

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA**  
**Instituto de Ciencias Agrícolas**



**EFFECTO DE UN BIOESTIMULANTE A BASE DE ALGAS  
MARINAS (*Macrocystis pyrifera* / *Gelidium robustum*)  
SOBRE EL RENDIMIENTO Y CONTENIDO NUTRICIONAL  
DEL MAÍZ AZUL (*Zea mays* L.)**

**TESIS**

QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:  
**MAESTRÍA EN CIENCIAS EN AGROBIOTECNOLOGÍA EN ZONAS  
ÁRIDAS**

**PRESENTA**

MARIA ELENA URIBE OROZCO

**DIRECTOR**

DR. ULIN ANTOBELLI BASILIO CORTÉS

La presente tesis titulada “Efecto de un bioestimulante a base de algas marinas (*Macrocystis pyrifera* / *Gelidium robustum*) sobre el rendimiento y contenido nutricional del maíz azul (*Zea mays* L.)”, realizada por la C. María Elena Uribe Orozco; bajo la dirección del Dr. Ulin Antobelli Basilio Cortes, siendo aceptada, revisada y aprobada por el Comité Particular, indicado como requisito parcial para obtener el título de:

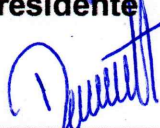
## MAESTRA EN CIENCIAS EN AGROBIOTECNOLOGÍA EN ZONAS ÁRIDAS

Comité particular



---

Dr. Ulin Antobelli Basilio Cortes  
**Presidente**



---

Dr. Dagoberto Durán Hernández  
**Secretario**




---

Dr. Daniel González Mendoza  
**Sinodal**



---

Dra. Marisol Galicia Juárez  
**Sinodal**



---

Dr. Onécimo Grimaldo Juárez  
**Sinodal**

**“POR LA REALIZACION PLENA DEL SER”**

Ejido Nuevo León, Mexicali, Baja California; México; enero 2026

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Instituto de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma de Baja California (ICA-UABC), por brindarme la formación académica que me permitió obtener el grado de Maestría en Ciencias Agrobiotecnológicas en Zonas Áridas (MCAZA).

Al Dr. Dagoberto Durán Hernández, con profundo respeto y admiración por su paciencia, guía y confianza. Gracias por acompañarme desde la elaboración de la propuesta de mi tema de investigación, la cual me abrió las puertas a la maestría; por permanecer siempre atento al desarrollo de esta investigación y, sobre todo, por motivarme a actuar con resiliencia y perseverar frente a los momentos difíciles que surgieron durante este proceso de formación.

A mi compañero de posgrado, el Ingeniero Biotecnólogo Agropecuario Gamaliel Munguía Cariño, por su invaluable apoyo en todas las actividades de campo; sin su colaboración, este logro no habría sido posible.

Al director de tesis, Dr. Ulin Antobelli Basilio Cortés, y al comité de sinodales, por formar parte de este proceso, a todos, gracias.

A todas aquellas personas que, de una u otra manera, formaron parte de este proceso, gracias.

## **DEDICATORIA**

A mi compañero de vida, por su apoyo incondicional e imparcial y por acompañarme a lo largo de este proceso. Gracias por estar siempre conmigo.

Al Ingeniero Biotecnólogo Agropecuario Gamaliel Munguía Cariño, por sus palabras de motivación y su apoyo, recordándome que, apoyándonos, todo se puede y somos excelentes.

A los doctores Marisol Galicia Juárez y Roberto Soto Ortiz por brindarme su orientación y respaldo durante todo el proceso.

A los docentes que enseñan con dedicación, respeto y un genuino compromiso formativo; a quienes ven en sus estudiantes no un medio, sino un propósito. A ellos, mi eterno respeto, gratitud y reconocimiento por su calidad profesional y humana.

“Por la realización plena del ser”

## ÍNDICE DE CONTENIDO

<b>I. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>II. PROBLEMÁTICA DE LA INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>2</b>
<b>III. JUSTIFICACIÓN.....</b>	<b>3</b>
<b>IV. HIPÓTESIS DEL TRABAJO.....</b>	<b>4</b>
<b>V. OBJETIVOS.....</b>	<b>4</b>
5.1 Objetivo general.....	4
5.1.2 Objetivos particulares.....	4
<b>VI. ANTECEDENTES.....</b>	<b>5</b>
6.1. Aprovechamiento de las algas marinas en la agricultura.....	5
6.1.2. Clasificación e importancia de las macroalgas marinas en su ambiente	6
6.1.3. Composición nutricional de las algas marinas.....	7
6.1.4. Efectos de los bioestimulantes a base de algas marinas en los cultivos .....	10
6.2. Importancia del maíz azul en el mundo.....	11
6.2.1. Producción e importancia del maíz azul en México.....	12
6.3. Condiciones edafoclimáticas en el cultivo de maíz azul.....	13
6.3.1. Suelo.....	13
6.3.2. Clima.....	13
6.3.3. Altitud.....	14

6.4. Composición nutricional del maíz azul .....	14
6.5. Contenido de antocianinas en el grano de maíz azul.....	15
6.6. Importancia de las antocianinas en la alimentación .....	17
<b>VII. MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>	<b>19</b>
7.1. Ubicación del área de estudio .....	19
7.2. Material biológico .....	19
<b>SECCIÓN 1. PRUEBAS EN LABORATORIO .....</b>	<b>19</b>
7.3. Pruebas fisiológicas de las semillas de maíz .....	19
7.3.1. Selección de las semillas .....	19
7.3.2. Prueba de germinación normal .....	19
7.3.3. Prueba de germinación con bioestimulante .....	20
7.3.4. Caracterización de pH y conductividad eléctrica de los tratamientos ...	21
7.3.5. Peso húmedo y seco de las plántulas normales .....	22
<b>SECCIÓN 2. ACTIVIDADES EN CAMPO .....</b>	<b>22</b>
7.4. Descripción de los tratamientos contemplados en campo .....	22
7.4.1. Preparación del área de siembra .....	24
7.4.2. Siembra, riego del cultivo de maíz y cosecha .....	24
7.4.3. Densidad de siembra del cultivo de maíz azul .....	25
7.4.4. Análisis fisicoquímicos del suelo.....	25
7.4.5. Control de plagas en los dos ciclos de cultivo de maíz azul .....	28

7.4.6. Control de maleza en los dos ciclos.....	29
7.4.7. Diseño y establecimiento del experimento en campo .....	29
<b>SECCIÓN 3. EVALUACIONES EN PLANTAS Y MAZORCA.....</b>	<b>32</b>
7.5. Variables evaluadas en las plantas de maíz azul y mazorcas .....	32
7.5.1. Altura de planta.....	33
7.5.2. Índice SPAD.....	33
7.5.3. Peso fresco y seco de hoja y tallo.....	34
7.5.4. Longitud de mazorca y diámetro.....	34
7.5.5. Hileras por mazorca y granos por hilera .....	34
7.5.6. Peso de grano por mazorca y olote .....	34
7.6. Unidades térmicas acumuladas .....	35
7.7. Análisis químico proximal de las semillas de maíz azul .....	36
7.8. Cuantificación de antocianinas.....	37
7.9. Análisis estadístico.....	39
<b>VIII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>39</b>
8.1. Prueba de germinación .....	39
8.2. Primer ciclo de cultivo en primavera – verano (2024) .....	45
8.2.1. Caracteres morfológicos vegetativos e índice de verdor .....	45
8.2.2. Altura de plantas y biomasa producida .....	48
8.2.3. Características de la mazorca y rendimiento .....	50

8.2.4. Composición química del grano de maíz azul .....	55
8.2.5. Contenido de antocianinas de la harina de maíz azul.....	57
8.3. Segundo ciclo de cultivo en otoño – invierno 2024 .....	59
8.3.1. Caracteres morfológicos vegetativos e índice de verdor.....	60
8.3.2. Altura de plantas y biomasa producida .....	62
8.3.3. Características de la mazorca y rendimiento .....	64
8.3.4. Composición química del grano .....	67
8.3.5. Contenido de antocianinas de la harina de maíz azul.....	70
8.4. Comparación entre los dos ciclos de cultivo .....	72
8.5. Efecto de la temperatura en los dos ciclos de cultivo de maíz azul .....	72
8.5.1. Efecto de la temperatura en el primer ciclo de cultivo de maíz azul .....	73
8.5.2. Efecto de la temperatura en el segundo ciclo de cultivo de maíz azul ..	77
8.5.3. Comparación de los ciclos sobre el efecto de la temperatura en el cultivo de maíz azul .....	79
8.6 Prueba t de Student .....	80
<b>IX. CONCLUSIÓN .....</b>	<b>84</b>
<b>X. PERSPECTIVAS A FUTURO.....</b>	<b>85</b>
<b>XI. LITERATURA CONSULTADA .....</b>	<b>86</b>
<b>XII. ANEXOS.....</b>	<b>107</b>
12.1. Anexo A.....	107
12.2. Anexo B.....	108

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Carbohidratos y composición de aminoácidos de algas marinas.....	9
<b>Tabla 2.</b> Composición nutricional del maíz azul (% en base seca) .....	15
<b>Tabla 3.</b> Tratamientos contemplados en los dos ciclos del cultivo del maíz azul utilizando fertilizante químico y el extracto de algas marinas. ....	23
<b>Tabla 4.</b> Propiedades texturales del suelo .....	26
<b>Tabla 5.</b> Análisis químico de cationes, aniones y solidos disueltos .....	26
<b>Tabla 6.</b> Análisis químico relacionado con la salinidad .....	27
<b>Tabla 7.</b> Análisis químico de fertilidad del suelo .....	27
<b>Tabla 8.</b> Características del diseño del área de siembra de maíz azul. ....	32
<b>Tabla 9.</b> Caracterización fisicoquímica de los tratamientos aplicados en la germinación de las semillas de maíz azul. ....	41
<b>Tabla 10.</b> Efecto del extracto en germinación y desarrollo de las plántulas de maíz azul.....	42
<b>Tabla 11.</b> Efecto de la fertilización química y el extracto de algas sobre la altura de planta (cm) y el índice verdor (unidades SPAD) en maíz azul, ciclo primavera-verano 2024. ....	46
<b>Tabla 12.</b> Efecto de la fertilización química y extracto de algas sobre la altura de planta y biomasa del maíz azul a 134 DDS, primer ciclo primavera-verano 2024. ....	49
<b>Tabla 13.</b> Efecto de la fertilización química y el extracto de algas sobre parámetros morfológicos y de rendimiento de la mazorca de maíz azul, primer ciclo primavera- verano 2024. ....	53
<b>Tabla 14.</b> Análisis proximal de la harina de maíz azul del primer ciclo primavera- verano 2024. ....	56

<b>Tabla 15.</b> Contenido de antocianinas en la harina del maíz azul del primer ciclo de cultivo, primavera -verano 2024. ....	58
<b>Tabla 16.</b> Efecto de la fertilización química y extracto de algas marinas sobre la altura de las plantas de maíz ( <i>Zea mays</i> L.). Segundo ciclo verano-invierno 2024. ....	61
<b>Tabla 17.</b> Efecto de la fertilización química y extracto de algas sobre la altura de plantas y la producción de biomasa del maíz azul a los 134 días DDS, segundo ciclo otoño-invierno 2024.....	63
<b>Tabla 18.</b> Efecto de la fertilización química y el extracto de algas sobre parámetros morfológicos y de rendimiento de la mazorca de maíz azul, primer ciclo primavera-verano 2024. ....	66
<b>Tabla 19.</b> Análisis proximal de la harina de maíz azul, segundo ciclo verano-invierno 2024. ....	68
<b>Tabla 20.</b> Contenido de antocianinas de la harina de maíz azul del segundo ciclo de cultivo otoño-invierno 2024. ....	71
<b>Tabla 21.</b> Comparación de medias de los ciclos uno y dos mediante la prueba t de Student.....	81

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Imágenes de tres especies de macroalgas marinas. Consultado el 12 de abril de 2024. Guiry M.D. y Guiry, G. M. (2024). Disponible en <a href="http://www.algabase.org">www.algabase.org</a> . .....	7
<b>Figura 2.</b> Productos elaborados con maíz azul: tortillas, tlayudas, totopos, tlacoyos, gorditas y tamales. Imágenes tomadas de <a href="https://pubs.nmsu.edu/_h/H226/">https://pubs.nmsu.edu/_h/H226/</a> y de <a href="https://www.google.com/">https://www.google.com/</a> . ....	13
<b>Figura 3.</b> Estructura química de las antocianinas. A) Ión flavilio, B) Variación en los radicales del anillo B en seis antocianinas principales presentes en tejidos vegetales, C) Estructura de las seis antocianinas. Adaptado de Li y Ahammed (2023). ....	17
<b>Figura 4.</b> Esquema del diseño experimental: A) Distribución de los seis tratamientos con 3 repeticiones. B) Rectángulo de color rojo indica el área de la parcela donde se evaluarán diez plantas para determinar la altura, índice de verdor (SPAD), las características de la mazorca y rendimiento. C) El rectángulo verde señala el área donde se cortaron tres plantas para evaluar altura, peso fresco y seco del maíz azul. .....	31
<b>Figura 5.</b> Proceso del grano de maíz azul para obtener una harina fina para el análisis proximal. ....	36
<b>Figura 6.</b> Comportamiento de la Temperatura máxima y mínima (°C) y acumulación térmica (GDD) en el primer ciclo de cultivo de maíz azul en el periodo primavera-verano 2024 en el Valle de Mexicali, B.C. La línea azul representa las horas calor acumuladas (GDD), la línea punteada amarilla temperaturas mínimas y la anaranjada las máximas registradas a lo largo de 176 días del cultivo. ....	73

**Figura 7.** Comportamiento de la Temperatura máxima y mínima (°C), la acumulación térmica (GDD) en el segundo ciclo de cultivo de maíz azul en el periodo otoño-inverno 2024 en el Valle de Mexicali, B.C. La línea verde representa las horas calor acumuladas (GDD), la línea punteada amarilla temperaturas mínimas y la anaranjada las máximas registradas a lo largo de 245 días del cultivo..... 77

## RESUMEN

Los extractos de algas marinas son una alternativa sostenible para la nutrición vegetal. Se evaluó un extracto comercial de algas (NPKelp®) como bioestimulante en la germinación de semillas y como complemento de la fertilización química en maíz azul. La prueba de germinación se estableció bajo un diseño completamente al azar con seis tratamientos (0, 0.4, 0.8, 1.2, 1.6 y 2.0 % v/v de extracto), evaluándose el porcentaje de germinación (PG), longitud de plúmula (LP), longitud de raíz principal (LRP), número de raíces secundarias (NRS), peso fresco total (PFT) y peso seco total (PST). El cultivo se estableció en dos ciclos agrícolas (primavera-verano y otoño-invierno de 2024) bajo un diseño de bloques completamente al azar con seis tratamientos: fertilización química (240N-80P-60K kg ha<sup>-1</sup>) reducida gradualmente en 25%; aplicación constante cada 20 días del extracto de algas (6 L ha<sup>-1</sup>) y el testigo sin fertilización. Se evaluaron altura de planta, índice de verdor (SPAD), peso fresco y seco (hojas y tallos con mazorca y espiga), características de la mazorca (longitud, diámetro, número de hileras y granos), peso de olote y grano, rendimiento, contenido nutricional y antocianinas, así como la acumulación de horas calor en ambos ciclos. Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) y prueba de Tukey ( $p < 0.05$ ). Los resultados mostraron que el tratamiento T2 promovió una mayor LP, LRP, NRS, PFT y PST. El T4 presentó mayor altura de planta y rendimiento (3807.76 kg ha<sup>-1</sup> en ciclo uno) y (9080.80 kg ha<sup>-1</sup> en ciclo dos) con menor acumulación térmica. En el contenido de proteínas el T3 y T5 destacaron con 12.80 % y 11.27 %, mientras que el T4 destacó en antocianinas, con 986 mg CGE kg<sup>-1</sup> en ciclo uno y 881 mg CGE kg<sup>-1</sup> en ciclo dos. Estos resultados demuestran que es posible reducir la fertilización química un 25 % sin afectar el rendimiento, la calidad nutricional y el contenido de antocianinas, en un suelo arcilloso con pH 8.71 y bajo contenido de materia orgánica, mediante el uso de extractos de algas marinas, promoviendo un manejo sostenible y eficiente.

**Palabras clave:** maíz azul, extracto de algas marinas, rendimiento, antocianinas, días-grado desarrollo.

## ABSTRACT

Seaweed extracts are a sustainable alternative for plant nutrition. A commercial seaweed extract (NPKelp®) was evaluated as a biostimulant on seed germination and as a complement to chemical fertilization in blue maize. The germination test was conducted under a completely randomized design with six treatments (0, 0.4, 0.8, 1.2, 1.6, and 2.0 % v/v of extract), assessing germination percentage (GP), plumule length (PL), main root length (MRL), number of secondary roots (NSR), total fresh weight (TFW), and total dry weight (TDW). The crop was established in two agricultural cycles (spring-summer and autumn-winter 2024) under a randomized complete block design with six treatments: chemical fertilization (240N-80P-60K kg ha<sup>-1</sup>) gradually reduced by 25 %; constant application of seaweed extract every 20 days (6 L ha<sup>-1</sup>); and a control without fertilization. Plant height, greenness index (SPAD), fresh and dry weight (leaves and stems with cob and ear), cob characteristics (length, diameter, number of rows and grains), cob and grain weight, yield, nutritional content, anthocyanins, and accumulated heat units (growing degree days, GDD) were evaluated in both cycles. Analysis of variance (ANOVA) and Tukey's test ( $p < 0.05$ ) were performed. Results showed that treatment T2 promoted higher PL, MRL, NSR, TFW, and TDW. Treatment T4 had greater plant height and yield (3807.76 kg ha<sup>-1</sup> in cycle one and 9080.80 kg ha<sup>-1</sup> in cycle two) with lower thermal accumulation. Protein content was highest in T3 and T5 (12.80 % and 11.27 %, respectively), while T4 stood out in anthocyanins, with 986 mg CGE/kg in cycle one and 881 mg CGE/kg in cycle two. These results demonstrate that chemical fertilization can be reduced by 25 % without affecting yield, nutritional quality, or anthocyanin content in clay soil with pH 8.71 and low organic matter, through the use of seaweed extracts, promoting sustainable and efficient management.

**Key words:** blue corn, Seaweed extract, yield, anthocyanins, growing degree days

## I. INTRODUCCIÓN

El maíz (*Zea mays* L.) es una de las plantas más estudiadas debido a su productividad e importancia como alimento tanto para el ser humano como para los sistemas pecuarios. La domesticación y diversidad genética se concentran en la región de Mesoamérica, específicamente en México, país considerado el centro de origen, domesticación y diversificación de este cultivo (Alegría-Marroquín et al., 2020). El maíz presenta una amplia distribución en el territorio nacional, adaptándose a diferentes altitudes, climas y tipos de suelos.

Las razas del maíz varían en color y forma de grano. En particular, el maíz de grano pigmentado presenta variantes desde tonos negros hasta rosados pálidos, siendo los colores más frecuentes el azul, negro y rojo (Salinas-moreno et al., 2012). Estos tipos de maíz son considerados de alto valor nutrimental debido al contenido de compuestos fenólicos, destacando las antocianinas (Masuoka et al., 2012), las cuales contribuyen a la salud de las personas al actuar como antioxidantes para combatir los radicales libres, asociados con el desarrollo de enfermedades crónicas degenerativas (Zhu et al., 2013).

Actualmente, se buscan alternativas para reducir el uso de fertilizantes químicos, sin afectar el rendimiento y la calidad del cultivo (García-Morales et al., 2020), y sin generar impactos negativos en el ambiente. En este contexto, las algas pardas han sido utilizadas desde hace siglos como recurso natural para abonar suelos dedicados a la agricultura, ya sea en estado fresco, deshidratadas, pulverizadas o mediante extractos aplicados al suelo o de forma foliar en las plantas (Durán-

Hernández et al., 2022). En este sentido, los bioestimulantes se consideran aditivos de los fertilizantes que favorecen una mejor absorción de nutrientes, estimulan el crecimiento vegetal y mejoran la tolerancia de las plantas al estrés abiótico (Drobek et al., 2019).

Estas propiedades han incentivado su uso en sistemas agrícolas intensivos, con el potencial de reducir la dependencia de fertilizantes químicos sin comprometer la calidad ni el rendimiento de los cultivos (Alegría-Marroquín et al., 2020). Por lo tanto, resulta relevante evaluar el efecto del bioestimulante de algas marinas en la producción de maíz azul en el Valle de Mexicali, Baja California, donde no se tienen antecedentes documentados de su cultivo, abriendo nuevas posibilidades para la diversificación agrícola y una agricultura sustentable.

## **II. PROBLEMÁTICA DE LA INVESTIGACIÓN**

El cultivo de maíz se ha adaptado a diferentes condiciones edafoclimáticas en la República Mexicana. Sin embargo, en las zonas áridas como en el valle de Mexicali, B.C., no hay reportes sobre la producción y calidad de maíz azul. La variabilidad genética del maíz permite poder sembrarse en gradientes altitudinales entre 1000 a 2400 metros, con adaptabilidad a mayores o menores altitudes, en zonas templadas hasta desérticas donde la planta del maíz se puede desarrollar en diferentes tipos de suelos con pH ligeramente ácidos a alcalinos y con temperaturas mínimas de 12.8 °C y máximas de 40.3°C. Por otra parte, las algas marinas aportan diferentes compuestos como micro y macronutrientes, compuestos bioactivos y materia orgánica contribuyendo a nutrir los cultivos y mejorar las condiciones del suelo. Por

lo tanto, se evaluó el bioestimulante NPKelp® de algas marinas sobre el cultivo de maíz azul. Siendo una alternativa sustentable para la obtención de una materia prima de alto valor nutricional.

