tratamiento 2	-0,6833*	0,6972	0,000
	tratamiento 2	tratamiento 3	-1,16667*	0,6972	0,000
		control	-1,0500*	0,6972	0,000
		tratamiento 1	-0,36667*	0,6972	0,000
	tratamiento 3	tratamiento 3	-0,8000*	0,6972	0,003
		control	-0,68333*	0,6972	0,000
		tratamiento 1	-0,3667*	0,6972	0,000
		tratamiento 2	-0,3667*	0,6972	0,003

APÉNDICE 9

INFORME DE ANÁLISIS EN LABORATORIO

3.1. Análisis porcentual de estimación en biomasa de *Arthrospira platensis*

	UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA FACULTAD DE AGRONOMIA LABORATORIO DE ANALISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS Y FERTILIZANTES																
INFORME DE ANALISIS ESPECIAL																	
SOLICITANTE	:	PAOLA SÁNCHEZ AGUIRRE															
PROCEDENCIA	:	LIMA/ LIMA/ LOS OLIVOS															
MUESTRA DE	:	<i>Arthrospira</i>															
REFERENCIA	:	H.R. 59708															
BOLETA	:	605															
FECHA	:	25/08/17															
<table border="1"><thead><tr><th>N° LAB</th><th>CLAVES</th><th>N mg/L</th></tr></thead><tbody><tr><td>5416</td><td>Control</td><td>34000</td></tr><tr><td></td><td>T1</td><td>74000</td></tr><tr><td></td><td>T2</td><td>54000</td></tr><tr><td></td><td>T3</td><td>24000</td></tr></tbody></table>			N° LAB	CLAVES	N mg/L	5416	Control	34000		T1	74000		T2	54000		T3	24000
N° LAB	CLAVES	N mg/L															
5416	Control	34000															
	T1	74000															
	T2	54000															
	T3	24000															
		 Sandy García Bendezu Jefe de Laboratorio															
<p>Av. La Molina s/n Campus UNALM Telf.: 614-7800 Anexo 222 Teléfono Directo: 349-5622 e-mail: labsuelo@lamolina.edu.pe</p>																	

APÉNDICE 10
REGISTRO FOTOGRÁFICO DE LA INVESTIGACIÓN

Imagen N°1. Cepa UTEX 1926

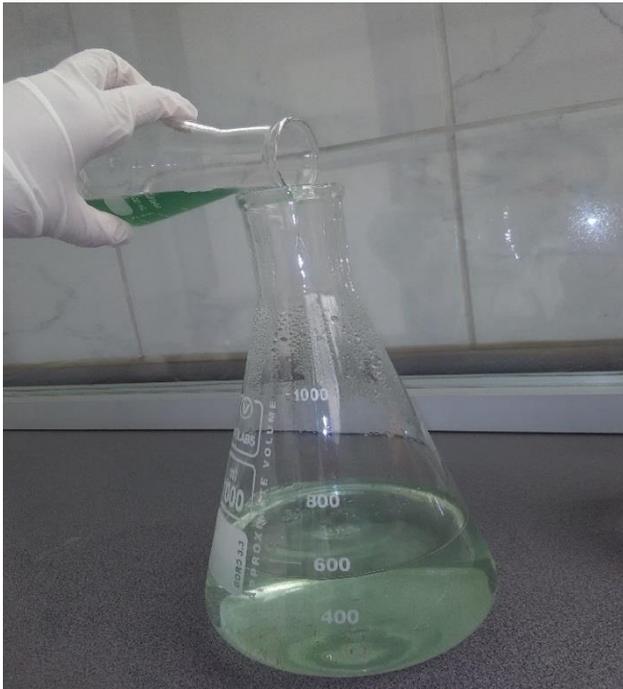


Imagen N°2. Acondicionamiento



Imagen N°3. Preparación de medio Zarrouk



Imagen N°4. Recolección ARH



Imagen N°5. Cargado de fotobiorreactores



Imagen N°6. Sistema fotovoltaico



Imagen N° 7. Evaluación crecimiento alga



Imagen N°8. Lectura espectrofotómetro

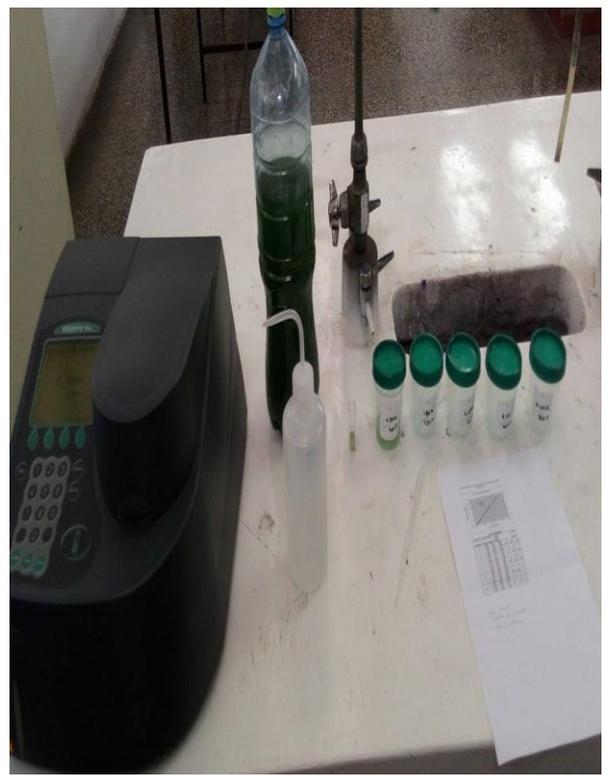


Imagen N°9. Esterilización de materiales



Imagen N°10. Peso seco del alga



Imagen N°11. Sistema de bomba al vacío



Imagen N°12. Producción biomasa



Imagen N°13. Instalación eléctrica.



Imagen N°14. Panel solar



Imagen N°15. Batería y regulador solar



Imagen N°16. Medición lux.