### III. JUSTIFICACIÓN

Las algas marinas contienen micro y macronutrientes, lípidos, vitaminas, materia orgánica y compuestos bioactivos como reguladores de crecimiento: giberelinas, auxinas y citocininas. Los extractos de algas incrementan la germinación y el vigor de las plántulas y se consideran un complemento de los fertilizantes químicos, ya que en conjunto mejoran las condiciones del suelo y promueven el desarrollo de las plantas y estas potencializan la tolerancia al estrés abiótico y biótico, incrementando la producción y la calidad del cultivo.

Por lo tanto, es importante establecer y comprobar los beneficios del extracto comercial de algas marinas (*Macrocystis pyrifera* y *Gelidium robustum*) en el cultivo de maíz azul (*Zea mays* L.) de raza Tuxpeño, establecido bajo condiciones de estrés abiótico, en un suelo arcilloso con problemas de salinidad y temperaturas superiores a 40 °C en los meses de mayo a agosto, así como cercanas a 0°C en diciembre y enero, como ocurre en el Valle de Mexicali, Baja California.

## IV. HIPÓTESIS DEL TRABAJO

La aplicación de un extracto a base de algas marinas, en diferentes concentraciones, mejora la germinación y el crecimiento inicial de las plántulas de maíz azul (*Zea mays* L.) de raza Tuxpeño; asimismo, su combinación con la reducción de la fertilización química favorece el desarrollo del cultivo durante los ciclos primavera–verano y otoño–invierno de 2024, incrementado el rendimiento del grano, su contenido nutricional y la concentración de antocianinas.

## V. OBJETIVOS

### 5.1 Objetivo general

Evaluar el bioestimulante a base de algas marinas (*Macrocystis pyrifera* y *Gelidium robustum*) sobre la germinación, y su efecto como complemento en la fertilización química sobre el rendimiento, calidad nutricional y contenido de antocianinas del grano de maíz azul (*Zea mays* L.) de la raza Tuxpeño cultivado en el Valle de Mexicali, B.C.

### 5.1.2 Objetivos particulares

- Analizar el efecto del extracto de algas marinas sobre la germinación del maíz azul.
- Evaluar el efecto del extracto de algas en combinación con la fertilización química sobre el rendimiento y la calidad nutricional del maíz azul.
- Cuantificar el contenido de antocianinas de los granos de maíz azul.
- Analizar los grados-día de desarrollo acumulados en las principales etapas fenológicas del cultivo de maíz azul.

## VI. ANTECEDENTES

### 6.1. Aprovechamiento de las algas marinas en la agricultura

Las algas marinas son un recurso aprovechado como ingrediente en la alimentación humana y animal, así como en la fertilización de suelos dedicados a la agricultura. Actualmente, presentan diversas aplicaciones en el ámbito biotecnológico. En el caso específico de la agricultura, se emplean en la formulación de bioestimulantes elaborados a partir de distintas especies de algas.

Entre ellas, destacan las algas pardas, debido a su gran tamaño y alta producción de biomasa, facilitando su aprovechamiento en nivel industrial (Durán-Hernández et al., 2022). En este contexto, Morales-Aparicio et al. (2025) señalan sobre la harina de *Ulva lactuca* representa una alternativa prometedora para mejorar la fertilidad de los suelos afectados por la alcalinidad (reduciendo el pH de  $9\pm 0.05$  a  $7.47\pm 0.06$ ), mientras que *Gracilaria blodgettii* es eficaz en suelos con bajo contenido de materia orgánica (incrementándola de  $1.48\pm 0.28$  a  $2.7\pm 0.14\%$ ), particularmente en suelos de textura franco-arcillosa.

Por otra parte, Khan et al., (2015) evaluaron el efecto nematicida de extractos de tres especies de macroalgas marinas: *Sargassum tenerrimum*, *Padina tetrastromatica* y *Melanothamnus afaqhusainii* sobre el nematodo agallador *Meloidogyne javanica*. En sus experimentos, se observó una eclosión de huevos del 96 % y una mortalidad del 99 %, evidenciando el alto potencial de estos extractos como agentes de control biológico.

### **6.1.2. Clasificación e importancia de las macroalgas marinas en su ambiente**

Las macroalgas marinas se clasifican en tres phylum: las algas verdes (Chlorophyta) por la presencia de clorofilas a y b como en las plantas superiores; las algas pardas (Ochrophyta), se atribuye el color al predominio de xantofilas y fucoxantina que enmascaran otros pigmentos, y las algas rojas (Rhodophyta) debido principalmente al pigmento ficoeritrina (Abad et al., 2011; Mateo-Cid et al., 2019).

En la Figura 1 se muestran tres especies representativas de los grupos mencionados. Por otro lado, las algas marinas tienen diferentes rasgos morfológicos como forma, tamaño y color, propios de cada grupo, formando diversos paisajes coloridos en el ambiente marino (Durán-Hernández et al., 2022), distribuyéndose por su capacidad de adaptación a diversos gradientes físicos, químicos y biológicos, los cuales actúan de manera continua y conjunta, influyendo en su ubicación, además brindan distintos servicios como productores primarios, alimento y protección a la fauna marina. Asimismo, desempeñan un papel fundamental en la fijación del CO<sub>2</sub> a través del proceso fotosintético, contribuyendo a la producción de oxígeno (Mansillas y Alveal, 2004).



*Ulva sp*  
Alga verde



*Macrocystis pyrifera*  
Alga parda



*Gelidium robustum*  
Alga roja

**Figura 1.** Imágenes de tres especies de macroalgas marinas. Consultado el 12 de abril de 2024. Guiry M.D. y Guiry, G. M. (2024). Disponible en [www.algabase.org](http://www.algabase.org).

### 6.1.3. Composición nutricional de las algas marinas

La composición química de las algas marinas puede variar según la especie, la fase del ciclo de vida, la ubicación geográfica, el área y condiciones ambientales (McHugh, 2003). Farag et al. (2023) describen el contenido de minerales de estas algas, incluyendo macronutrientes: calcio (Ca), fósforo (P), magnesio (Mg), azufre (S), sodio (Na), cloruro (Cl) y potasio (K), así como microminerales tales como hierro (Fe), zinc (Zn), cobre (Cu), yodo (I), selenio (Se), manganeso (Mn), cromo (Cr), molibdeno (Mo), flúor (F), boro (B), cobalto (Co), silicio (Si) y níquel (Ni).

Por otra parte, Mouga et al. (2025) señalan que las macroalgas marinas *Ulva sp.*, *Gracilaria multipartita* y *Sargassum muticum* presentan una compleja composición bioquímica que incluye azúcares, lípidos, proteínas, compuestos fenólicos aromáticos, carotenoides, polisacáridos estructurales y polisacáridos sulfatados.

Estos compuestos tienen aplicaciones en diversas industrias, como la alimentaria, farmacéutica, cosmética, y otras.

Asimismo, los polisacáridos como ulvanos, alginatos y carragenanos, los cuales han demostrado incremento de la tolerancia de las plantas a la salinidad (Bi et al., 2011; Zou et al., 2019; Drira et al., 2021) así como su respuesta frente a diversas condiciones de estrés abiótico, temperaturas extremas de frío y calor (Van Oosten et al., 2017; Zou et al., 2019). Además, los extractos de algas contienen reguladores del crecimiento, como citoquininas (Stirk et al., 2003; Stirk et al., 2004) y auxinas (Stirk et al., 2014), que contribuyen a mejorar el desarrollo vegetal.

En la Tabla 1 se presentan los carbohidratos y composición de aminoácidos de algas marinas, según los estudios de Qasim (1991), Castro-González et al. (1996), Shevchenko et al. (2007) y Cian et al. (2015).

**Tabla 1.** Carbohidratos y composición de aminoácidos de algas marinas

	Algas rojas (Rhodophyceae)	Algas verdes (Chlorophyceae)	Algas pardas (Phaeophyceae)
Polisacáridos	Agar	Amilasa	Alginatos
	Carragenanos	Amilopectina	Celulosa
	Celulosa	Celulosa	Heteroglucanos complejos sulfatados
	Mucílagos complejos	Mucilagos Hemicelulosa	Glucanos con fucosa
	Fucelaran	Glucomananos	Fucanos
	Glucógeno (almidón florideano)	Mananos	Glucuronoxilofucanos
	Mananos	Inulina	Laminarias
	Xilanos, rodimenanos	Laminarano	Glucanos tipo licheano
		Pectina	
		Mucílagos sulfatados (glucuronoxilomananos)	
	Xilanos		
Aminoácidos			
Alanina	+++	+++	++
Glicina	+++	+++	++
Valina	++	++	+
Leucina	++	++	++
Isoleucina	++	++	++
Serina	+++	+++	+++
Treonina	+++	++	++
Cisteína	+++	++	++
Metionina	++	++	+++
Aspartato	+++	++	++
Glutamato	+++	+++	+++
Lisina	+++	+++	++
Arginina	+++	++	++
Fenilalanina	++	++	+
Tirosina	++	++	+
Prolina	+++	++	++
Histidina	++	+	+

Leyenda: +++: alta cantidad ( $>60 \text{ mg g}^{-1}$  de nitrógeno total); ++: cantidad media ( $20\text{--}60 \text{ mg g}^{-1}$ ); +: baja cantidad ( $<20 \text{ mg g}^{-1}$ ). Información: Qasim (1991); Castro-González et al., (1996); Shevchenko et al., 2007; Cian et al., 2015.

#### **6.1.4. Efectos de los bioestimulantes a base de algas marinas en los cultivos**

Los bioestimulantes de algas marinas promueven la germinación y provocan cambios significativos en el vigor de las plántulas al incrementar el tamaño y la longitud de las raíces (Rayorath et al., 2008), atribuyéndose a bajos niveles de fitohormonas presentes en los extractos, como auxinas (Crouch et al., 1993). Sin embargo, los diferentes productos de bioestimulantes ofertados en el mercado, pueden diferir en la composición nutricional, dependiendo la fecha de colecta, el lugar y la especie.

Ertani et al. (2018) reportan que la aplicación de extractos de *Ascophyllum nodosum* y *Laminaria* spp. en el cultivo de maíz, estimuló el crecimiento radicular, la actividad esterasa, el contenido de azúcares y la absorción de nutrientes. En comparación con el tratamiento control, las hojas de las plantas tratadas mostraron una mayor capacidad de absorción de Zn, Fe, B, Cu, Mo, S, Mg, Ca y Mn. Dicho estudio concluye que el incremento de la actividad de la enzima esterasa en las plantas de maíz tratadas con el extracto, es un indicativo del efecto estimulante sobre el metabolismo vegetal, reflejando una mayor producción de biomasa.

Por otra parte, Radwan et al. (2018) evaluaron un extracto comercial de *Ascophyllum nodosum* ( $350$  y  $700 \text{ mg L}^{-1}$ ) y biofertilización con Fosforina, ambos combinados con fertilización química ( $120\text{N}\text{--}60\text{P}\text{--}48\text{K kg ha}^{-1}$ ), en tres híbridos de maíz blanco. Los resultados indicaron que los tratamientos influyeron en variables

productivas como longitud de mazorca, número de hileras por mazorca, número de granos, rendimiento de grano y contenido de proteína, fósforo (P) y potasio (K), registrándose diferencias entre las concentraciones del extracto y la biofertilización.

## **6.2. Importancia del maíz azul en el mundo**

En distintas regiones del mundo, se cultivan variedades de maíz azul de polinización libre, a pesar de que las variedades modernas ofrecen mayores rendimientos, los intereses socioculturales y socioeconómicos continúan motivando a los productores a conservar y sembrar variedades locales, representativas de diversas zonas geográficas (Nankar et al., 2016a).

En este contexto, Soleri y Smith (1995) señalan que el cultivo de estas variedades locales contribuye a la conservación *in situ* de la diversidad genética del maíz. Lago et al. (2015) reportan una variedad autóctona de maíz con granos de tonalidades azul/negros, tradicionalmente cultivada en la región de Galicia, España. Esta variedad se caracteriza por su elevado contenido de antocianinas (83.45 mg/100 g de harina), flavonoles (74.21 mg/100 g) y ácidos fenólicos (216.63 mg/100 g).

De acuerdo con Nankar et al. (2016a; 2016b) evaluaron la composición bioquímica del grano de dos variedades de maíz azul de polinización libre, “Los Lunas High” y “Ohio Blue”, originarias de las regiones Southwest y Corn Belt, cultivadas en Nuevo México.

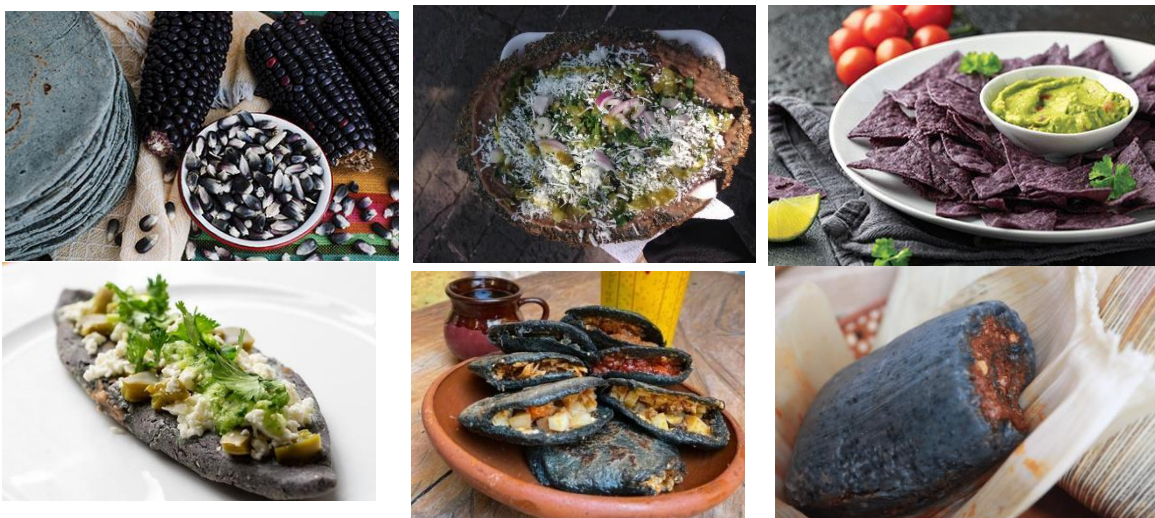
Estas variedades fueron comparadas con seis variedades locales de distintas áreas de Arizona y Nuevo México, analizando contenido en antocianinas, aminoácidos, proteínas, almidón, fibra cruda, ácidos grasos y cenizas, lo que indica que todas son

adecuadas para acompañar platillos tradicionales. Además, reportan que las variedades de polinización libre se caracterizan por la presencia del compuesto cianidina-3- O -disuccinilglucósido (Nankar et al., 2016a; Nankar et al., 2016b).

### **6.2.1. Producción e importancia del maíz azul en México**

El maíz azul se cultiva principalmente en los estados de Hidalgo, Estado de México, Puebla, Campeche, Chiapas, Guerrero, Chihuahua, Michoacán y Sinaloa, entre otros. En México se siembran aproximadamente 6,655,106.71 millones de hectáreas, predominando el cultivo de maíz blanco y amarillo; de esta superficie, el 0.5% corresponde a maíces de colores, incluyendo el maíz azul. El rendimiento promedio es de 2.94 t ha<sup>-1</sup> (SIAP, 2024); sin embargo, existen variedades mejoradas de maíz azul capaces de producir hasta 8 t ha<sup>-1</sup> (CIMMYT, 2019).

Parte de la semilla se guarda para sembrar el siguiente ciclo de cultivo, y otra parte del grano se destina principalmente para el autoconsumo familiar y en menor medida para la venta local, para la elaboración de productos como son tortillas, atoles, elotes, tlacoyos, totopos, pinole (Díaz-Huacuz et al., 2017), tostadas y chilaquiles (Figura 2), los cuales se ofrecen en pequeños establecimientos, mercados y restaurantes. Otro uso es la producción de palomitas de maíz, chips y dulces a base de harina, no sólo por su atractivo color, sino también porque tienen importantes propiedades nutricionales y saludables debido a su alto contenido de antocianinas y fibra (Colombo, Ferron y Papetti, 2021).



**Figura 2.** Productos elaborados con maíz azul: tortillas, tlayudas, totopos, tlacoyos, gorditas y tamales. Imágenes tomadas de [https://pubs.nmsu.edu/\\_h/H226/](https://pubs.nmsu.edu/_h/H226/) y de <https://www.google.com/>.

### **6.3. Condiciones edafoclimáticas en el cultivo de maíz azul**

#### **6.3.1. Suelo**

Para un desarrollo adecuado del maíz azul, el suelo debe tener una textura intermedia, preferentemente franco o franco-arcillosa, y poseer buena capacidad de drenaje. Además, el pH del suelo debe mantenerse entre 5.5 y 7.0, fuera de este rango pueden presentar problemas de toxicidad que afectan el crecimiento del cultivo (Ortigoza-Guerreño, López-Talavera y González-Villalba, 2019).

#### **6.3.2. Clima**

El maíz azul se adapta a diversas condiciones climáticas, incluyendo regiones con climas cálidos, secos y templados, siempre que reciba la nutrición adecuada. Durante la germinación, la temperatura mínima es 10 °C, siendo óptima entre 18 y

20 °C. En la etapa de desarrollo, puede tolerar temperaturas desde 15 °C hasta 40 °C, con un rango ideal de 20 a 30 °C. Para la floración, se requieren temperaturas promedio entre 20 y 30 °C, acompañadas de días soleados y noches frescas. La etapa más crítica es después de la floración y durante el llenado de grano, cuando el cultivo es especialmente susceptible a la falta de agua (Ortigoza -Guerreño, López -Talavera y González -Villalba, 2019)

### **6.3.3. Altitud**

El cultivo de maíz azul se ha adaptado a un amplio rango de altitudes, desde el nivel del mar hasta aproximadamente 3,000 metros sobre el nivel del mar (msnm). En el Estado de México y Tlaxcala, se ha registrado su cultivo en altitudes que van de 2,271 a 2,408 msnm (Arellano Vázquez et al., 2014)

### **6.4. Composición nutricional del maíz azul**

En la Tabla 2 se presentan los principales componentes nutricionales de la variedad de maíz azul Ohio blue. Se incluyen los valores de proteínas, lípidos, fibra, cenizas, almidón y antocianina.

**Tabla 2.** Composición nutricional del maíz azul (% en base seca)

Componente	Valor %	Maíz	Fuente
Proteína	10.35-11.29		
Lípidos	3.89-6.49		
Fibra	1.61-1.81	Ohio blue	Nankar et al. (2020c)
Cenizas	1.41-1.64		
Almidón	55.60-57.70		
Antocianina	16.67-58.24 (mg C3G-eq g <sup>-1</sup> )		

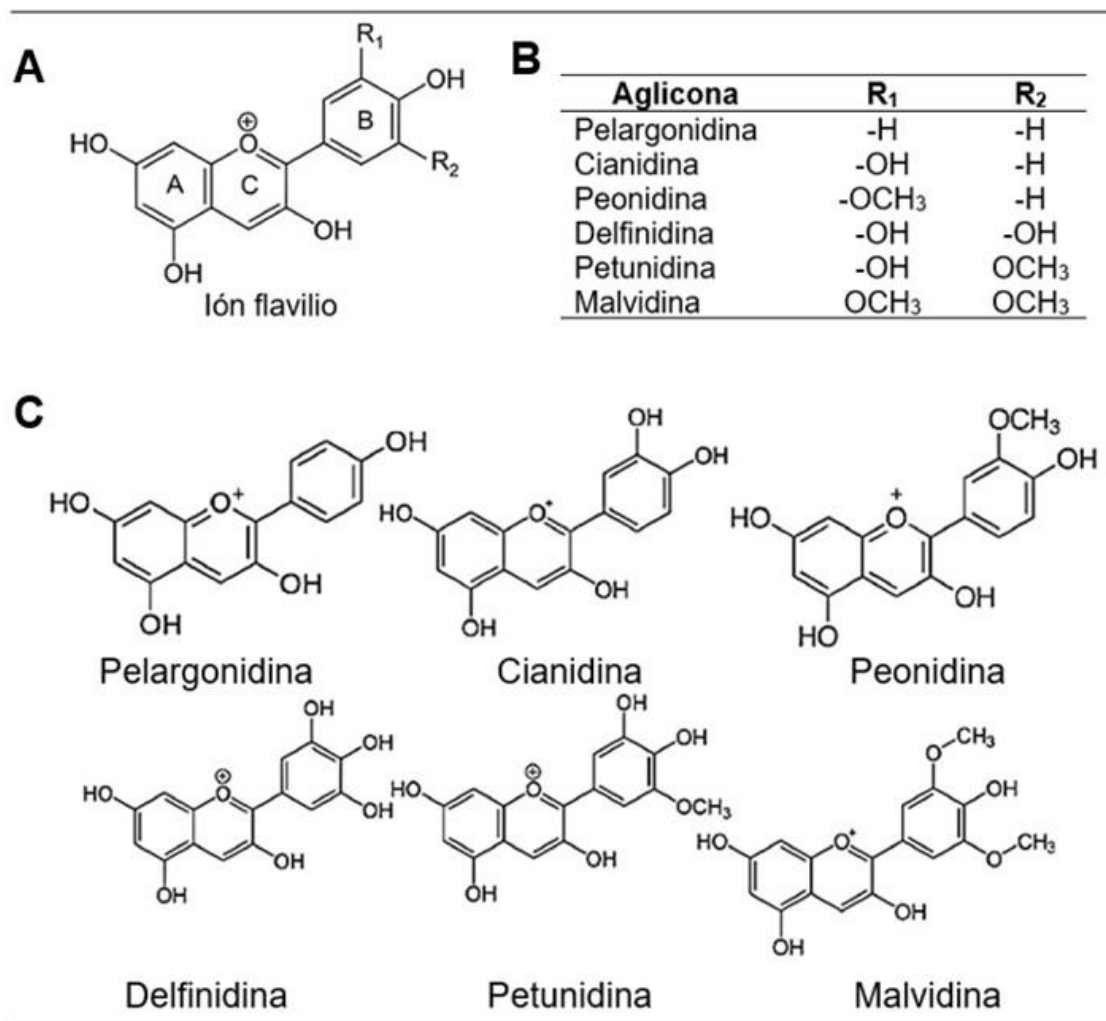
### **6.5. Contenido de antocianinas en el grano de maíz azul**

Los compuestos fenólicos son metabolitos secundarios de las plantas caracterizados por la presencia de uno o más grupos hidroxilo (-OH) unidos a un anillo aromático. Estos se pueden clasificar en varios grupos principales, como ácidos fenólicos, lignanos, taninos y flavonoides (Zhang et al., 2021).

Los flavonoides tienen tres anillos (C<sub>6</sub>-C<sub>3</sub>-C<sub>6</sub>) su esqueleto básico (Belwal et al., 2020). Con base en las diferencias estructurales, se clasifican en siete subclases: flavonoles, flavonas, isoflavonas, flavanonas, flavanoles, chalconas y antocianidinas (Lu et al., 2024). Su clasificación se basa en el grado de oxidación del heterociclo central, además, los grupos metilo e hidroxilo en los otros dos anillos conducen a varias modificaciones de los glucósidos flavonoides, como la glicosilación y la acilación.

Las antocianinas son inestables y están presentes en su forma glicosilada (Pan et al., 2019). Son pigmentos vegetales hidrosolubles que le confieren colores rojo, morado y azul a flores y frutos (Cruz et al., 2021) como el grano de maíz azul. Las antocianinas son glicósidos de derivados polihidroxilo y polimetoxi (Lu et al., 2024). El número y la posición de los grupos hidroxilo y metoxilo presentes como sustituyentes en la estructura del ión flavilio dan lugar a diferentes antocianinas: delphinidina, cianidina, petunidina, peonidina, malvidina y pelargonidina (Figura 3) (Tena et al., 2020).

Existen más de 30 tipos de antocianinas monoméricas o agliconas, y la cianidina 3-glucósido parece ser una de las más comunes en la naturaleza (Zhu, 2018). En las variedades analizadas identificaron 16 antocianidinas, destacando la cianidina-3-glucósido como la más abundante (75 %), seguida por la pelargonidina-3-glucósido y la peonidina-3-glucósido (Mutlu et al., 2018; Nankar et al., 2016a).



**Figura 3.** Estructura química de las antocianinas. A) lón flavilio, B) Variación en los radicales del anillo B en seis antocianinas principales presentes en tejidos vegetales, C) Estructura de las seis antocianinas. Adaptado de Li y Ahammed (2023).

## 6.6. Importancia de las antocianinas en la alimentación

El consumo de alimentos ricos en antocianinas crece progresivamente a medida que se conocen sus beneficios para la salud, especialmente su capacidad antioxidante (Bhushan et al., 2024). Los frutos ricos en antocianinas presentan una elevada actividad antioxidante, con la capacidad para captar radicales libres como

el peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ), el radical hidroxilo (OH) y el oxígeno singlete ( $O_2$ ) (Wang y Mazza 2002; Wang y Lin, 2000). Entre los cereales, el maíz pigmentado es la fuente más importante de estas sustancias (Bhushan et al., 2024).

En este sentido, los granos de maíz azul se han clasificado como alimento de índice glucémico bajo (IG), mientras que los snacks elaborados con maíz amarillo y rojo se encuentran en la categoría de IG medio (Cetin-Babaoglu et al., 2021). Además, la harina de maíz pigmentado contiene mayor cantidad de almidón resistente y presenta un bajo índice de digestión, por lo que, la hace potencialmente útil en dietas sin gluten y con un bajo IG (Rocchetti et al., 2018; Colombo et al., 2021b; Monsierra et al., 2024, y Zhang et al., 2024). Por lo tanto, los snacks elaborados a base de maíz de color combinan ambas ventajas, son libres de gluten y contienen almidón de digestión lenta (Bhushan et al., 2024).

En consecuencia, la adición de antocianinas a productos de interés les otorga un valor agregado. En este contexto, Simic et al. (2018) elaboraron un pan blanco enriquecido con harina de maíz azul y rojo, alcanzando un contenido significativo de antocianinas, entre 84 y 142 mg de C3GE (Cianidina-3-glucósido equivalente)  $kg^{-1}$ , respectivamente. Por otra parte, Zilic et al. (2016) elaboraron galletas adicionando harina de maíz rojo y azul, a las cuales incorporaron ácido cítrico con el fin de mejorar la retención del color y favorecer la estabilidad de las antocianinas. Con base a lo antes mencionado, los estudios evidencian el potencial biotecnológico del maíz pigmentado para desarrollar productos alimenticios enriquecidos con compuestos bioactivos que mejoran el valor nutricional y funcional.

## **VII. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **7.1. Ubicación del área de estudio**

La investigación se realizó durante 2024 y 2025 en el campo experimental y en el Laboratorio de Cultivo de Tejidos Vegetales del Instituto de Ciencias Agrícolas (ICA) de la Universidad Autónoma de Baja California (UABC), ubicada en el Valle de Mexicali, Ejido Nuevo León.

### **7.2. Material biológico**

Se utilizaron semillas de la variedad de maíz azul de la raza Tuxpeño (*Zea mays* L.) cultivada en la Vega de Metztlán, Hidalgo, región localizada en las coordenadas 20°35'04"N 98°45'47"O, con una altitud de 1320 msnm. El clima es semiseco con temperaturas máximas de 47 °C. El cultivo del maíz se realiza en el periodo primavera-verano en condición de temporal.

## **SECCIÓN 1. PRUEBAS EN LABORATORIO**

### **7.3. Pruebas fisiológicas de las semillas de maíz**

#### **7.3.1. Selección de las semillas**

Para realizar las diferentes pruebas en la presente investigación, se seleccionaron manualmente las semillas con tamaño uniforme, y se descartaron las que presentaron algún daño físico.

#### **7.3.2. Prueba de germinación normal**

Posterior a los dos meses de la cosecha se realizó una prueba de germinación, de acuerdo a lo sugerido por ISTA (2016) con la finalidad de evaluar la calidad

fisiológica de las semillas del maíz azul. Se contemplaron cuatro repeticiones con 25 semillas (100 semillas). En cuatro contenedores de plástico se colocaron dos servitoallas, sobre las cuales se distribuyeron las semillas de manera equidistante en cinco hileras, colocando cinco semillas por hilera y a cada contenedor se le adicionaron 60 mL de agua destilada. Se colocaron en un cuarto de incubación a una temperatura de 25 °C, con un fotoperiodo de 16 horas y 8 horas de oscuridad, durante 7 días.

Posteriormente, se contaron las semillas germinadas que desarrollaron plántulas normales con un sistema radicular bien desarrollado, hipocótilo o mesocótilo (maíz) y la plúmula (ISTA,2016) de las cuales se obtuvo el porcentaje de germinación con la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Germinación} = \frac{\text{No. total de semillas germinadas}}{\text{No. total de semillas puestas a germinar}} * 100$$

### **7.3.3. Prueba de germinación con bioestimulante**

A seis meses después de la cosecha se realizó la prueba de germinación de semillas de maíz azul aplicando el bioestimulante, el experimento se hizo bajo un diseño completamente al azar (DCA). Cada unidad experimental consistió en un contenedor de plástico con 25 semillas, y se contemplaron tres repeticiones por tratamiento. Los tratamientos evaluados incluyeron un testigo (agua destilada) y cinco concentraciones del bioestimulante: 0.4, 0.8, 1.2, 1.6 y 2.0 % v/v.

En cada contenedor se colocaron dos servitoallas, sobre las cuales se distribuyeron las semillas de manera equidistante en cinco filas, luego, se colocaron otras dos toallas encima y se humedecieron con 60 mL de la solución correspondiente a cada tratamiento. Los recipientes se colocaron en una cámara de incubación a 25 °C, con un fotoperiodo de 16 horas luz y 8 horas oscuridad, utilizando lámparas LED con un flujo luminoso de 1,600 lúmenes (lm) y una temperatura de color de 6500 K (luz fría), durante un periodo de siete días.

Diariamente se realizó el conteo visual de las semillas germinadas y no germinadas, siguiendo lo propuesto por Escobar- Álvarez et al. (2021), considerando como germinada aquella semilla con la radícula emergida de la testa. El periodo de evaluación de la germinación se estableció de acuerdo con la normativa de la ISTA (2016). Además, a los 4 y 7 días después de la siembra, se midieron la longitud de la plúmula (LP), de raíz principal (LR) y se contó el número de raíces secundarias (RS) por tratamiento, conforme a lo indicado por Durán-Hernández (2008).

#### **7.3.4. Caracterización de pH y conductividad eléctrica de los tratamientos**

Previamente a la aplicación de los tratamientos a las semillas, se realizó la caracterización de las soluciones: testigo y las diferentes concentraciones del extracto de algas marinas: 0.4, 0.8, 1.2, 1.6 y 2.0 % v/v. El pH y la conductividad eléctrica (CE) se determinaron utilizando un medidor portátil digital HANNA, calibrado previamente. Las mediciones se realizaron en tres repeticiones por muestra, a temperatura ambiente (25 °C) y los datos se registraron para asegurar la consistencia de las soluciones aplicadas en la prueba de germinación.

### **7.3.5. Peso húmedo y seco de las plántulas normales**

Al culminar el periodo de la prueba de germinación, las plántulas de cada repetición de los tratamientos se separaron para determinar el peso fresco (PF) utilizando una balanza analítica (OHAUS-PIONEER). Posteriormente, la biomasa foliar y la raíz se colocaron en bolsas de papel estraza previamente perforadas (18 bolsas en total), se sometieron a un proceso de secado en horno (Lab-Line, Ambi-Low Chamber, Livonia, MI, EE. UU) a 75°C durante 72 horas, según el protocolo descrito por Galicia-Juárez et al. (2017). Finalmente, se registró el peso seco transcurrido el tiempo de secado.

## **SECCIÓN 2. ACTIVIDADES EN CAMPO**

### **7.4. Descripción de los tratamientos contemplados en campo**

Los tratamientos evaluados en el experimento en campo se establecieron como se muestra en la Tabla 3. El tratamiento testigo (T1) consistió únicamente en la aplicación de agua. El tratamiento T2 recibió la fertilización química completa en dosis de 240–80–60 kg ha<sup>-1</sup> de N-P-K.

El tratamiento T3 incluyó la misma fertilización química completa, complementada con la aplicación del extracto NPKelp® a una dosis de 6 L ha<sup>-1</sup>, aplicada cada 20 días. En los tratamientos T4, T5 y T6, la dosis de fertilización química se redujo de manera gradual en 25 %, manteniéndose constante la aplicación del extracto NPKelp®.

La fertilización química se aplicó en dos eventos, inmediatamente después de la siembra y a los 40 días de la siembra, en ambos ciclos agrícolas.

La fertilización química se realizó utilizando como fuentes de nutrientes urea (Yara; 46–00–00) como fuente de nitrógeno; fosfato monoamónico (MAP; 11–52–00) como fuente de fósforo y cloruro de potasio (KCl; 00–00–60) como fuente de potasio.

**Tabla 3.** Tratamientos contemplados en los dos ciclos del cultivo del maíz azul utilizando fertilizante químico y el extracto de algas marinas.

Tratamientos	Proporción de fertilizante químico y extracto
T1	Testigo (sin adición fertilización química y extracto)
T2	240–80–60 kg ha <sup>-1</sup> de N–P–K (100 %) sin extracto
T3	240–80–60 kg ha <sup>-1</sup> de N–P–K (100 %) 6 L ha <sup>-1</sup> de extracto NPKelp®
T4	180–60–45 kg ha <sup>-1</sup> de N–P–K (75 %) y 6 L ha <sup>-1</sup> de extracto NPKelp®
T5	120–40–30 kg ha <sup>-1</sup> de N–P–K (50 %) y 6 L ha <sup>-1</sup> de extracto NPKelp®
T6	60–20–15 kg ha <sup>-1</sup> de N–P–K (25 %) y 6 L ha <sup>-1</sup> de extracto NPKelp®

#### **7.4.1. Preparación del área de siembra**

En el área asignada para la siembra se realizaron las siguientes labores para la preparación del terreno como es el barbecho, rastreo, nivelación del terreno y surcado con la finalidad de formar una cama de siembra que permita una buena distribución de las semillas, la emergencia uniforme de plántulas, y crecimiento de las raíces y el anclaje de las plantas del cultivo de maíz (SAGARPA, SENASICA y INIFAP, 2015).

#### **7.4.2. Siembra, riego del cultivo de maíz y cosecha**

El experimento se estableció en dos ciclos de cultivo de maíz. El primero ciclo correspondió al periodo primavera-verano, con siembra realizada el 8 de marzo de 2024, y el segundo al ciclo otoño-invierno, con siembra el 15 de septiembre de 2024. Durante ambos ciclos se aplicaron riegos por goteo en las etapas vegetativas, llenado de grano, hasta llegar a la etapa de la maduración fisiológica de la mazorca de maíz.

El riego se realizó mediante un sistema de riego por goteo, con una presión de 10 bar. Durante el ciclo primavera-verano 2024, el cultivo se regó dos veces por semana con una duración de una hora y media por evento durante los meses de marzo, abril; mientras que en los meses de mayo, junio y julio el riego se aplicó dos veces por semana con una duración de tres horas por evento.

En el ciclo otoño-invierno, el riego se realizó dos veces por semana con una duración de tres horas por evento durante los meses de septiembre y octubre; en

los meses de noviembre, diciembre, enero, febrero, marzo y abril, el riego se aplicó dos veces por semana con una duración de una hora y media por evento.

Por otra parte, en el primer ciclo se cosechó el 30 de agosto de 2024, mientras que en el segundo ciclo se llevó a cabo el 15 mayo de 2025. La cosecha se realizó manualmente, y las mazorcas se depositaron en costales para posteriormente evaluar las variables establecidas.

#### **7.4.3. Densidad de siembra del cultivo de maíz azul**

La densidad de siembra de maíz se estableció conforme a la metodología propuesta por Díaz-Huacuz et al. (2017), con modificaciones. Se utilizó una distancia de 1.0 metro entre surcos y cada 25 cm se depositaron dos semillas en el surco, lo que resultó en una densidad de 80,000 plantas por hectárea.

Se determinó la densidad de siembra, con la siguiente ecuación:

$$DS = \frac{10,000 \text{ m}^2}{DH: 1 \text{ m} \times DP: 0.25\text{m}} = 40,000 \times 2 = 80,000$$

DS: densidad de siembra (10,000 m<sup>2</sup>)

DH: distancia ente hileras o surcos

DP: distancia entre plantas

#### **7.4.4. Análisis fisicoquímicos del suelo**

Al inicio del primer ciclo de cultivo, correspondiente al periodo primavera-verano de 2024, se delimitaron con rafia las parcelas correspondientes a cada tratamiento (Figura 4) y se tomaron tres muestras de suelo por parcela (considerando seis

tratamientos con tres repeticiones cada uno), en tres puntos diferentes dispuestos en forma diagonal, a una profundidad de 0 a 25 cm, utilizando un barreno. A partir de estas submuestras se elaboraron mezclas compuestas por tratamiento, las cuales fueron llevadas al Laboratorio de Agua y Suelo del Instituto de Ciencias Agrícolas-UABC. En estas muestras se determinaron las variables presentadas en las Tablas 4 a 7. La interpretación de las propiedades del suelo se realizó conforme a lo establecido en la Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000 (DOF, 2002; IPNI, 1990).

**Tabla 4.** Propiedades texturales del suelo

Parámetro	Valor (%)	Desviación estándar	Clase textural
Arena	0.77	± 0.32	
Limo	26.03	± 1.03	Arcilla
Arcilla	73.62	± 1.00	

**Tabla 5.** Análisis químico de cationes, aniones y sólidos disueltos

Parámetro	Concentración (mg L <sup>-1</sup> )	Desviación estándar
Porcentaje de saturación (%)	19.40	± 3.89
Magnesio (Mg <sup>2+</sup> )	52.53	±14.28
Sodio (Na <sup>+</sup> )	823.22	±48.22
Bicarbonato (HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	65.05	±6.30
Cloruro (Cl <sup>-</sup> )	70.87	±0.08
Sulfato (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	1817.18	±157.22
Sólidos disueltos totales (SDT)	2848.26	±128.53

**Tabla 6.** Análisis químico relacionado con la salinidad

Parámetro	Valor	Desviación estándar
Porcentaje de saturación (%)	67.25	± 0.52
Conductividad eléctrica (CE, dS·m <sup>-1</sup> )	4.22	± 0.37
pH	8.71	± 0.07

**Tabla 7.** Análisis químico de fertilidad del suelo

Parámetro	Valor	Desviación estándar
Nitrato (N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ) (mg·kg <sup>-1</sup> )	10.46	± 2.48
Fósforo (P) (mg·kg <sup>-1</sup> )	1.49	± 0.31
Potasio (K) (mg·kg <sup>-1</sup> )	6.78	± 2.02
Materia orgánica (MO) (%)	0.32	± 0.09

Con base a los resultados del análisis de suelo, el cultivo de maíz azul se estableció en un suelo de textura arcillosa, compuesto por 0.8 % de arena, 24.7 % de limo y 74.5 % de arcilla. El pH promedio fue de 8.71 ( $\pm 0.03$ ), la conductividad eléctrica (CE) de 4.22 dS m<sup>-1</sup> ( $\pm 0.125$ ), y el porcentaje de materia orgánica (MO) tuvo un valor de 0.315 ( $\pm 0.0328$ ).

De acuerdo con Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000, el suelo presenta un pH que lo clasifica como fuertemente alcalino, una CE característica de un suelo salino, y un contenido de MO  $\leq 0.5\%$ , lo que lo ubica en la categoría de muy bajo contenido de materia orgánica. Asimismo, los valores de nitrato, fósforo, potasio se encuentran en niveles muy bajos, insuficientes para cubrir las necesidades nutricionales del cultivo sin la aplicación de fertilizantes adicionales.

#### **7.4.5. Control de plagas en los dos ciclos de cultivo de maíz azul**

El control de plagas se llevó a cabo mediante métodos químicos, utilizando productos específicos según la especie a controlar, conforme a las recomendaciones de Pimentel Alvarado y Delgadillo Aldrete (2015). Las primeras aplicaciones se realizaron con equipo de aspersión tipo mochila, posteriormente, cuando las plantas superaron el metro de altura, se aplicó mediante el uso de un dron. En ambos ciclos del cultivo de maíz azul se identificaron los artrópodos presentes y se aplicaron los productos químicos siguiendo las indicaciones del fabricante en cuanto a dosis, frecuencia y condiciones de uso.

Según Ricci y Margaría (2022), los artrópodos de importancia agronómica se clasifican principalmente de acuerdo con el tipo de aparato bucal y su forma de alimentación sobre las plantas. El gusano cogollero (*Spodoptera frugiperda*), pertenece a la familia Noctuidae, es un insecto masticador que se alimenta del follaje, principalmente de cogollo de la planta. Su control se realizó con el insecticida Premio® 20 SC, cuyo ingrediente activo es el clorantraniliprol, una diamida recomendada para el manejo de plagas masticadoras.

En el caso de la pulga saltona (*Epitrix cucumeris*), insecto de hábito masticador de la familia Chrysomelidae que se alimenta del follaje, se observaron hojas con puntos amarillos característicos. Su control se efectuó mediante el uso del insecticida Muralla Max® de Bayer, que contiene Imidacloprid (sistémico) absorbido por la planta y Betacyfluthrin (de contacto), combinación que proporciona un control eficaz por su doble modo de acción.

Finalmente, para el control del pulgón (*Rhopalosiphum maidis*), de hábito alimenticio picador-suctor (o raspador -suctor), perteneciente a la familia la Aphididae, y que se alimenta de la savia del maíz, se utilizó el insecticida Mustang Max®, cuyo ingrediente activo es la zeta-cipermetrina, un piretroide que actúa por contacto e ingestión.

#### **7.4.6. Control de maleza en los dos ciclos**

El manejo de malezas se realizó de forma manual, utilizando herramientas como azadón y pala. Las labores se llevaron a cabo de manera periódica durante el desarrollo del cultivo de maíz, con la finalidad de reducir la competencia por luz, agua y nutrientes.

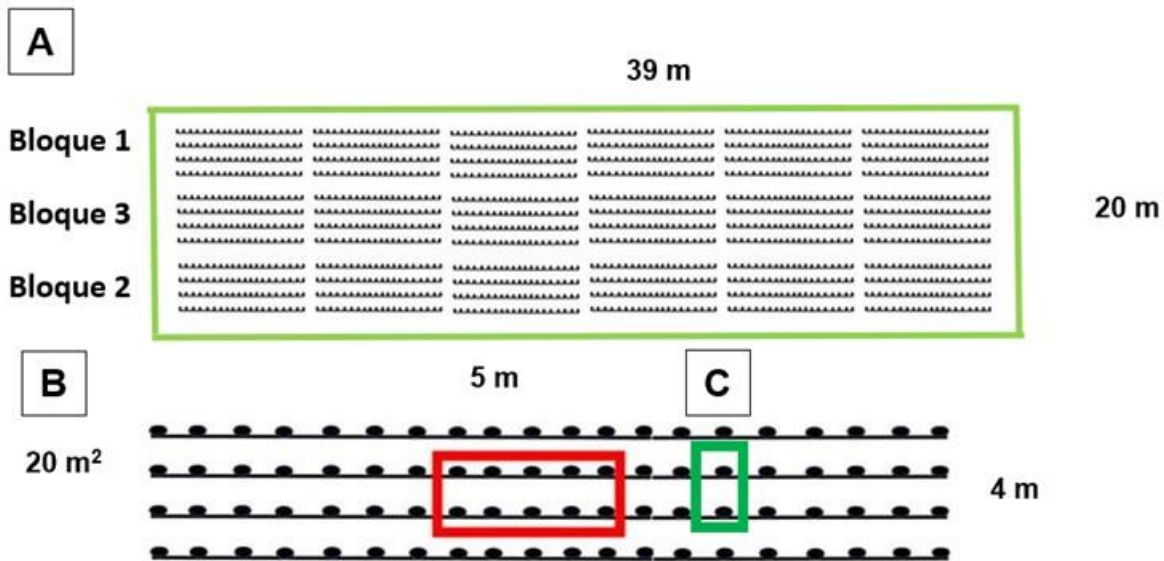
#### **7.4.7. Diseño y establecimiento del experimento en campo**

En el experimento se contemplaron seis tratamientos, los cuales se establecieron bajo un diseño experimental de bloques completamente al azar (DBCA) con tres repeticiones. La unidad experimental de cada tratamiento consistió en cuatro surcos de 5 m de largo por 1.0 m de ancho, cubriendo una superficie de 20 m<sup>2</sup> por parcela (Figura 4).

Por cada tratamiento se seleccionaron diez plantas de la parte central de cada parcela, como se muestra en la Figura 4B, con el fin de evitar el efecto de borde. A estas plantas se les realizaron las mediciones correspondientes para evaluar la altura en diferentes etapas de desarrollo, así como el índice de verdor unidades SPAD en algunas plantas seleccionadas al azar (tres plantas por repetición).

Después de la cosecha, se evaluaron diez mazorcas provenientes de las 10 plantas previamente seleccionadas con el propósito de determinar las variables: longitud y diámetro de la mazorca, número de hileras por mazorca, número de granos por mazorca, peso de grano por mazorca y olote.

Por otra parte, se seleccionaron tres plantas a los 134 días después de la siembra como se muestra en la Figura 4C. Estas se cortaron con un machete desde la base, se separaron las hojas del tallo de la planta y se pesaron. El tallo, junto con la espiga y la mazorca, se trozaron para obtener el peso fresco. Posteriormente, las muestras se colocaron en bolsas de papel con perforaciones y se sometieron a secado durante siete días a una temperatura de 75°C, con el fin de determinar el peso seco.



**Figura 4.** Esquema del diseño experimental: A) Distribución de los seis tratamientos con 3 repeticiones. B) Rectángulo de color rojo indica el área de la parcela donde se evaluarán diez plantas para determinar la altura, índice de verdor (SPAD), las características de la mazorca y rendimiento. C) El rectángulo verde señala el área donde se cortaron tres plantas para evaluar altura, peso fresco y seco del maíz azul.

El día de la siembra, se depositaron manualmente dos semillas cada 25 cm, a una profundidad de 5 cm. Se sembraron 40 semillas por surco y, considerando que cada tratamiento cuenta con cuatro surcos, el total fue de 160 semillas por tratamiento. La superficie total donde se estableció el ensayo mide 39 m de largo y 20 m de ancho, abarcando un área de 780 m<sup>2</sup>. Esta medida incluye los caminos de 1 m que separan **cada** tratamiento dentro del bloque, así como los espacios de 2 m entre bloques, además 2 m a la periferia donde se estableció el ensayo como se detalla en la Tabla 8.

**Tabla 8.** Características del diseño del área de siembra de maíz azul.

Características del diseño experimental	Tamaño del diseño experimental
Distancia entre surcos	1 m
Número de surcos por tratamiento	4
Repeticiones por tratamiento	3
Número total de surcos	72
Ancho de una parcela	4 m
Largo de la parcela	5 m
Área de cada parcela	20 m <sup>2</sup>
Espacio entre cada tratamiento	1.0 m
Espacio entre cada bloque	2.0 m
Espacio excedente a la periferia	2.0 m
Distancia entre plantas	0.25 m
Número de semillas sembradas manualmente	2
Semillas por surco	40
Total de semillas	2880
Número total de plantas a evaluar en cada tratamiento.	30
Área total	780 m <sup>2</sup>

### **SECCIÓN 3. EVALUACIONES EN PLANTAS Y MAZORCA**

#### **7.5. Variables evaluadas en las plantas de maíz azul y mazorcas**

Las siguientes variables fueron evaluadas en dos ciclos de cultivo: el primero durante el ciclo primavera-verano 2024, y el segundo en el ciclo otoño-inverno 2024.

Para la variable altura de planta a la última hoja ligulada, se consideraron diez plantas por repetición de cada tratamiento. En el caso del índice SPAD, se tomaron datos de tres plantas seleccionadas al azar: la primera y quinta del segundo surco,

y la diez del tercer surco. Estas plantas fueron seleccionadas al azar (sorteadas) de entre las diez plantas utilizadas para medir la altura, longitud de mazorca, diámetro de mazorca, número de hileras, granos por mazorca y otros análisis.

Por otra parte, se seleccionaron tres plantas por repetición de cada tratamiento para un análisis destructivo. Se tomaron tres plantas de los surcos dos y tres, ubicadas antes de las plantas seleccionadas para los demás análisis (Figura 4C). A estas se les midió la altura, peso fresco de hoja, y el peso fresco con tallo, espiga y mazorca. Posteriormente, se determinó su peso seco.

#### **7.5.1. Altura de planta**

Se midió a los 40, 70, 90 y 134 días después de siembra (DDS) desde la base del tallo hasta la hoja ligulada, utilizando un flexómetro. Los datos se expresaron en centímetros.

#### **7.5.2. Índice SPAD**

Se determinó el índice verdor (contenido de clorofila) en la quinta hoja de maíz, contando de arriba hacia abajo, considerada como una hoja madura, utilizando un medidor SPAD-502 Plus, un sistema portátil y no destructivo. Los valores obtenidos se expresan en unidades SPAD.

### **7.5.3. Peso fresco y seco de hoja y tallo**

Las plantas de maíz se cortaron a los 134 DDS, desde la base del tallo. A cada planta se le retiraron las hojas. El tallo se trozó, incluyendo la mazorca y la espiga. Las muestras se pesaron en una báscula (OHAUS Defender de 150 lbs) para obtener el peso fresco (g). Cada una de las muestras se metió en bolsas de papel con perforaciones, las cuales se sometieron a un proceso de secado en un horno (Lab-Line, Ambi-Low Chamber, Livonia, MI, EE. UU) a 75°C durante 168 horas, y se registró el peso seco.

### **7.5.4. Longitud de mazorca y diámetro**

La longitud de la mazorca se midió con una cinta métrica y el diámetro en la parte media de la mazorca se determinó utilizando un vernier digital (Mitutoyo, Japón). Los datos se expresaron en centímetros.

### **7.5.5. Hileras por mazorca y granos por hilera**

Se contó el número de hileras por mazorca y la cantidad de granos por hilera.

### **7.5.6. Peso de grano por mazorca y olote**

Se desgranaron manualmente las mazorcas para obtener el peso de grano y del olote de los tratamientos de cada repetición para determinar el rendimiento. Los datos se expresaron en gramos.

## 7.6. Unidades térmicas acumuladas

Las unidades calor, también conocidas como grados día de desarrollo (GDD, por su sigla en inglés), constituyen una herramienta ampliamente utilizada para modelar el crecimiento y desarrollo fenológico del maíz.

Para esta investigación, se emplearon registros agroclimáticos del Sistema de Información Agroclimática de Baja California (SIMARBC), correspondientes al Ejido Nuevo León, municipio de Mexicali, B.C., sitio donde se establecieron las parcelas experimentales para el cultivo de maíz azul.

A partir de los datos de temperatura máxima y mínima obtenidos de la estación meteorológica para los dos periodos del experimento, se realizó un análisis descriptivo con el propósito de caracterizar las condiciones térmicas presentes en ambos ciclos de cultivo.

Para este cultivo, se consideraron una temperatura base ( $T_b$ ) 10 °C y una temperatura óptima ( $T_o$ ) de 30 °C, según lo establecido por Hou et al. (2014).

Los GDD se calcularon mediante la siguiente ecuación:

$$GDD = \sum \left[ \frac{(T_{Mmax} + T_{min})}{2 - T_b} \right]$$

Donde:

GDD representa los grados día de crecimiento acumulados, expresados en °C día.

$T_{max}$  y  $T_{min}$  son las temperaturas máximas y mínimas del aire, respectivamente

$T_b$  es la temperatura base umbral (10 °C), por debajo de la cual el crecimiento del cultivo es insignificativo, de acuerdo con lo reportado por McMaster y Wilhelm (1997).

### 7.7. Análisis químico proximal de las semillas de maíz azul

Se tomaron muestras de maíz de cada uno de los tratamientos, con sus respectivas repeticiones, en ambos ciclos de cultivo. Las semillas fueron trituradas en un molino (Thomas Model 4 Wiley Mill) con un tamiz de 1 mm. El análisis se realizó mediante espectroscopia de reflectancia en el infrarrojo cercano (NIR), utilizando un espectrómetro PerkinElmer DA 7250, el cual opera en un rango espectral de 950 a 1650 nm (Figura 5). Las determinaciones de humedad, proteína, almidón, grasas, fibra y cenizas se realizaron en el Laboratorio de Toxicología Analítica del Instituto de Investigaciones en Ciencias Veterinarias de la Universidad Autónoma de Baja California (IICV-UABC).



**Figura 5.** Proceso del grano de maíz azul para obtener una harina fina para el análisis proximal.

## 7.8. Cuantificación de antocianinas

La cuantificación de antocianinas totales (AT) en el grano de maíz azul se realizó mediante el método del pH diferencial propuesto por Giusti y Wrolstad (2001); Pino-Quivira, Domínguez Díaz y Saavedra (2018); Sugiharto, Rahman y Zainal (2020) con algunas modificaciones.

Las semillas secadas de forma natural en campo, se molieron en un molino (Thomas Wiley Mill Model 4), utilizando un tamiz de 1 mm. De cada repetición de los tratamientos bajo estudio se tomó un gramo de harina, la cual se colocó en un tubo de ensayo de vidrio con tapón roscado con capacidad de 15 mL. Se adicionaron 7 mL de etanol al 96% (C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH) acidificado a pH 2 con HCl 1N. La mezcla se agitó durante un minuto en un vortex (modelo XH-D Premier®, China) y se colocó durante 20 horas en un agitador magnético (modelo SK-0330-Pro, Vante Tecnología, China).

Posteriormente, se centrifugó a 5000 rpm durante 10 minutos; el sobrenadante se recolectó con una jeringa, se filtró a través de una membrana de 0.22 µm, y se depositó en tubo falcón. Se realizó una segunda extracción del residuo utilizando 2 mL de la solución extractora; la muestra se agitó nuevamente en el vortex, se centrifugó a 5000 rpm por 10 minutos, se filtró y el sobrenadante total se aforó a 10 mL con etanol acidificado, en cada tratamiento.

Para la cuantificación de las antocianinas totales (AT), se prepararon dos diluciones 1:10 de cada extracto, utilizando soluciones tampón: una con acetato (pH 4.5) y otra

con cloruro de potasio (KCl) a pH 1.0. Las muestras se dejaron en reposo durante 45 minutos en condiciones de oscuridad. Debido a que las antocianinas son altamente fotosensibles y susceptibles a una degradación hidrolítica en presencia de humedad (Otto et al., 2024), se trabajó en condiciones de oscuridad para evitar la degradación del compuesto.

Posteriormente, las muestras fueron centrifugadas y filtradas para eliminar impurezas. La absorbancia se midió a 510 y 700 nm utilizando un espectrofotómetro (Thermo Scientific, GENESYS 20), empleando agua destilada como blanco.

El contenido total de antocianinas, expresado en miligramos de equivalentes de cianidina-3glucósido por gramo de muestra ( $\text{mg EC-3-G g}^{-1}$ ), se determinó mediante la siguiente expresión:

$$\text{AT}(\text{mg EC3G g}^{-1}) = \frac{A \times \text{PM} \times \text{FD} \times V \times 1000}{\epsilon \times l \times \text{Pmu}}$$

AT: concentración de antocianinas totales mg equivalente de Cianidina -3 -glucósido g de muestra seca ( $\text{mg EC3G g}^{-1}$ )

A: absorbancia máxima: (A510-A700) pH 1 - (A510-A700) pH 4.5)

PM: peso molecular de Cianidina-3-glucósido,  $449.2 \text{ g mol}^{-1}$ .

FD: Factor de dilución total aplicado al extracto

$\epsilon$ : absorción molar de Cianidina-3-glucósido,  $26900 \text{ L cm}^{-1} \text{ mg}^{-1}$

Pmu: peso de la muestra para la extracción (g)

l: longitud de paso óptico de la cubeta 1cm

1000: factor de convertir gramos a miligramos

## **7.9. Análisis estadístico**

El análisis estadístico se llevó a cabo utilizando el Software SPSS, versión 23. Los datos obtenidos de las pruebas de germinación se sometieron a un análisis de varianza (ANOVA) bajo un diseño completamente al azar (DCA). Los datos de campo se analizaron bajo un diseño en bloques completamente al azar (DBCA) y un DCA. Para la comparación de medias se aplicó la prueba de Tukey ( $p < 0.05$ ).

Adicionalmente, se aplicó la prueba de t de Student para muestras independientes con el fin de identificar diferencias significativas en variables de interés entre los dos ciclos de cultivo de maíz azul.

## **VIII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **8.1. Prueba de germinación**

A los dos meses posteriores a la cosecha, las semillas de maíz azul presentaron un porcentaje de germinación del 98 % al séptimo día. De acuerdo con los criterios establecidos por la Asociación Internacional de Análisis de Semillas (ISTA, 2016), porcentajes de germinación superiores al 90 % indican alta calidad.

A los seis meses, se realizó la segunda prueba de germinación, en la cual se caracterizaron las soluciones de los seis tratamientos (testigo y extracto de algas a diferentes concentraciones) aplicados a las semillas de maíz (Tabla 9).

Los valores de pH no presentaron diferencias significativas entre tratamientos, manteniéndose en un rango de 5.26 y 5.30, lo que indica una solución moderadamente ácida sin importar la concentración del extracto aplicado.

En contraste, la conductividad eléctrica (CE) mostró diferencias significativas ( $p < 0.05$ ), incrementándose proporcionalmente con la concentración del extracto, con valores entre 0.26 a 1.26  $\text{mS cm}^{-1}$ , correspondientes a proporciones de 1:250 a 1:50.

Estos resultados son consistentes con lo reportado por Hernández-Herrera et al. (2023), quienes evaluaron cuatro extractos de algas marinas: *Eisenia arborea* y *Sargassum horridum*, observaron valores de pH alcalino entre 7.5 y 7.20 y baja conductividad eléctrica con valores de entre 0.68 y 0.86  $\text{mS cm}^{-1}$ , mientras que los de *Macrocystis pyrifera* y *Padina caulescens* mostraron valores de pH más ácidos en un rango de 5 a 5.9 y una CE más alta de 2.5 a 2.8  $\text{mS cm}^{-1}$ , respectivamente. Los autores indican que los tratamientos evaluados mostraron un efecto positivo en la germinación de semillas de tomate (*Solanum lycopersicum*), con excepción del extracto de *S. horridum*, el cual presentó un efecto inhibitorio. En este contexto, las concentraciones utilizadas en este estudio se encuentran dentro de los rangos considerados óptimos para el desarrollo inicial de las plántulas.

**Tabla 9.** Caracterización fisicoquímica de los tratamientos aplicados en la germinación de las semillas de maíz azul.

Tratamientos	pH	CE (mS cm <sup>-1</sup> )	Proporción
T1	5.26a	0.01f	-
T2	5.30a	0.26e	1:250
T3	5.30a	0.52d	1:125
T4	5.30a	0.84c	1:83.33
T5	5.30a	1.11b	1:62.5
T6	5.30a	1.26a	1:50

T1: testigo (agua destilada); T2 - T6: 0.4, 0.8, 1.2, 1.6 y 2.0 % (v/v) de extracto de algas. pH: potencial de hidrógeno; CE: conductividad eléctrica (mS cm<sup>-1</sup>). Las letras diferentes indican diferencias significativas, prueba de Tukey (p < 0.05).

Los resultados obtenidos en la segunda prueba de germinación, en la que se evaluó el efecto del bioestimulante sobre la germinación de semillas de maíz azul (Tabla 10), mostraron que no hubo diferencias significativas entre los tratamientos. Sin embargo, se obtuvo un porcentaje de germinación que varió entre 92 % y 98.67 %. Según los criterios establecidos por ISTA (2016), estos valores indican que las semillas son viables y de alta calidad.

**Tabla 10.** Efecto del extracto en germinación y desarrollo de las plántulas de maíz azul.

Tratamientos con extracto % v/v	G	LP (cm)		LRP (cm)		CNRS		PF (g)	PS (g)
	%	Día 4	Día 7	Día 4	Día 7	Día 4	Día 7	Total	
T1: H <sub>2</sub> O	97.33a	0.99e	4.70c	5.05d	11.84c	2.22c	3.53e	7.07f	1.35c
T2: 0.4	97.32a	2.16a	5.83a	7.45a	15.63a	2.97a	4.08cb	11.69a	1.71a
T3: 0.8	96.00a	2.01b	5.16b	7.02b	14.93b	2.82a	4.01c	10.11b	1.51b
T4: 1.2	93.33a	1.73c	4.31d	5.86c	12.15c	2.28c	4.41a	9.07c	1.39c
T5: 1.6	98.67a	1.38d	3.92e	5.14d	10.95d	2.65b	3.75d	7.57e	1.31d
T6: 2.0	92.00a	1.45d	4.63c	5.42d	11.26d	2.66b	4.20b	8.38d	1.35c

G: germinación; LP: longitud de plúmula; LRP: longitud de raíz principal; CNRS: conteo de raíces secundarias; PF: peso fresco; PS: peso seco. Las letras diferentes presentan diferencias significativas, prueba de Tukey ( $p < 0.05$ )

En la variable de longitud de plántula (LP), evaluada en los días cuatro y siete, el tratamiento T2 presentó los valores más altos, con 2.16 cm y 5.83 cm, respectivamente. De igual forma, en la longitud de raíz principal (LRP), T2 mostró los mayores valores, con 7.45 cm al día cuatro y 15.63 cm al día siete.

En cuanto al conteo de raíces secundarias (CNRS), el tratamiento T2 presentó el mayor valor al día cuatro, con un promedio de 2.97 raíces. Al día siete, el tratamiento T4 mostró el mayor desarrollo, con un valor de 4.41 raíces secundarias por plántula de maíz.

Los resultados obtenidos muestran un efecto positivo del bioestimulante a bajas concentraciones en el desarrollo de altura de la plúmula y el sistema radicular de las plántulas de maíz. Según Nabti, Jha y Hartmann (2017), los extractos de algas tienen un efecto estimulante en la germinación de semillas, alargamiento de brotes y raíces, así como la mejora de la absorción de nutrientes y agua.

Por otro lado, los tratamientos con más altas concentraciones del bioestimulante mostraron un efecto negativo sobre el desarrollo de la plúmula y el desarrollo radicular. Estos resultados coinciden con los reportados por Layek et al. (2016), quienes describieron efectos negativos en el desarrollo radicular al utilizar altas concentraciones de extractos de algas. En la variable de peso fresco y peso seco (Tabla 10), los tratamientos presentaron diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) con respecto al testigo. El tratamiento T2 obtuvo el mayor peso fresco con 11.69 g, y peso seco con 1.71 g.

Los resultados obtenidos muestran un efecto positivo en germinación, longitud de raíz, de plántula, números de raíces secundarias y de biomasa, lo cual puede atribuirse a los diferentes compuestos presentes en el extracto de algas. Los bioestimulantes de macroalgas marinas contienen micronutriente, macronutrientes, auxinas, citoquininas y giberelinas (Hashem, Mansour, El-Khawas y Hassanein, 2019; Hamed, El-Rhman, Abdel-Raouf y Ibraheem, 2018; Khan et al., 2009) que contribuyen al desarrollo de las plántulas de maíz. Además, promovieron el crecimiento radicular y aéreo en etapas tempranas del desarrollo vegetativo, efecto atribuible al contenido de fitohormonas, según lo señalan las investigaciones consultadas.

Las cuales regulan procesos fisiológicos clave en las plantas (Craigie, 2011). Las auxinas estimulan la elongación celular, formación de raíces, mientras que las giberelinas activan enzimas hidrolíticas como la  $\alpha$ -amilasa que moviliza las reservas del endospermo para impulsar el crecimiento embrionario (Espinosa-Antón, Gómez-Pando y Álvarez-Castro, 2020; Nabti, et al., 2017). Además, estos reguladores de crecimiento estimulan la germinación de las semillas, ruptura de la latencia, y promueven un crecimiento uniforme de las plántulas de *Theobroma cacao* L. (Freire y Celi, 2024). Por ello, se considera que las giberelinas son las principales reguladoras del inicio de la germinación y especialmente tras periodos largos de almacenamiento de las semillas.

## **8.2. Primer ciclo de cultivo en primavera – verano (2024)**

El primer ciclo de cultivo se desarrolló del 8 de marzo al 30 de agosto de 2024, con una duración de 176 días. Los resultados obtenidos se presentan a continuación, organizados según las variables evaluadas: altura de planta a la hoja ligulada, índice de verdor, biomasa de planta, parámetros morfológicos de la mazorca (longitud, diámetro, número de hileras y de granos por hilera), parámetros de rendimiento (peso del grano y del olote), composición nutricional del grano y contenido de antocianinas. Esta organización permite indicar los resultados que se van a presentar en esta sección.

### **8.2.1. Caracteres morfológicos vegetativos e índice de verdor**

En la Tabla 11 se presentan los datos obtenidos de la altura de las plantas a los 40, 70 y 90 días después de la siembra (DDS), así como el índice de verdor a los 92 DDS.

**Tabla 11.** Efecto de la fertilización química y el extracto de algas sobre la altura de planta (cm) y el índice verdor (unidades SPAD) en maíz azul, ciclo primavera-verano 2024.

Tratamientos	Altura de planta -última hoja ligulada (cm)			Índice de verdor (unidades SPAD)
	Día 40	Día 70	Día 90	92 días
T1: control	9.19b	124.33b	207.40b	41.66d
T2: 240-80-60 kg ha <sup>-1</sup>	11.50a	149.60a	238.80a	61.00b
T3: 240-80-60 kg ha <sup>-1</sup> 6 L ha <sup>-1</sup> de extracto	9.69b	153.43a	239.80a	69.32a
T4: 180-60-45 kg ha <sup>-1</sup> 6 L ha <sup>-1</sup> de extracto	9.71b	143.26a	244.20a	73.56a
T5: 120-40-30 kg ha <sup>-1</sup> 6 L ha <sup>-1</sup> de extracto	10.35ab	153.33a	244.03a	53.28c
T6: 60-20-15 kg ha <sup>-1</sup> 6 L ha <sup>-1</sup> de extracto	9.93b	147.56a	244.10a	56.73bc

Las letras diferentes en la misma columna presentan diferencias significativas, prueba de Tukey ( $p < 0.05$ )

Los tratamientos presentaron diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) con respecto al testigo en la variable altura de planta a la última hoja ligulada, evaluada a los 40, 70 y 90 días después de la siembra (DDS). El tratamiento T2 presentó la mayor altura

a los 40 días, con un valor de 11.50 cm, lo que representa un incremento del 25.1% respecto al testigo (9.19 cm).

A los 70 días, todos los tratamientos con fertilización química y extracto de algas superaron significativamente al testigo, destacando T3 con 153.43 cm, con un incremento del 23.4% respecto al testigo (124.33 cm).

A los 90 días, el T4, con 244.20 cm, con un incremento de 17.7% respecto al testigo (207.40 cm). Estos valores de altura de planta se encuentran dentro del rango reportado por Caballero-Salinas et al. (2023) para variedades nativas de maíz: Tuxpeño (209.7 cm), Olotillo (260.6 cm), Oaxaqueño (263.3cm), Campeón (217.7 cm) y As (218.8 cm).

Respecto al índice de verdor (unidades SPAD) a los 92 DDS, también se registraron diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) con respecto al testigo. Los tratamientos T3 y T4, que incluyen fertilización química al 100 % y 75 % más el extracto de algas marinas, no presentaron diferencias significativas entre sí; sin embargo, presentaron los valores más altos con 69.32 y 73.56 unidades SPAD, lo que representa incrementos de 66.39 % y 76.57 % respecto al testigo (41.66 unidades SPAD).

Esto indica un adecuado contenido de clorofila y disponibilidad de nitrógeno, como lo sugiere Castellanos-Reyes et al. (2017), quienes señalan que valores mayores a 50 unidades SPAD durante la floración favorecen la translocación de nutrientes,

logrando un buen llenado de grano y rendimiento, lo cual coincide con el cultivo de maíz debido a que está en la etapa de llenado de grano.

### **8.2.2. Altura de plantas y biomasa producida**

El análisis de la altura de las plantas de maíz azul a los 134 DDS no presentó diferencias significativas entre tratamientos (Tabla 12). No obstante, se registraron valores mínimos de 255 cm y máximos de 294.3 cm. Los resultados obtenidos difieren ligeramente de lo reportado por Gómez-Montiel et al. (2017), quienes señalan que la variedad mejorada de maíz azul 'V-239 AZ' presenta un porte intermedio, con alturas que varían entre 261 a 285 cm, inferiores a las de los maíces criollos, como el evaluado en este estudio, tienden a presentar una mayor altura en comparación con las variedades mejoradas.

**Tabla 12.** Efecto de la fertilización química y extracto de algas sobre la altura de planta y biomasa del maíz azul a 134 DDS, primer ciclo primavera-verano 2024.

Tratamientos	AP	PFH	PSH	PFT	PST
	cm	(g)	(g)	(g)	(g)
134 días de la siembra					
T1: control	262.66a	132.34b	51.94b	432.98b	122.84c
T2: 240-80-60 kg ha <sup>-1</sup>	272.55a	184.51ab	64.68ab	507.40b	122.62c
T3: 240-80-60 kg ha <sup>-1</sup> 6 L ha <sup>-1</sup> de extracto	268.66a	197.30ab	69.18ab	595.08ab	136.22bc
T4: 180-60-45 kg ha <sup>-1</sup> 6 L ha <sup>-1</sup> de extracto	283.33a	219.37a	76.76a	718.41ab	201.71ab
T5: 120-40-30 kg ha <sup>-1</sup> 6 L ha <sup>-1</sup> de extracto	255.0a	191.48ab	78.13a	632.88ab	205.20a
T6: 60-20-15 kg ha <sup>-1</sup> 6 L ha <sup>-1</sup> de extracto	294.33a	237.73a	78.80a	798.58a	241.82a

Las letras diferentes presentan diferencias significativas, según la prueba de Tukey ( $p < 0.05$ ). AP: Altura de las plantas; PFH: peso fresco de hojas; PSH: Peso seco de hoja; PFT: peso fresco de tallo (espiga + mazorca); PST: peso seco de tallo (espiga + mazorca)

Por otra parte, se observaron diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) entre los tratamientos en las siguientes variables. En peso fresco de hojas (PFH), los tratamientos T4 y T6 presentaron valores de 219.37 g y 237.73 g, respectivamente, lo que representó un incremento del 65.76 % y 79.64 %, con el testigo (132.34 cm).

En cuanto al peso seco de hojas (PSH), los tratamientos T5 y T6 obtuvieron los mayores pesos, con 78.13 g y 78.80 g, con incrementos de 50.42 % y 51.71 %, con el testigo (51.94 g). Para las variables de peso fresco de tallo (PFT) y peso seco de tallo (PST), el tratamiento T6 registró 798.58 g PFT y 241.82 g en PST. Este tratamiento destacó por presentar los valores más altos de biomasa, con incrementos del 84.44 % en peso fresco de tallo y del 96.86% en peso seco de tallo, en comparación con el testigo, que presentó 432.98 g de PFT y 122.84 g de PST.

Al comparar los resultados de PFH y PFT con los reportados por Rodríguez-Larramendi (2016), quien evaluó cuatro variedades de maíz a los 60 días después de la siembra, se observaron los siguientes valores: Campeón (196.67 g de hoja y 423.33 g de tallo), Negro (206.33 g hoja y 450.66 g tallo), Jarocho (126.67 g de hoja y 763.33 g de tallo) y Macho (150.0 g de hoja y 293.33 g de tallo). A pesar de que son diferentes variedades y el tiempo de cultivo, los resultados de nuestros tratamientos muestran valores comparables.

### **8.2.3. Características de la mazorca y rendimiento**

En la Tabla 13 se presentan los resultados de los parámetros morfológicos y de rendimiento de las mazorcas de maíz azul. La variable de longitud de la mazorca (LM) mostró diferencias significativas ( $P < 0.05$ ) en los tratamientos T4, T5 y T6 en comparación con el testigo. Estos tratamientos presentaron las mayores longitudes promedio, con 12.96 cm, 12.91 cm y 12.94 cm, lo que representa incrementos del 17.71 %, 17.26 % y 17.53 %, respecto al testigo, que registró 11.01 cm.

Estos resultados difieren de los reportados por López-Morales et al. (2020), quienes registraron valores promedio de la longitud de mazorca en maíces Tuxpeños de 15.08, 15.40 y 15.27 cm. En contraste, Santiago-López et al. (2017) reportaron una longitud de mazorca en maíz Tuxpeño de 8.2 cm en el primer ciclo de cultivo, incrementándose a 12.7 cm en el séptimo ciclo, cultivados en Texcoco, Estado de México, bajo condiciones de temporal. Estos resultados coinciden parcialmente con los de la presente investigación, debido a que se trabajó con la variedad Tuxpeño.

Por otro lado, las variables diámetro de mazorca (DM), número de hileras por mazorca (HM) y granos por hilera (GH) no presentaron diferencias significativas entre tratamientos (Tabla 12). Los valores obtenidos coinciden con lo reportado por López-Morales et al. (2021) para DM con los valores de 4.17, 4.47 y 4.03 cm, y HM con 13.69, 15.35 y 12.94, en maíces Tuxpeños cultivados en diferentes ambientes.

Respecto a GH, Santiago-López et al. (2017) reportaron promedios de 26.3 y 30, indicando un aumento en esta característica agronómica con el avance de los ciclos de selección.

En la variable peso de grano por mazorca (PG), los tratamientos T2, T3 y T4 no presentaron diferencias significativas ( $P < 0.05$ ) entre sí, y alcanzaron los valores más altos con 45.10 g, 42.33 g y 47.59 g, respectivamente. Estos valores representan incrementos de 120.43 %, 106.89 % y 132.60 %, con respecto al testigo (20.46 g).

En cuanto al peso de olote (PO), el tratamiento T5 destacó con 23.95 g, mostrando un incremento del 46.57 % con respecto al testigo (16.34 g).

Respecto al rendimiento de grano, y considerando una densidad de siembra de 80,000 plantas ha<sup>-1</sup>, los tratamientos T2, T3 y T4 no presentaron diferencias significativas entre sí.

Estos tratamientos registraron los rendimientos más altos, con 3488, 3386.40 y 3807.73 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente, lo que representó incrementos del 128.4 %, 121.7 % y 149.3 % en comparación con respecto al testigo (1527.33 kg ha<sup>-1</sup>).

Estos resultados evidencian que es posible reducir la fertilización química al 75 % y complementarla con el extracto de algas (6 L ha<sup>-1</sup>) sin afectar el rendimiento, como se observó en el tratamiento T4.

**Tabla 13.** Efecto de la fertilización química y el extracto de algas sobre parámetros morfológicos y de rendimiento de la mazorca de maíz azul, primer ciclo primavera-verano 2024.

Tratamientos	LM	DM	HM	GH	PG	PO	Ren
	cm		conteo			g	Kg ha <sup>-1</sup>
T1: control	11.01b	4.08a	13.60a	21.97a	20.46c	16.34b	1527.33c
T2: 240-80-60 kg ha <sup>-1</sup>	12.11ab	4.18a	13.73a	25.77a	45.10a	18.72ab	3488.00a
T3: 240-80-60 kg ha <sup>-1</sup> ; 6 L ha <sup>-1</sup> extracto	11.95ab	4.25a	14.07a	24.60a	42.33a	19.71ab	3386.40a
T4: 180-60-45 kg ha <sup>-1</sup> ; 6 L ha <sup>-1</sup> extracto	12.96a	4.14a	13.97a	25.60a	47.59a	20.01ab	3807.73a
T5: 120-40-30 kg ha <sup>-1</sup> ; 6 L ha <sup>-1</sup> extracto	12.91a	4.23a	13.40a	24.37a	29.59b	23.95a	2367.46b
T6: 60-20-15 kg ha <sup>-1</sup> ; 6 L ha <sup>-1</sup> extracto	12.94a	4.15a	12.97a	24.33a	23.36bc	20.44ab	1806.66c

LM: Longitud de mazorca; DM: Diámetro de mazorca; HM: Hileras en mazorca; GH: granos en hilera; PG: peso grano; Ren: rendimiento y PO: peso de olote. Letras diferentes presentan diferencias significativas, Tukey (p < 0.05).

Los rendimientos obtenidos en este estudio se encuentran dentro del intervalo reportado por Caballero Salinas et al. (2023), quienes evaluaron cinco variedades de maíz criollo (Tuxpeño, Olotillo, Oaxaqueño, Campeón y AS) y obtuvieron valores de 2470 a 5370 33 kg ha<sup>-1</sup>, con una densidad de siembra de 50,000 plantas ha<sup>-1</sup>. Las diferencias observadas pueden atribuirse no solo a la menor densidad de siembra, sino también al uso exclusivo de biofertilizantes y extractos vegetales, sin agroquímicos.

El maíz es un recurso con una alta variabilidad genética, característica de los maíces criollos (Rocandio-Rodríguez et al., 2020; Chñapek et al., 2024), que les permite responder de manera diferenciada a las condiciones ambientales y de manejo.

Durante el cultivo del maíz azul se observó que algunas plantas presentaron una desincronización floral, con la aparición de la flor masculina a los 75 días y la femenina a los 82 días después de la siembra. No obstante, algunas plantas no presentan esta problemática.

Esta asincronía afectó la polinización, reduciendo el número de granos por mazorca. Es probable que este fenómeno esté asociado a las altas temperaturas registradas en el Valle de Mexicali, Baja California. En este sentido, Shim y Lee (2017) señalan que la temperatura influye en la duración de la antesis y en el proceso de llenado de granos. Por otra parte, Caballero Salinas et al. (2023) reportaron floración precoz en el maíz Tuxpeño, con la aparición de flor masculina a los 62 días y femenina a

los 64 días. Esta diferencia evidencia el efecto del ambiente sobre la sincronía floral.

#### **8.2.4. Composición química del grano de maíz azul**

En la Tabla 14 se presentan los resultados del análisis bromatológico de la harina del maíz azul cultivado en el primer ciclo. En términos generales, las variables evaluadas muestran diferencias significativas ( $p < 0.05$ ). El contenido de humedad oscila entre 7.66 % y 8.18 %, lo cual refleja un bajo contenido de agua en las semillas. En estudios previos, García-Campos et al. (2020) reportaron un valor de 12.95 % de humedad en las muestras de maíz azul, lo que sugiere posibles diferencias atribuibles al tiempo de secado del grano.

Por otra parte, en cuanto al contenido de proteínas, el tratamiento T3 registró el valor más alto, con 12.80 %, lo que representa un incremento del 13.88 % respecto al testigo (11.24 %), superando lo reportado por García-Campos et al. (2020), quienes obtuvieron un 8.81 % de proteína en maíz azul.

Respecto al contenido de grasas, el tratamiento T6 presentó el valor más alto, con 4.59 %, mostrando un incremento del 1.5 % respecto al testigo (4.52 %). Estos resultados son superiores a los reportados por Agama- Acevedo et al. (2013), quienes informaron un valor de 3.7 % en maíz azul.

**Tabla 14.** Análisis proximal de la harina de maíz azul del primer ciclo primavera-verano 2024.

Tratamientos	Humedad	Proteínas	Grasas	Fibra	Almidón	Cenizas
	%					
T1: control	7.83a	11.24d	4.52ab	1.76b	61.90a	0.803ab
T2: 240-80-60 kg ha <sup>-1</sup>	7.66a	12.34ab	4.17ab	2.08ab	61.23ab	0.846ab
T3: 240-80-60 kg ha <sup>-1</sup> ; 6 L ha <sup>-1</sup> de extracto	8.10a	12.80a	4.40ab	2.15a	58.97d	0.826ab
T4: 180-60-45 kg ha <sup>-1</sup> ; 6 L ha <sup>-1</sup> de extracto	8.11a	12.43ab	4.05b	1.93ab	59.74cd	0.713b
T5: 120-40-30 kg ha <sup>-1</sup> ; 6 L ha <sup>-1</sup> de extracto	8.18a	11.65cd	4.20ab	1.99ab	59.79cd	0.710b
T6: 60-20-15 kg ha <sup>-1</sup> ; 6 L ha <sup>-1</sup> de extracto	7.98a	12.16bc	4.59a	1.94ab	60.58bc	0.866a

Letras diferentes presentan diferencias significativas, Tukey (p < 0.05).

En cuanto a la fibra, el tratamiento T3 mostró el valor más alto, con 2.15 %, lo que representa un incremento de 22.22 % respecto al testigo (1.76 %). Por otro lado, Mutlu et al. (2018) reportaron valores de 2.68 % de fibra en maíz azul.

En lo que respecta al almidón, el tratamiento T1 (testigo) presentó el valor más alto, con 61.90 %, sin mostrar incrementos respecto a los demás tratamientos. En un estudio similar, Agama Acevedo et al. (2013) analizaron el almidón de maíz azul y reportaron un contenido ligeramente mayor de 64.9 %. Esta diferencia puede atribuirse a la variabilidad genética del maíz y a las condiciones ambientales.

En relación con el contenido de cenizas, el tratamiento T6 presentó el valor más alto, con 0.86 %, lo que representa un incremento del 7.85 % respecto al testigo (0.803 %). Estos resultados son menores que los reportados por García-Campos et al. (2020), quienes registraron valores de cenizas en maíz azul comprendidos entre 1.38 a 1.68 %. Según Mex- Álvarez et al. (2016), estas diferencias podrían deberse a la fertilización usada y condiciones ambientales en el cultivo.

#### **8.2.5. Contenido de antocianinas de la harina de maíz azul**

El contenido de antocianinas totales en la harina de maíz azul correspondiente al primer ciclo de cultivo se presenta en la Tabla 15. En general, los seis tratamientos evaluados mostraron diferencias significativas ( $p < 0.05$ ). El tratamiento T0 (referencia: maíz blanco) y tratamiento T1 (testigo: maíz azul sin fertilización ni aplicación de extracto) registraron los valores más bajos, con 2 mg CGE kg<sup>-1</sup> y 344

mg CGE kg<sup>-1</sup>, respectivamente (miligramos/equivalente de cianidina-3-glucósida por kilogramo).

**Tabla 15.** Contenido de antocianinas en la harina del maíz azul del primer ciclo de cultivo, primavera -verano 2024.

Tratamientos	Antocianinas Totales
	mg kg <sup>-1</sup>
T0: control maíz blanco	2f
T1: Testigo sin fertilización	344e
T2: 240-80-60 kg ha <sup>-1</sup>	574d
T3: 240-80-60 kg ha <sup>-1</sup> ; 6 L ha <sup>-1</sup> de extracto	986a
T4: 180-60-45 kg ha <sup>-1</sup> ; 6 L ha <sup>-1</sup> de extracto	856b
T5: 120-40-30 kg ha <sup>-1</sup> ; 6 L ha <sup>-1</sup> de extracto	737c
T6: 60-20-15 kg ha <sup>-1</sup> ; 6 L ha <sup>-1</sup> de extracto	589d

Letras diferentes presentan diferencias significativas, Tukey ( $p < 0.05$ )

Se observó que los tratamientos T3 a T6, que incluyeron distintos niveles de fertilización química (100, 75, 50 y 25 %), así como la aplicación de extracto de algas marinas (NPKelp®) en la dosis sugerido por el proveedor, incrementaron significativamente el contenido de antocianinas en comparación con el tratamiento testigo (T1) y el tratamiento T2 (fertilización química al 100%, sin extracto de algas).

El tratamiento T3 registró el valor más alto de antocianinas monoméricas, con 986 mg CGE kg<sup>-1</sup>, superando lo reportado por Mutlu et al. (2018), quienes obtuvieron un contenido total de antocianinas de 915.43 mg CGE kg<sup>-1</sup> en harina de maíz azul.

Los incrementos de antocianinas en los tratamientos T3 a T6 podría atribuirse a los compuestos presentes en el extracto y a la fertilización química, lo que sugiere un efecto sinérgico y representa una alternativa para mejorar la calidad nutracéutica del maíz azul. En este contexto, Vaghela et al. (2023) mencionan mejoras en rendimiento en el cultivo de maíz al ser tratadas con extracto de algas marinas en concentraciones bajas (0.7 %) y los atribuyen a los compuestos bioactivos que contienen. Al respecto, el extracto que estamos evaluando, podrían estar favoreciendo la ruta metabólica de la síntesis de antocianinas.

### **8.3. Segundo ciclo de cultivo en otoño – invierno 2024**

El segundo ciclo de cultivo se desarrolló del 15 de septiembre de 2024 al 15 de mayo de 2025, con una duración de 245 días. Los resultados obtenidos se presentan a continuación, organizados según las mismas variables evaluadas en el estudio: altura de planta a la hoja ligulada, índice de verdor, biomasa de planta, parámetros morfológicos de la mazorca (longitud, diámetro, número de hileras y de granos por hilera), parámetros de rendimiento (peso del grano y del olote), composición nutricional del grano y contenido de antocianinas. Esta organización permite indicar los resultados que se van a presentar en este apartado.

### **8.3.1. Caracteres morfológicos vegetativos e índice de verdor**

En la Tabla 16 se muestran los resultados de la variable altura de planta en tres momentos de desarrollo (40, 70 y 90 días después de la siembra (DDS), y del índice de verdor a los 92 DDS.

Los tratamientos mostraron diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) con respecto al testigo en los tres momentos de evaluación. A los 40 días, el tratamiento T6 registró la mayor altura, con 44.23 cm hasta la última hoja ligulada. A los 70 días, el tratamiento T2 alcanzó la mayor altura, con 139.26 cm, mientras que a los 90 días los tratamientos T2 a T6 obtuvieron mayores alturas en comparación con el testigo, destacando el T6 con 236 cm.

**Tabla 16.** Efecto de la fertilización química y extracto de algas marinas sobre la altura de las plantas de maíz (*Zea mays* L.). Segundo ciclo verano-invierno 2024.

Tratamientos	Altura de planta -última hoja ligulada (cm)			Índice verdor (unidades SPAD)
	Día 40	Día 70	Día 90	92 días
	T1: Testigo sin fertilización	19.50e	114.00c	203b
T2: 240-80-60 kg ha <sup>-1</sup>	27.33d	139.26a	226a	45.57a
T3: 240-80-60 kg ha <sup>-1</sup> 6 L ha <sup>-1</sup> de extracto	35.40c	131.50ab	227a	47.55a
T4: 180-60-45 kg ha <sup>-1</sup> 6 L ha <sup>-1</sup> de extracto	42.23b	127.03b	229a	46.96a
T5: 120-40-30 kg ha <sup>-1</sup> 6 L ha <sup>-1</sup> de extracto	41.27b	135.60ab	232a	46.77a
T6: 60-20-15 kg ha <sup>-1</sup> 6 L ha <sup>-1</sup> de extracto	44.23a	138.80a	236a	46.58a

Letras diferentes presentan diferencias significativas, Tukey (p<0.05)

Los resultados obtenidos difieren parcialmente de los reportados por Rodríguez Larramendi et al. (2016), quienes evaluaron la variedad de maíz Campeón y observaron alturas máximas a los 40 y 60 días después de la siembra, con valores de 183 y 236 cm, respectivamente. Esta diferencia puede atribuirse al uso de una variedad diferente y al manejo agronómico.

En cuanto al índice de verdor (unidades SPAD) a los 92 DDS, los tratamientos mostraron diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) con respecto al testigo. El tratamiento T3 registró el valor más alto, con 47.55 unidades SPAD (Tabla 16). Estos resultados se asocian con una adecuada nutrición nitrogenada, aun cuando la fertilización química se redujo hasta un 25 %, manteniéndose constante la aplicación del extracto de algas ( $6 \text{ L ha}^{-1}$ ). De acuerdo con Castellanos-Reyes et al. (2017), el valor máximo registrado fue de 58.47 unidades SPAD a los 52 (DDS), durante la etapa de floración del maíz. Asimismo, Novoa y Villagrán (2002) señalan que el valor crítico del índice de verdor en maíz es de 35.3 unidades SPAD, por debajo del cual se considera que la planta presenta deficiencia de nitrógeno. En este contexto, los valores obtenidos en el presente estudio se encuentran dentro de los rangos recomendados por investigaciones previas.

En términos generales, los tratamientos mostraron incrementos respecto al testigo, siendo de 126.87 % a los 40 DDS (T6), 22.15 % a los 70 DDS (T2), 16.26 % a los DDS (T6), y 38.83 % en el índice de verdor (T3), lo que evidencia la respuesta positiva de las plantas a las aplicaciones del extracto comercial de algas marinas y a la fertilización química reducida.

### **8.3.2. Altura de plantas y biomasa producida**

La variable altura de la planta a los 134 días después de la siembra (DDS) presentó diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) con respecto al testigo (Tabla 17). Los tratamientos T4 y T5 destacan con valores de 253.77 cm, 259.11 cm, respectivamente, lo cual concuerda con lo reportado por Arellano Vázquez, Gámez

Vázquez y Ávila Perches (2010), quienes mencionan que las plantas de maíz criollo pueden alcanzar alturas superiores a 250 cm.

**Tabla 17.** Efecto de la fertilización química y extracto de algas sobre la altura de plantas y la producción de biomasa del maíz azul a los 134 días DDS, segundo ciclo otoño-invierno 2024.

Tratamientos	AP cm	PFH (g)	PSH (g)	PFT (g)	PST (g)
134 días de la siembra					
T1: control	209.00b	62.17a	26.97b	320.08a	44.86b
T2: 240-80-60 kg ha <sup>-1</sup>	225.78ab	72.31a	41.96a	305.63a	84.42ab
T3: 240-80-60 kg ha <sup>-1</sup> 6 L ha <sup>-1</sup> de extracto	235.0ab	88.64a	39.80a	464.73a	105.53a
T4: 180-60-45 kg ha <sup>-1</sup> 6 L ha <sup>-1</sup> de extracto	253.77a	94.05a	40.97a	438.63a	108.86a
T5: 120-40-30 kg ha <sup>-1</sup> 6 L ha <sup>-1</sup> de extracto	259.11a	70.33a	42.63a	419.74a	100.73a
T6: 60-20-15 kg ha <sup>-1</sup> 6 L ha <sup>-1</sup> de extracto	249.22ab	69.36a	34.45ab	300.13a	75.06ab

AP: Altura de las plantas; PFH: peso fresco de hojas; PSH: Peso seco de hoja; PFT: peso fresco de tallo (espiga y mazorca); PST: peso seco de tallo (espiga y mazorca). Letras diferentes presentan diferencias significativas, Tukey (p < 0.05).

En cuanto al peso fresco de hoja (PFH), no se observaron diferencias significativas entre tratamientos. Sin embargo, en el peso seco de hoja (PSH) sí presentó diferencias significativas ( $p < 0.05$ ). Los tratamientos T2 a T5 registraron los valores más altos de biomasa y no mostraron diferencias entre sí, no obstante, el T5 alcanzó el valor más alto, con 42.63 g (Tabla 17).

En la variable peso fresco de tallo (PFT), no se identificaron diferencias significativas entre tratamientos. En cambio, en el peso seco de tallo (PST) se observaron diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) respecto al testigo. Los tratamientos T3 a T5 registraron la mayor biomasa seca sin diferencias estadísticas entre ellos; el T4 registró el valor más alto, con 108.86 g.

En términos generales, los tratamientos mostraron incrementos respecto al testigo de 29.56 % en la altura de planta (T5), con 58.09 % en el peso seco de hoja (T5) y 142.64 % en el peso seco de tallo (T4). Estos resultados indican que la combinación de fertilización química y el extracto de algas marinas favoreció una mayor acumulación de biomasa seca en las plantas de maíz azul.

### **8.3.3. Características de la mazorca y rendimiento**

En la Tabla 18 se presentan los resultados de las variables analizadas en la mazorca y el rendimiento del maíz azul durante el ciclo otoño-invierno 2024. En general, las variables presentan diferencias significativas ( $P < 0.05$ ) con respecto al testigo. En cuanto a la longitud de la mazorca (LM), los tratamientos T2 a T6 no muestran diferencias significativas; el tratamiento T4 presentó la mayor longitud con

15.26 cm, mientras que el T6 registró 13.96 cm, y el testigo la menor longitud con 10.26 cm.

Respecto al diámetro de la mazorca (DM), el tratamiento T4 obtuvo el mayor valor con 4.74 cm. Para las hileras en mazorca (HM), T4 presentó el mayor número con 15.73 hileras, y en granos por hilera (GH), T4 alcanzó 29.93 granos por hilera.

En la variable peso de grano (PG), T4 registró 113.56 g, mientras que en peso de olote (PO), obtuvo 28.03 g.

Finalmente, en rendimiento ( $\text{kg ha}^{-1}$ ), el tratamiento T4 alcanzó el valor más alto con  $9084.80 \text{ kg ha}^{-1}$ . Este resultado podría estar relacionado con lo reportado por Santiago - López et al. (2017), quienes indicaron que las poblaciones de maíz Tuxpeño adaptadas tienden a incrementar el rendimiento de grano debido a cambios en el diámetro de mazorca, número de hileras y granos por hilera.

**Tabla 18.** Efecto de la fertilización química y el extracto de algas sobre parámetros morfológicos y de rendimiento de la mazorca de maíz azul, primer ciclo primavera-verano 2024.

Tratamientos	LM	DM	HM	GH	PG	PO	Ren
	cm		conteo		g		kg ha <sup>-1</sup>
T1: control	10.26b	3.86c	12.93c	14.60c	38.56c	10.04b	3084.80c
T2: 240-80-60 kg ha <sup>-1</sup>	15.05a	4.51ab	15.37a	27.07ab	98.56ab	26.12a	7885.06ab
T3: 240-80-60 kg ha <sup>-1</sup> ; 6 L ha <sup>-1</sup> extracto	14.33a	4.71ab	15.10ab	28.40ab	108.65ab	25.94a	8692.00ab
T4: 180-60-45 kg ha <sup>-1</sup> ; 6 L ha <sup>-1</sup> extracto	15.26a	4.74a	15.73a	29.93a	113.56a	28.03a	9084.80a
T5: 120-40-30 kg ha <sup>-1</sup> ; 6 L ha <sup>-1</sup> extracto	14.49a	4.60ab	14.67ab	27.93ab	110.86ab	25.74a	8869.06ab
T6: 60-20-15 kg ha <sup>-1</sup> ; 6 L ha <sup>-1</sup> extracto	13.96a	4.46b	14.03bc	25.63b	94.23b	23.87a	7540.26b

LM: Longitud de mazorca; DM: Diámetro de mazorca; HM: Hileras en mazorca; GH: granos en hilera; PG: peso grano, PO: peso de olote y Ren: rendimiento. Letras diferentes presentan diferencias significativas, Tukey ( $p < 0.05$ ).

Lo anterior coincide con los datos obtenidos, donde se observa una interacción positiva entre la fertilización química al 75 % y el extracto de algas marinas, lo cual produjo un incremento en las variables como la longitud de mazorca, peso de grano, peso de olote y rendimiento total.

El tratamiento T4 presentó incrementos en todas las variables evaluadas respecto al testigo, la longitud de mazorca aumentó en 48.96 %, el diámetro en 22.80 %, y el número de hileras en 21.68 %.

Además, se observó un incremento en el número de granos por hilera (105.07 %) y el peso de grano (194.58 %). De igual manera, el peso de olote mostró un aumento de 179.20 %, mientras que el rendimiento total se incrementó en 194.58 % respecto al testigo.

#### **8.3.4. Composición química del grano**

El análisis bromatológico de la harina de maíz azul cultivado en el segundo ciclo se presenta en la Tabla 19. En términos generales, las variables evaluadas muestran diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) con respecto al testigo, excepto el almidón.

**Tabla 19.** Análisis proximal de la harina de maíz azul, segundo ciclo verano-invierno 2024.

Tratamientos	Humedad	Proteínas	Grasas	Fibra	Almidón	Cenizas
%						
T1: control	10.81bc	9.71b	2.64c	1.88a	65.70a	0.98b
T2: 240-80-60 kg ha <sup>-1</sup>	9.06d	11.01a	3.87ab	1.91a	62.93b	0.91b
T3: 240-80-60 kg ha <sup>-1</sup> 6 L ha <sup>-1</sup> de extracto	10.63c	9.04c	4.22a	2.01a	62.45b	0.91b
T4: 180-60-45 kg ha <sup>-1</sup> 6 L ha <sup>-1</sup> de extracto	11.88a	9.93b	3.66ab	1.91a	62.12bc	0.89b
T5: 120-40-30 kg ha <sup>-1</sup> 6 L ha <sup>-1</sup> de extracto	11.27b	11.27a	3.59b	1.92a	60.98c	0.88b
T6: 60-20-15 kg ha <sup>-1</sup> 6 L ha <sup>-1</sup> de extracto	11.98a	9.40bc	3.88ab	2.04a	61.99bc	1.15a

Letras diferentes presentan diferencias significativas, Tukey ( $p < 0.05$ )

En el contenido de humedad, los tratamientos T4 y T6 registraron los valores más altos con 11.88 % y 11.98 %, respectivamente, lo que indica un bajo contenido de agua en las semillas, adecuado para fines de almacenamiento y conservación. Al respecto, Afzal et al. (2017) y Bradford et al. (2018) mencionan que, para evitar el

rápido deterioro de las semillas de maíz, estas deben almacenarse con menos de 12.5 % de humedad y mantenerse a una temperatura de 10 - 15 °C.

Por otra parte, en cuanto al contenido de proteínas, el tratamiento T5 obtuvo el valor más alto con 11.27 %. Estos valores son superiores a los reportados por Anaya-Esparza et al. (2024) en la harina de maíz azul, con un contenido de proteína de 8.37 – 9.10 %. En la variable de contenido de grasas, el tratamiento T3 obtuvo 4.22 %. Los valores obtenidos son superiores a los investigados por Anaya-Esparza et al. (2024) en harina de maíz azul, con un contenido de grasas de 3.94 a 4.13 %.

Respecto al contenido de fibra, el valor más alto se registró en el tratamiento T6 con 2.04 %, correspondiente a la fertilización química al 25 % y la aplicación de 6 L ha<sup>-1</sup> de extracto de algas. En este contexto, Zhang et al. (1993) mencionan que los porcentajes de fibra y celulosa disminuyen al incrementar las dosis de nitrógeno. Por su parte, Rodríguez Pérez et al. (2023) reportaron un contenido de fibra de 2.72 % en un híbrido que le asignaron el número 18, de maíz pigmentado de color morado, valor superior al obtenido en el presente estudio.

En cuanto al contenido de almidón, el tratamiento control (T1) presentó el mayor valor con 65.70 %, lo cual sugiere que las temperaturas inferiores a 35 °C favorecen la acumulación de almidón en el grano, posiblemente debido a una menor afectación del metabolismo de los carbohidratos. Al respecto, Yang et al. (2018) señalan que el almidón y la proteína son los principales componentes del grano de maíz, y que su proporción determina la calidad del grano. Además, indican que las temperaturas

superiores a 35 °C pueden afectar negativamente la calidad del grano, lo que coincide con lo observado en este estudio.

Finalmente, en la variable del contenido de cenizas, el tratamiento T6 presentó el valor más alto con 1.15 %. Al respecto, Vázquez-Carrillo et al. (2018) y Martínez-Martínez et al. (2019) señalan que valores superiores al 2 % de cenizas indican contaminación con calcio o sales, así como deficiencias en la limpieza durante la cosecha de las mazorcas de maíz y recolección de las muestras.

En términos generales, los tratamientos presentaron incrementos respecto al testigo. El tratamiento T6 registró el mayor valor de contenido de humedad (10.82 %), en cenizas (17.35 %), y fibra (8.51 %), mientras que el T5 destacó por su mayor contenido de proteínas (16.06 %) y el T3 por el de grasas (59.85 %). Estos resultados sugieren que la reducción de la fertilización química al 75 % o 50 %, complementada con la aplicación de extracto de algas marinas (6 L ha<sup>-1</sup>), favoreció la acumulación de compuestos nutritivos en el grano de maíz azul.

### **8.3.5. Contenido de antocianinas de la harina de maíz azul**

En la Tabla 20 se presenta el contenido de antocianinas en la harina de maíz azul correspondiente al segundo ciclo de cultivo. Los tratamientos mostraron diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) respecto al testigo (T1). El tratamiento T0 (maíz blanco) registró el valor más bajo con 2 mg CGE kg<sup>-1</sup> (miligramos/equivalente de cianidina-3-glucósida por kilogramo), mientras que el testigo sin fertilización (T1) obtuvo 411 mg CGE kg<sup>-1</sup>.

**Tabla 20.** Contenido de antocianinas de la harina de maíz azul del segundo ciclo de cultivo otoño-inverno 2024.

Tratamientos	Antocianinas Totales
	mg kg <sup>-1</sup>
T0: control maíz blanco	2f
T1: Testigo sin fertilización	411e
T2: 240-80-60 kg ha <sup>-1</sup>	561c
T3: 240-80-60 kg ha <sup>-1</sup> ; 6 L ha <sup>-1</sup> de extracto	873a
T4: 180-60-45 kg ha <sup>-1</sup> ; 6 L ha <sup>-1</sup> de extracto	881a
T5: 120-40-30 kg ha <sup>-1</sup> ; 6 L ha <sup>-1</sup> de extracto	818b
T6: 60-20-15 kg ha <sup>-1</sup> ; 6 L ha <sup>-1</sup> de extracto	522d

Letras diferentes presentan diferencias significativas, Tukey ( $p < 0.05$ )

Los tratamientos que incluyeron extracto de algas marinas (T3 a T6) incrementaron significativamente el contenido de antocianinas en comparación con el testigo (T1) y con el tratamiento T2 (fertilización química al 100 % sin extracto).

Los incrementos respecto al testigo fueron de 36.49 % en T2, 112.40 %, en T3, 114.36 % en T4, 99.03 % en T5 y 27.00 % en T6. Los tratamientos T3 y T4, con niveles de fertilización química del 100 y 75 % complementados con 6 L ha<sup>-1</sup> de extracto de algas marinas, registraron los valores más altos de antocianinas (873 y 881 mg CGE kg<sup>-1</sup>, respectivamente), sin diferencias estadísticas entre ellos.

Estos resultados coinciden con lo reportado por Frioni et al. (2018), quienes observaron un incremento en antocianinas y compuestos fenólicos en frutos de uva tras la ampliación de extracto del alga *Ascophyllum nodosum*.

En conjunto, los resultados evidencian que el uso del extracto de algas marinas promovió una mayor síntesis de antocianinas, incluso con reducción del 25 al 50 % en la fertilización química, lo que sugiere su potencial como una alternativa sustentable para mejorar la calidad nutracéutica del maíz azul.

#### **8.4. Comparación entre los dos ciclos de cultivo**

Con base en lo anterior expuesto, durante ambos ciclos de cultivo se observaron diferencias en las variables evaluadas, tales como la altura de planta, índice de verdor (unidades SPAD), peso fresco y seco de planta, parámetros morfológicos y de rendimiento en la mazorca, así como en el contenido nutricional y de antocianinas en las semillas de maíz azul. Estas diferencias podrían atribuirse a las variaciones de temperatura registradas durante los ciclos primavera-verano de 2024 y otoño -invierno de 2024.

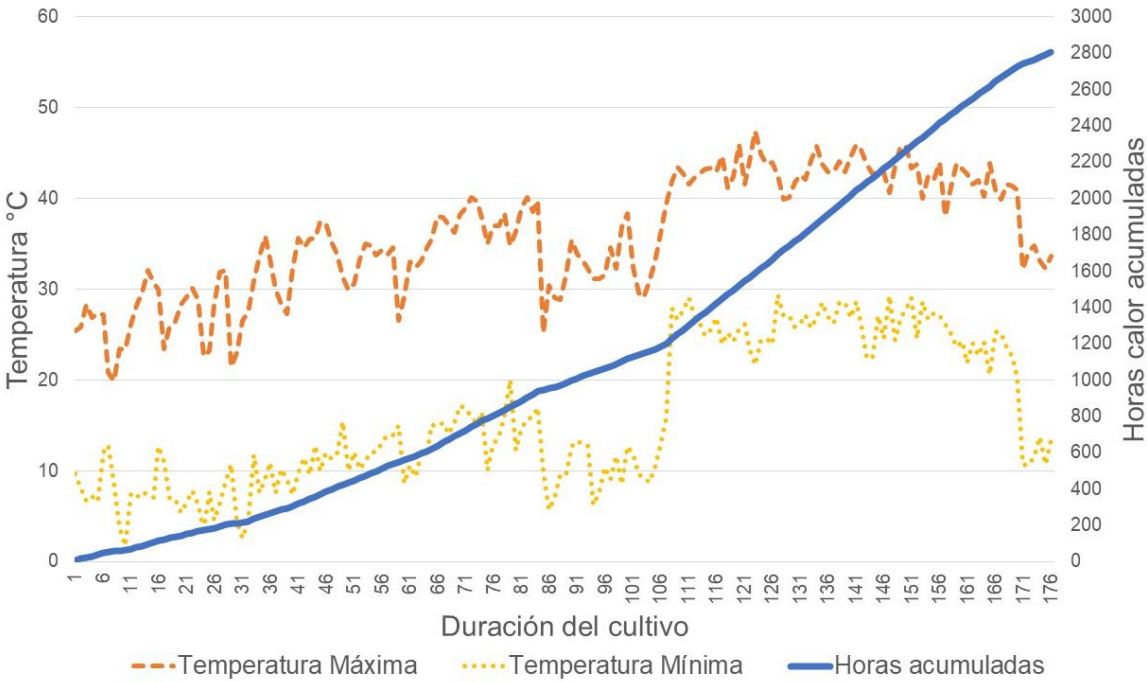
#### **8.5. Efecto de la temperatura en los dos ciclos de cultivo de maíz azul**

La sensibilidad de los cultivos a los cambios de temperatura depende tanto del tipo de planta como de la etapa de desarrollo en la que se encuentre, ya que cada especie reacciona de forma distinta a las condiciones térmicas (Hatfield et al., 2011).

En la Figura 6 y 7 se muestran la temperatura máxima y mínima diaria, las horas calor acumuladas (HCA) a lo largo del desarrollo de las plantas de maíz azul en dos temporadas de cultivo.

**8.5.1. Efecto de la temperatura en el primer ciclo de cultivo de maíz azul**

En el primer ciclo primavera-verano de 2024 (del 8 de marzo al 30 de agosto de 2024), las temperaturas máximas variaron entre 20 y 47 °C, mientras que las mínimas fluctuaron de 4 y 28 °C durante el desarrollo del cultivo. En la Figura 6 se muestra la variación de la temperatura registrada a lo largo del ciclo.



**Figura 6.** Comportamiento de la Temperatura máxima y mínima (°C) y acumulación térmica (GDD) en el primer ciclo de cultivo de maíz azul en el periodo primavera-verano 2024 en el Valle de Mexicali, B.C. La línea azul representa las horas calor

acumuladas (GDD), la línea punteada amarilla temperaturas mínimas y la anaranjada las máximas registradas a lo largo de 176 días del cultivo.

La acumulación térmica o grados-día de desarrollo (GDD) presentó un incremento progresivo durante el ciclo, alcanzando aproximadamente 2800 GDD al finalizar el cultivo, con 176 días después de la siembra. Estos valores indican una adecuada disponibilidad de calor para el crecimiento y desarrollo del maíz azul, permitiendo alcanzar la madurez fisiológica del cultivo. De acuerdo con Singh et al. (1976), la temperatura base ( $T_b$ ) para el desarrollo de las plantas de maíz es de 10 °C, mientras que la temperatura óptima ( $T_o$ ) es de 35 °C.

A partir del día 65 después de la siembra, la temperatura máxima se mantuvo por arriba de 35 °C, lo cual pudo acelerar la etapa vegetativa y las temperaturas mínimas fluctúan entre 10 °C y 27 °C (Figura 6). A los 75 días después de la siembra, las plantas concluyeron la fase vegetativa (etapas V1 a V6, correspondientes a la emergencia y al desarrollo de hojas y tallos), debido a la aparición de las primeras espigas en algunos individuos, con una acumulación de 788 grados día de desarrollo (GDD). Además, el desarrollo completo de las mazorcas (panojas) ocurrió a los 88 días, con 965 GDD, lo que evidenció una desincronización en la antesis: cuando la espiga comenzó a liberar el polen, los estigmas en algunas plantas aún no estaban expuestos.

Este evento marcó el inicio de la etapa de floración R1 (emergencia de estigmas), de acuerdo con Nielsen (2019). En contraste, otras plantas presentaron una

floración sincronizada, en la cual la antesis (liberación de polen por la espiga masculina) coincidió con la emisión de estigmas (flores femeninas) en las mazorcas. Al respecto, Arista-Cortés et al. (2018) reportaron requerimientos térmicos entre 800 y 1540 GDD para la floración masculina y femenina. Los resultados obtenidos en este estudio (788 y 965 GDD) coinciden parcialmente con dichos valores, lo que refleja la variabilidad en los requerimientos térmicos entre variedades de maíz.

A partir del día 88 después del cultivo, se contabilizó como inicio la etapa R1 (estigmas) hasta la etapa R6 (maduración fisiológica del grano), la cual se alcanzó el 15 de julio de 2024, con una acumulación térmica 1755.98 horas calor. Ese día se aplicó el último riego y las plantas se dejaron en campo para su secado natural hasta la fecha de cosecha (30 de agosto de 2024).

Por lo antes mencionado, el cultivo de maíz azul dispuso de 43 días en total para las etapas de R1 a R6 para floración estigma, ampolla de grano, grano: lechoso, pastoso, dentado y maduros, de acuerdo con Hanway, (1971) y Abendroth (2011).

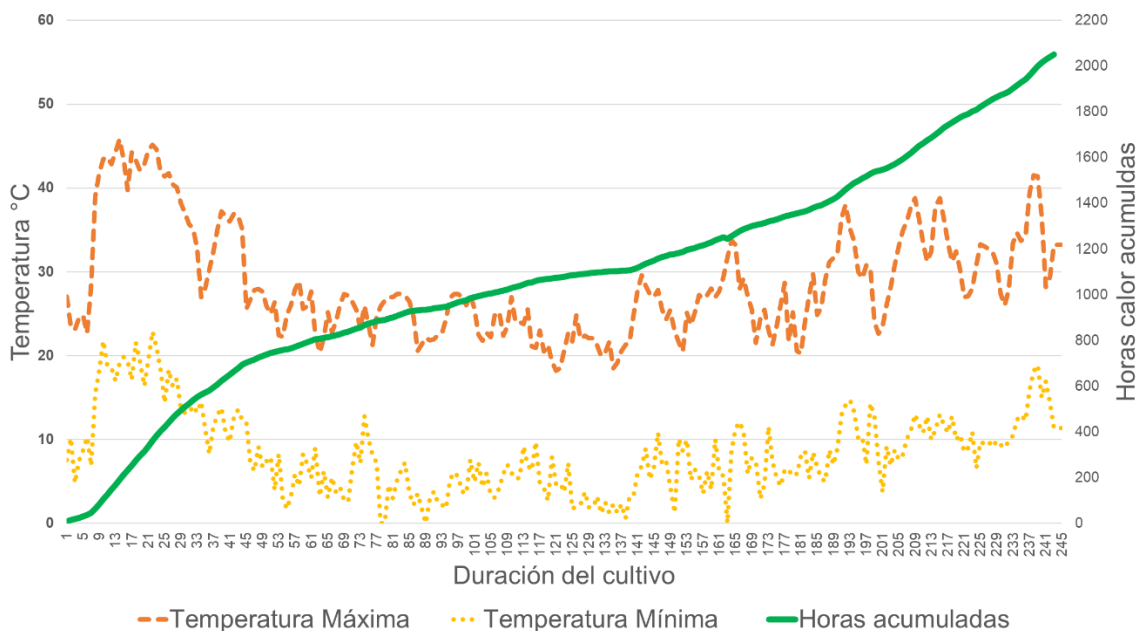
Esto sugiere que su desarrollo se aceleró, posiblemente como una respuesta al estrés térmico acumulado. Según Nielsen (2019), la madurez fisiológica del grano se alcanza entre 55 y 65 días después de la floración, cuando desaparece la línea de leche del grano y se forma la capa negra en la base del grano. En maíz azul evaluado, el grano presentó una coloración azul oscuro al desaparecer la línea de leche, así como la formación de una capa de tonalidad café oscuro en su base del grano.

En este sentido, desde la siembra hasta el día 130, el cultivo alcanzó la maduración fisiológica del grano de maíz azul con una acumulación térmica de 1755.98 GDD. El secado en campo continuó hasta alcanzar 2786.075 GDD, con un contenido promedio de humedad de  $7.98 \pm 0.20$  % en grano. Estos resultados coinciden parcialmente con los reportados por Marcial-Pablo et al. (2021), los cuales señalan que el desarrollo del grano de maíz progresa de acuerdo con la acumulación térmica, iniciando con la etapa de ampolla (blister) entre 700 y 1050 GDD, seguida con la fase lechosa (milk) entre 1050 y 1400 GDD. La madurez se alcanza entre 1400 y 1650 GDD, mientras que la etapa de cosecha ocurre a valores superiores a 1650 GDD.

Por otra parte, Zhuang et al. (2024) mencionan que el estrés por altas temperaturas y escasez de agua pueden provocar una desincronización entre la liberación de polen (espiga) y la aparición de estigmas (mazorca), reduciendo la eficiencia de fecundación y afectando la formación de semillas. De acuerdo con lo antes mencionado, el rendimiento del cultivo en el primer ciclo fue bajo. No obstante, diversas investigaciones señalan que los maíces criollos producen bajos rendimientos de grano. Santiago-López et al. (2017) reportaron valores de 1.5 a 2.21 t ha<sup>-1</sup> en cuatro poblaciones de maíz Tuxpeño. En la presente investigación, durante el primer ciclo se obtuvieron rendimientos de 1527.33 a 3807.73 kg ha<sup>-1</sup>, lo que muestra variabilidad similar debido a los diferentes tratamientos de nutrición evaluados.

### 8.5.2. Efecto de la temperatura en el segundo ciclo de cultivo de maíz azul

Durante el segundo ciclo de cultivo otoño-invierno 2024-2025 (del 15 de septiembre de 2024 al 15 de mayo de 2025), se registró una alta variabilidad térmica, con temperaturas máximas entre 24 y 44.8 °C y mínimas entre 0 y 22.9 °C (Figura 7).



**Figura 7.** Comportamiento de la Temperatura máxima y mínima (°C), la acumulación térmica (GDD) en el segundo ciclo de cultivo de maíz azul en el periodo otoño-invierno 2024 en el Valle de Mexicali, B.C. La línea verde representa las horas calor acumuladas (GDD), la línea punteada amarilla temperaturas mínimas y la anaranjada las máximas registradas a lo largo de 245 días del cultivo.

En los primeros 44 días del cultivo se presentaron picos de temperatura superiores a 45 °C, logrando acumular 692.87 horas calor, lo que pudo generar estrés térmico durante la germinación y el establecimiento de las plántulas de maíz azul. A partir

de ese día las temperaturas máximas disminuyeron entre 25 °C y con algunos picos de 37 °C, cerca del final del cultivo. En este contexto, Hou et al. (2014) mencionan la temperatura base ( $T_b$ ) para el desarrollo de las plantas de maíz es de 10 °C, mientras que la óptima ( $T_o$ ) es de 30 °C. Las temperaturas mínimas descendieron entre los días 45 y 137 después de la siembra (DDS), alcanzando los valores de 0 °C, lo que sugiere la exposición de las plantas a estrés por bajas temperaturas durante las etapas de vegetativa, floración y llenado de grano.

En este contexto, a partir del día 70 DDS, se observó la emergencia de la espiga y el desarrollo de la mazorca, con 837.86 grados día de desarrollo (GDD), coincidiendo en la anthesis y la exposición de los estigmas de las mazorcas, lo que evidencia una sincronización entre ambos eventos. Nielsen (2019) menciona que la emergencia de los estigmas marca el inicio de la etapa de reproducción (R1).

No obstante, en la Figura 7 se aprecia como la pendiente de acumulación térmica se redujo entre los días 45 y 137, lo que refleja una menor tasa de acumulación durante este periodo (93 días), principalmente en los meses más fríos (diciembre de 2024 y enero de 2025). Esta disminución ralentizó el avance fenológico del cultivo y extendió el periodo de madurez fisiológica del grano. Waqas et al. (2021) mencionan que el cultivo de maíz es sensible al frío, lo que afecta la tasa de crecimiento, prolonga la duración del ciclo y puede disminuir el rendimiento.

A partir del día 140 después de la siembra, la temperatura mostró un incremento, con una temperatura máxima promedio de 29.4 °C y una mínima promedio de 9.0

°C (Figura 7). Este comportamiento térmico contribuyó a la acumulación de las horas calor necesarias para alcanzar la etapa de madurez fisiológica del grano (V6), la cual se alcanzó a los 215 días DDS, con una acumulación térmica de 1716.3 GDD. A los 245 días se cosechó, con una acumulación térmica de 2052 GDD, un rendimiento de 3084.70 a 9084.80 kg ha<sup>-1</sup>, reflejando la variabilidad asociada a los diferentes tratamientos de nutrición evaluados, y el contenido promedio de humedad del grano fue de 10.92 ± 0.98%.

### **8.5.3. Comparación de los ciclos sobre el efecto de la temperatura en el cultivo de maíz azul**

En el Valle de Mexicali, B.C., el cultivo de maíz se establece en dos ciclos: primavera-verano (siembra febrero) y otoño-inverno (siembra agosto), con el propósito de evitar tanto las temperaturas extremas altas como las bajas durante las etapas más sensibles del cultivo, particularmente la fase R1 (antesis y emisión de estigmas).

En esta investigación, la siembra del primer ciclo se realizó 36 días después de la fecha recomendada, mientras que en el segundo ciclo fue de 46 días. De acuerdo con Nielsen et al. (2002), una siembra tardía se asocia con una reducción en la duración del ciclo de cultivo y una mayor acumulación de radiación. Lo anterior coincide con lo observado en el primer ciclo primavera-verano (2024), en el cual se registró una mayor acumulación térmica (2786.075 GDD) al finalizar el cultivo, con una duración de 176 días. No obstante, las altas temperaturas durante la etapa R1

provocaron una desincronización en la floración, lo que repercutió en un menor rendimientos.

Por el contrario, en el segundo ciclo otoño-invierno (2024) se observó una menor acumulación térmica (2052 GDD) al final del cultivo, con una duración de 245 días. Las bajas temperaturas durante la etapa V1 no afectaron la polinización y se obtuvo un mayor rendimiento respecto al ciclo uno, sin embargo, el ciclo de cultivo se prolongó 69 días en comparación con el ciclo primavera-verano. Las condiciones térmicas del ciclo otoño-invierno favorecieron el desarrollo fenológico del maíz azul, al mantener la sincronía floral y mayor rendimiento de grano. En contraste, las altas temperaturas del ciclo primavera-otoño influyeron negativamente en la etapa reproductiva, reflejándose en una reducción del rendimiento de grano. Por lo anterior, se recomienda realizar la siembra en las fechas óptimas establecidas para el Valle de Mexicali, B.C., con el fin de evitar la prolongación del ciclo y reducir los costos asociados al uso de agua de riego y productos químicos para el control de insectos. De esta manera, es posible optimizar el aprovechamiento térmico y mejorar la eficiencia productiva del maíz azul.

### **8.6 Prueba t de Student**

Mediante la prueba t-Student se analizaron los datos obtenidos en los ciclos uno y dos de las variables de interés, con el fin de cumplir los objetivos propuestos. En la Tabla 21 se muestra la comparación entre ambos ciclos agrícolas; se observaron diferencias estadísticamente significativas en las variables de rendimiento, proteínas, lípidos, almidón y cenizas ( $p < 0.05$ ), mientras que fibra y antocianinas no mostraron diferencias significativas.

**Tabla 21.** Comparación de medias de los ciclos uno y dos mediante la prueba t de Student.

Variables	Ciclo 1 (Media $\pm$ DE)	Ciclo 2 (Media $\pm$ DE)	DM (C1 - C2)	EE	T	gl	p < 0.05
Rendimiento (kg ha <sup>-1</sup> )	2730.66 $\pm$ 1290.71	7569.00 $\pm$ 2771.36	-4795.33	227.86	-21.04	358	0.000
Proteínas (%)	12.10 $\pm$ 0.56	10.06 $\pm$ 0.85	2.04	0.240	8.492	34	0.000
Grasas (%)	4.32 $\pm$ 0.25	3.64 $\pm$ 0.53	0.681	0.140	4.839	34	0.000
Fibra (%)	1.97 $\pm$ 0.16	1.94 $\pm$ 0.12	0.028	0.048	0.592	34	0.558
Almidón (%)	60.38 $\pm$ 1.09	62.69 $\pm$ 1.55	-2.317	0.449	-5.161	34	0.000
Cenizas (%)	0.79 $\pm$ .07	0.95 $\pm$ 0.10	-1.162	0.030	-5.264	34	0.000
Antocianinas mg ECG kg <sup>-1</sup>	0.68 $\pm$ 0.21	0.67 $\pm$ 0.19	0.002	0.068	0.042	34	0.967

DE: desviación estándar; DM: diferencia de medias; EE: error estándar

El rendimiento presentó un incremento considerable en el ciclo 2, alcanzando un promedio de  $7569.60 \pm 2771.36 \text{ kg ha}^{-1}$ , en comparación con el ciclo uno, con  $2730.66 \pm 1290.71 \text{ kg ha}^{-1}$ . Las diferencias de medias (DM= -4795.33) fue altamente significativa ( $p < 0.05$ ), lo que indica un fuerte efecto de los tratamientos aplicados (químico y extracto de algas), así como las condiciones térmicas presentes durante el segundo ciclo de cultivo de maíz azul. Este cambio representa un aumento del 177.20 %, evidenciando un incremento en la productividad del cultivo.

En cuanto al contenido de proteínas, se observó una disminución entre ciclos, con valores del primer ciclo de  $12.10 \pm 0.56 \%$  en el primero y  $10.06 \pm 0.85 \%$  en el segundo. Esta reducción podría estar relacionada con el incremento en el rendimiento del segundo ciclo, lo que ocasionó una menor disponibilidad de nitrógeno. Estos resultados coinciden con lo reportado por Tong et al. (2021) quienes mencionan que la deficiencia de nitrógeno reduce las proteínas del grano, pero favorece el aumento de almidón y azúcares.

En consecuencia, el almidón mostró un incremento de  $60.38 \pm 1.09 \%$  a  $62.69 \pm 1.55 \%$  en el segundo ciclo. De manera similar, el contenido de cenizas también presentó un incremento, pasando de  $0.79 \pm 0.07 \%$  en el primer ciclo a  $0.95 \pm 0.10 \%$  en el segundo, lo cual podría atribuirse al efecto combinado de la fertilización química y el extracto de algas marinas, que favorecieron una mayor acumulación de minerales en el grano.

Las grasas, por su parte, disminuyeron de  $4.32 \pm 0.25$  % en el primer ciclo a  $3.64 \pm 0.53$  % en el segundo, dichas diferencias podrían atribuirse a las variaciones térmicas que pudieron alterar la síntesis y acumulación de compuestos grasos durante el llenado de grano.

El contenido de fibra permaneció constante entre ciclos, con valores de  $1.97 \pm 0.16$  % y  $1.94 \pm 0.12$  %, respectivamente, sin diferencias significativas ( $p < 0.558$ ).

Finalmente, el contenido de antocianinas mostró un ligero aumento en el segundo ciclo ( $0.68 \pm 0.21$  a  $0.67 \pm 0.19$  mg ECG  $\text{kg}^{-1}$ ); sin embargo, este cambio no fue significativo ( $p < 0.967$ ), lo que sugiere que estos componentes son menos sensibles a las condiciones ambientales y nutricionales evaluadas.

En general, los resultados indican que el segundo ciclo presentó un rendimiento superior, así como mayores contenidos de proteína, lípidos, almidón, y cenizas, junto con una disminución significativa ( $p < 0.05$ ) en fibra y antocianinas. Estas diferencias evidencian una alta variabilidad entre parcelas, lo cual podría atribuirse a la respuesta a los tratamientos de fertilización y extracto de algas, así como las condiciones térmicas durante ambos ciclos de cultivo de maíz azul.

## IX. CONCLUSIÓN

Los tratamientos no presentaron diferencias significativas en el porcentaje de germinación; sin embargo, el tratamiento 2 (0.4 % v/v de extracto) mostró un incremento significativo en la longitud de la plúmula y de la raíz principal, así como en el número de raíces secundarias, en la biomasa fresca y seca de las plántulas, en comparación con los demás tratamientos evaluados.

El T4 registró el mayor rendimiento de grano, con 3807.76 kg ha<sup>-1</sup> en el primer ciclo y 9080.80 kg ha<sup>-1</sup> en el segundo. En cuanto a la calidad nutricional del grano, los tratamientos T3 y T5 registraron los valores más altos de proteína: 12.80 % en el primer ciclo y 11.27 % en el segundo, superando al testigo y al tratamiento T2 con fertilización al 100 % sin extracto de algas.

El T4 presentó los valores más altos de antocianinas, con 986 mg CGE kg<sup>-1</sup> en el primer ciclo y 881 mg CGE kg<sup>-1</sup> en el segundo, sobresaliendo con una dosis de fertilización química reducida al 75 % y el extracto de alga aplicado a la dosis recomendada.

El cultivo de maíz azul mostró diferencias en la duración del ciclo y en la acumulación térmica entre los periodos evaluados. En primavera-verano 2024, completó su desarrollo en 176 días con 2786.075 GDD, mientras que en otoño-invierno requirió 245 días y acumuló 2052 GDD, evidenciando una diferencia de 69 días y 734.07 GDD entre ciclos.

En conjunto, los resultados muestran que el extracto de algas NPKelp® favoreció el desarrollo temprano de las plántulas de maíz y la combinación con fertilización química, generó efectos positivos en las variables evaluadas en el cultivo de maíz azul. Estos hallazgos evidencian el potencial biotecnológico del extracto para disminuir la dependencia de fertilización química sin afectar la calidad del grano, caracterizado por su alto contenido de proteínas y antocianinas. Asimismo, las variaciones térmicas entre ciclos deben considerarse para la planeación y el manejo del cultivo de maíz azul en el Valle de Mexicali, Baja California.

## **X. PERSPECTIVAS A FUTURO**

A partir de los resultados obtenidos, se establece la necesidad de continuar la investigación con el propósito de profundizar en el efecto de la temperatura sobre las etapas fenológicas y el rendimiento del maíz azul en el Valle de Mexicali, B.C. Asimismo, se propone incorporar modelos predictivos que integren Grados Día de Desarrollo (GDD), humedad del suelo y radiación, con el fin de estimar fechas óptimas de siembra y maximizar el rendimiento del cultivo. Estos esfuerzos contribuirán a conservar el maíz azul, ya establecido como un recurso regional y promover su aprovechamiento. Adicionalmente, se considera relevante evaluar la capacidad del cultivo para adaptarse a escenarios de cambio climático y asegurar su continuidad productiva en la región.

## XI. LITERATURA CONSULTADA

- Abad, M., Bedoya, L., & Bermejo, P. (2011). Marine compounds and their antimicrobial activities. In A. Méndez-Vilas (Ed.), *Science against microbial pathogens: Communicating current research and technological advances* (pp. 1293–1306). Formatex Research Center.
- Abendroth, L. J., Elmore, R. W., Boyer, M. J., & Marlay, S. K. (2011). Crecimiento y desarrollo del maíz (PMR 1009). Extensión de la Universidad Estatal de Iowa. <https://store.extension.iastate.edu/product/6065>
- Afzal, I., Bakhtavar, M. A., Ishfaq, M., Sagheer, M., & Baributsa, D. (2017). Maintaining dryness during storage contributes to higher maize seed quality. *Journal of Stored Products Research*, 72, 49–53. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2017.03.003>
- Agama-Acevedo, E., Juárez-García, E., Evangelista-Lozano, S., Rosales-Reynoso, O. L., & Bello-Pérez, L. A. (2013). Características del almidón de maíz y relación con las enzimas de su biosíntesis. *Agrociencia*, 47(1), 1-12. <https://www.redalyc.org/pdf/302/30225619001.pdf>
- Alegría-Marroquín, J., Castillo-Ruíz, O., & Saldaña-Trinidad, S. (2020). Caracterización fisicoquímica de maíz (*Zea mays* L.) pigmentado para potenciar su consumo. *Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 5, 272–276. Recuperado de <http://www.fcb.uanl.mx/IDCyTA/files/volume5/5/4/54.pdf>
- Anaya-Esparza, L. M., Gómez-Rodríguez, V. M., Ramírez-Vega, H., Hernández-Estrada, S., Hernández-Villaseñor, L. A., & Villagrán de la Mora, B. Z. (2024). Propiedades nutricionales, fisicoquímicas, funcionales, compuestos fenólicos y actividad antioxidante de harinas de tres accesiones de maíz azul nativo de

México. *Ingeniería: Ciencia, Tecnología e Innovación*, 11(1), 23–39.  
<https://doi.org/10.26495/z1k1kc46>

Arellano-Vázquez, J. L., Gámez-Vázquez, A. J., & Ávila-Perches, M. A. (2010). *Potencial agronómico de variedades criollas de maíz Cacahuacintle en el Valle de Toluca*. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 33(4), 37–41.  
[https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0187-73802010000500009&script=sci\\_arttext](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0187-73802010000500009&script=sci_arttext)

Arellano-Vázquez, J. L., Rojas-Martínez, I., & Gutiérrez-Hernández, G. F. (2014). Variedades de maíz azul Chalqueño seleccionadas por múltiples caracteres y estabilidad del rendimiento. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 5(8), 1469–1480.  
[https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-09342014000800011&script=sci\\_arttext](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-09342014000800011&script=sci_arttext)

Arista-Cortés, J., Quevedo Nolasco, A., Zamora Morales, B. P., Bauer Mengelberg, R., Sonder, K., & Lugo Espinosa, O. (2018). Temperaturas base y grados día desarrollo de 10 accesiones de maíz de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 9(5), 1043–1054.  
<https://doi.org/10.29312/remexca.v9i5.1593>

Belwal, T., Singh, G., Jeandet, P., Pandey, A., Giri, L., Ramola, S., Bhatt, I. D., Venskutonis, P. R., Georgiev, M. I., Clément, C., & Luo, Z. (2020). Anthocyanins, multi-functional natural products of industrial relevance: Recent biotechnological advances. *Biotechnology Advances*, 43, Article 107600. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2020.107600>

Bhushan, B., Kumar, S., Kaur, C., Devi, V., Chaudhary, D. P., Singh, A., Dagla, M. C., Karjagi, C. G., Saleena, L. A. K., Chandran, D., & Kumar, M. (2024). Beyond colors: The health benefits of maize anthocyanins. *Applied Food Research*, 4(1), 100399. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2024.100399>

- Bi, F., Iqbal, S., Arman, M., Ali, A., & Hassan, M. U. (2011). Carrageenan as an elicitor of induced secondary metabolites and its effects on various growth characters of chickpea and maize plants. *Journal of the Saudi Chemical Society*. <https://doi.org/10.1016/j.jscs.2010.10.003>
- Bradford, K. J., Dahal, P., Van Asbrouck, J., Kunusoth, K., Bello, P., Thompson, J., & Wu, F. (2018). The Dry Chain: Reducing postharvest losses and improving food safety in humid climates. *Trends in Food Science & Technology*, 71, 84–93. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817121-9.00017-6>.
- Caballero Salinas, J. C., Pizaña Vidal, H. A., González Cabañas, A. A., Núñez Ramos, E., Aguilar Cruz, F., & Ovando Salinas, E. (2023). Composición morfológica y rendimientos de maíces nativos sin uso de agroquímicos en Chiapas, México. *Siembra*, 10(2), e3997. <https://doi.org/10.15359/siembra.10-2.3>
- Caballero Salinas, J. C., Pizaña Vidal, H. A., González Cabañas, A. A., Núñez Ramos, E., Aguilar Cruz, F., & Ovando Salinas, E. (2023). Composición morfológica y rendimientos de maíces nativos sin uso de agroquímicos en Chiapas, México. *Siembra*, 10(2), e3997. <https://doi.org/10.15359/siembra.10-2.3>
- Castellanos-Reyes, M. A., Valdés-Carmenate, R., López-Gómez, A., & Guridi-Izquierdo, F. (2017). Mediciones de índices de verdor relacionadas con área foliar y productividad de híbrido de maíz. *Cultivos Tropicales*, 38(3), 112–116. Recuperado de <https://ediciones.inca.edu.cu/index.php/ediciones/article/view/16>

- Castro-González, M. I., Oériz-Gil, F. R., Pérez-Estrella, S., & Carrillo Domínguez, S. (1996). Chemical composition of the green alga *Ulva lactuca*. *Ciencias Marinas*, 22, 205–213. <https://doi.org/10.7773/cm.v22i2.853>
- Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT) (2019). Maíz para México. Plan Estratégico 2030. [Cimmyt.org](https://repository.cimmyt.org/bitstream/handle/10883/20219/60937.pdf). Recuperado el 27 de octubre de 2025, de <https://repository.cimmyt.org/bitstream/handle/10883/20219/60937.pdf>
- Cetin-Babaoglu, H., Yalim, N., Kale, E., & Tontul, S. A. (2021). Pigmented whole maize grains for functional value added and low glycemic index snack production. *Food Bioscience*, 44, 100399. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2021.100399>
- Chňapek, M., Balážová, Ž., Špaleková, A., Žurková, E., & Gálová, Z. (2024). Genetic diversity of maize resources revealed by different molecular markers. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 71, 4685–4703. <https://doi.org/10.1007/s10722-024-01908-5>
- Cian, R. E., Drago, S. R., Medina, F. S., & Martínez-Augustin, O. (2015). Proteins and carbohydrates from red seaweeds: Evidence for beneficial effects on gut function and microbiota. *Marine Drugs*, 13, 5358–5383. <https://doi.org/10.3390/md13085358>
- Colombo, R., Ferron, L., & Papetti, A. (2021). Colored corn: An up-date on metabolites extraction, health implication, and potential use. *Molecules*, 26(1), 199. <https://doi.org/10.3390/molecules2601019>
- Colombo, R., Ferron, L., & Papetti, A. (2021). Colored corn: An up-date on metabolites extraction, health implication, and potential use. *Molecules*, 26(1), 199. <https://doi.org/10.3390/molecules2601019>

- Craigie, J. S. (2011). Seaweed extract stimuli in plant science and agriculture. *Journal of Applied Phycology*, 23(3), 371–393. <https://doi.org/10.1007/s10811-010-9560-4>
- Crouch, I. J., & Van Staden, J. (1993). Evidence for the presence of plant growth regulators in commercial seaweed products. *Journal of Plant Growth Regulation*, 13, 21–29. <https://doi.org/10.1007/BF00207588>
- Cruz, N., Basílio, N., Mateus, V., de Freitas, F., & Pina, F. (2021). Natural and synthetic flavylium-based dyes: The chemistry behind the color. *Chemical Reviews*, 122(2), 1416–1481. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.1c00399>
- Díaz-Huacuz, R. S., Ávila Perches, M. Á., Espinosa Calderón, A., & Manjarrez Juárez, F. J. (2017). Producción artesanal de semilla de maíz azul en el Estado de México (Folleto Técnico Núm. 1). Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). ISBN 978-607-37-0827-2.
- Drira, M., Elleuch, J., Ben Hlima, H., Hentati, F., Gardarin, C., Rihouey, C., Le Cerf, D., Michaud, P., Abdelkafi, S., & Fendri, I. (2021). Optimization of Exopolysaccharides Production by *Porphyridium sordidum* and Their Potential to Induce Defense Responses in *Arabidopsis thaliana* against *Fusarium oxysporum*. *Biomolecules*, 11(2), 282. <https://doi.org/10.3390/biom11020282>
- Drobek, M., Fraç, M., & Cybulska, J. (2019). Plant biostimulants: Importance of the quality and yield of horticultural crops and the improvement of plant tolerance to abiotic stress — A review. *Agronomy*, 9(6), 335. <https://doi.org/10.3390/agronomy9060335>

- Durán, D. (2008). *Caracterización fisiológica y molecular de semillas de maíz azul*. (Tesis de maestría en ciencias). Unidad Profesional Interdisciplinaria de Biotecnología, Instituto Politécnico Nacional. [https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1659-13212011000100002](https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1659-13212011000100002)
- Durán-Hernández, D., Uribe-Orozco, M. E., Mateo-Cid, L. E., & González-Mendoza, D. (2022). Potencial biotecnológico de las macroalgas en la agricultura. *Idesia (Arica)*, 40(3), 81–88. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292022000300081>
- Ertani, A., Francioso, O., Tinti, A., Schiavon, M., Pizzeghello, D., & Nardi, S. (2018). *Evaluation of seaweed extracts from Laminaria and Ascophyllum nodosum spp. as biostimulants in Zea mays L. using a combination of chemical, biochemical and morphological approaches. Frontiers in Plant Science*, 9, 428. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00428>
- Espinosa-Antón, C., Gómez-Pando, L. R., & Álvarez-Castro, A. (2020). Estimulación de enzimas en la germinación de semillas de quinua mediante ácido giberélico. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 22(2), 173–182 <https://huajsapata.unap.edu.pe/index.php/ria/issue/archive>
- Farag, M. A., Abib, B., Qin, Z., Ze, X., & Ali, S. E. (2023). Dietary macrominerals: Updated review of their role and orchestration in human nutrition throughout the life cycle with sex differences. *Current Research in Food Science*, 6, 100450. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2023.100450>
- Freire, J., & Celi, K. (2024). Uso de fitohormonas vegetales y extractos de algas marinas en la germinación de semillas de cacao (*Theobroma cacao*) en el cantón Quinindé. *Reincisol*, 3(6), 6639–6654. [https://doi.org/10.59282/reincisol.V3\(6\)6639-6654](https://doi.org/10.59282/reincisol.V3(6)6639-6654)

- Frioni, T., Sabbatini, P., Tombesi, S., Norrie, J., Poni, S., Gatti, M., & Palliotti, A. (2018). *Effects of a biostimulant derived from the brown seaweed *Ascophyllum nodosum* on ripening dynamics and fruit quality of grapevines*. *Scientia Horticulturae*, 232, 97–106. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.12.054>
- Galicia-Juárez, M., Mendoza-Onofre, L. E., González-Hernández, V. A., Cisneros-López, M. E., Benítez-Riquelme, I., y Córdova-Téllez, L. (2017). Heterosis and combining ability of seed physiological quality traits of single cross vs. three-way sorghum hybrids. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 39(2), 175-181 <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v39i2.31198>
- García-Campos, A. U., Cruz-Monterrosa, R. G., Rayas-Amor, A. A., Jiménez-Guzmán, J., Fabela-Morón, M. F., Salgado-Cruz, M. de la P., Cortés-Sánchez, A. de J., Villanueva-Carvajal, A., & Díaz-Ramírez, M. (2020). Caracterización física-química de maíz (*Zea mays* L.) criollo (azul y rojo) del Estado de México. *Agro Productividad*, 13(7), 95–100. <https://doi.org/10.32854/agrop.vi.1728>
- García-Morales, S., García-Gaytán, V., & León-Morales, J. M. (2021). Panorama actual de los bioestimulantes agrícolas. En J. J. Castañeda Nava (Ed.), *Tópicos de herramientas biotecnológicas para el desarrollo agrícola* (pp. 14–21). CIATEJ. Recuperado de <https://ciatej.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1023/776>
- Giusti, M. M., & Wrolstad, R. E. (2001). Characterization and measurement of anthocyanins by UV–Visible spectroscopy. In R. E. Wrolstad (Ed.), *Current Protocols in Food Analytical Chemistry* (pp. F1.2.1–F1.2.13). John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/0471142913.faf0102s00>

- Gómez Montiel, N. O., Cantú Almaguer, M. Ángel, Vázquez Carrillo, M. G., Hernández Galeno, C. del Ángel, Aragón Cuevas, F., Espinosa Calderón, A., & Tadeo Robledo, M. (2017). Variedad mejorada del maíz azul 'V-239AZ' para las regiones semicálidas de Guerrero. *Revista Mexicana De Ciencias Agrícolas*, 8(8), 1905–1910. <https://doi.org/10.29312/remexca.v8i8.714>
- Hamed, S. M., El-Rhman, A. A. A., Abdel-Raouf, N., & Ibraheem, I. B. (2018). Role of marine macroalgae in plant protection and improvement for sustainable agriculture technology. *Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences*, 7(1), 104-110. <https://doi.org/10.1016/j.bjbas.2017.08.002>
- Hanway, John J. (1971). Cómo se desarrolla una planta de maíz. Informe especial n.º 48 de la Universidad Estatal de Iowa.
- Hashem, H. A., Mansour, H. A., El-Khawas, S. A., & Hassanein, R. A. (2019). The potentiality of marine macro-algae as bio-fertilizers to improve the productivity and salt stress tolerance of *canola* (*Brassica napus* L.) plants. *Agronomy*, 9(3), 146. <https://doi.org/10.3390/agronomy903014>
- Hatfield, J. L., Boote, K. J., Kimball, B. A., Ziska, L. H., Izaurralde, R. C., Ort, D., Thomson, A. M., & Wolfe, D. (2011). Climate impacts on agriculture: Implications for crop production. *Agronomy Journal*, 103(2), 351–370. <https://doi.org/10.2134/agronj2010.0303>
- Hernández-Herrera, R. M., González-González, M. F., Velasco-Ramírez, A. P., Velasco-Ramírez, S. F., Santacruz-Ruvalcaba, F., & Zamora-Natera, J. F. (2023). *Seaweed extract components are correlated with the seeds germination and growth of tomato seedlings*. *Seeds*, 2(4), 436–448. <https://doi.org/10.3390/seeds2040033>

- Hou, P.; Liu, Y.; Xie, R.; Ming, B.; Ma, D.; Li, S. and Mei, X. (2014). Temporal and spatial variation in accumulated temperature requirements of maize. *Field Crops Res.* 158:55-64 <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.12.021>
- International Seed Testing Association (ISTA). (2016). *International Rules for Seed Testing.* Zurich, Switzerland. [https://www.merconet.eu/files/Seed\\_Sampling\\_I\\_S\\_T\\_A.pdf](https://www.merconet.eu/files/Seed_Sampling_I_S_T_A.pdf)
- Khan, S. A., Abid, M., & Hussain, F. (2015). Nematicidal activity of seaweeds against *Meloidogyne javanica*. *Pakistan Journal of Nematology*, 33(2), 195–203. [https://www.researchgate.net/profile/Faisal-Hussain-9/publication/279201076\\_Nematicidal\\_activity\\_of\\_seaweeds\\_against\\_Meloidogyne\\_javanica/links/558fb07008ae1e1f9bacf263/Nematicidal-activity-of-seaweeds-against-Meloidogyne-javanica.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Faisal-Hussain-9/publication/279201076_Nematicidal_activity_of_seaweeds_against_Meloidogyne_javanica/links/558fb07008ae1e1f9bacf263/Nematicidal-activity-of-seaweeds-against-Meloidogyne-javanica.pdf)
- Khan, W., Rayirath, U. P., Subramanian, S., Jithesh, M. N., Rayorath, P., Hodges, D. M., et al. (2009). Seaweed extracts as biostimulants of plant growth and development. *Journal of Plant Growth Regulation*, 28(4), 386–399. <https://doi.org/10.1007/s00344-009-9103-x>
- Khan, W., Rayirath, U. P., Subramanian, S., Jithesh, M. N., Rayorath, P., Hodges, D. M., et al. (2009). Seaweed extracts as biostimulants of plant growth and development. *Journal of Plant Growth Regulation*, 28(4), 386–399. <https://doi.org/10.1007/s00344-009-9103-x>
- Lago, C., Landoni, M., Cassani, E., Cantaluppi, E., Doria, E., Nielsen, E., Giorgi, A., & Pilu, R. (2015). *Study and Characterization of an Ancient European Flint White Maize Rich in Anthocyanins: Millo Corvo from Galicia.* *PLOS ONE*, 10(5), e0126521. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0126521>
- Layek, J.; Das, A.; Ramkrushna, G.I.; Ghosh, A.; Panwar, A.S.; Krishnappa, R.; Ngachan, S.V. (2016) Effect of Seaweed Sap on Germination, Growth and

Productivity of Maize (*Zea mays*) in North Eastern Himalayas. *Indian J. Agron.* 61(3), 354-359. <https://doi.org/10.59797/ija.v61i3.4374>

Li, Z., & Ahammed, G. J. (2023). Plant stress response and adaptation via anthocyanins: A review. *Plant Stress*, 10, 100230. <https://doi.org/10.1016/j.stress.2023.100230>

López-Morales, F., García-Zavala, J. J., Corona-Torres, T., Cruz-Izquierdo, S., López-Romero, G., Reyes-López, D., Vásquez-Carrillo, M. G., & Molina-Galán, J. D. (2020). Comparación del rendimiento y cambios morfológicos en maíz Tuxpeño V-520C adaptado a Valles Altos en México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 43(2), 133–141. <https://doi.org/10.35196/rfm.2020.2.133>

Lu, Z., Wang, X., Lin, X., Mostafa, S., Zou, H., Wang, L., & Jin, B. (2024). Plant anthocyanins: Classification, biosynthesis, regulation, bioactivity, and health benefits. *Plant Physiology and Biochemistry*, 217, 109268. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2024.109268>

Mansillas, A., & Alveal, K. (2004). Generalidades sobre las macroalgas. In W. I. Camilo (Ed.), *Biología marina y oceanografía: Conceptos y procesos* (Tomo 1, pp. 349–359). Trama Impresores S.A. <http://recursosbiblio.url.edu.gt/Publi/Libros/2013/BioMarina/12.pdf>

Marcial-Pablo, M. d. J., Ontiveros-Capurata, R. E., Jiménez-Jiménez, S. I. & Ojeda-Bustamante, W. (2021). *Maize Crop Coefficient Estimation Based on Spectral Vegetation Indices and Vegetation Cover Fraction Derived from UAV-Based Multispectral Images*. *Agronomy*, 11(4), 668 <https://doi.org/10.3390/agronomy11040668>

- Marcial-Pablo, M. de J., Ontiveros, R. E., Jiménez, S. I., Sifuentes, E., & Ojeda, W. (2021). Estimación del coeficiente de cultivo basado en la metodología cobertura vegetal-índices de vegetación. *Sexto Congreso Nacional de Riego, Drenaje y Biosistemas*, Hermosillo, Sonora, México. <https://www.riego.mx/congresos/comeii2021/files/ponencias/extenso/COMEI-I-21004.pdf>
- Martínez-Martínez, R., Vera-Guzmán, A. M., Chávez-Servia, J. L., Aquino-Bolaños, E. N., Carrillo-Rodríguez, J. C., & Pérez-Herrera, A. (2019). Bioactive compounds and antioxidant activities in pigmented maize landraces. *Interciencia*, 44(9), 549–556. <https://www.redalyc.org/journal/339/33961096008/33961096008.pdf>
- Masuoka, N., Matsuda, M., & Kubo, I. (2012). Characterisation of the antioxidant activity of flavonoids. *Food Chemistry*, 131(2), 541–545. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.09.020>
- Mateo-Cid, L. E., A. C. Mendoza-González y C. M. Hernández Casas. (2019). Diversity of brown algae (Ochrophyta, Phaeophyceae) of Sian Ka'an Reserve Biosphere, Mexican Caribbean. *Pakistan Journal of Botany* 51(1): 361-366. DOI: [https://doi.org/10.30848/pjb2019-1\(40\)](https://doi.org/10.30848/pjb2019-1(40))
- McHugh, D. J. (2003). *A guide to the seaweed industry* (FAO Fisheries Technical Paper No. 441). Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org/4/y4765e/y4765e00.htm>
- McMaster, G. S., & Wilhelm, W. W. (1997). Growing degree-days: one equation, two interpretations. *Agricultural and Forest Meteorology*, 87(4), 291–300. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(97\)00027-0](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(97)00027-0)

- Mex-Álvarez, R. M. J., Garma-Quen, P. M., Bolívar-Fernández, N. J., & Guillén-Morales, M. M. (2016). *Análisis proximal y fitoquímico de cinco variedades de maíz del Estado de Campeche (México)*. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, **12**(2), 74–80. <https://revista.itson.edu.mx/index.php/rlrn/article/view/254>
- Monsierra, L., Mansilla, P. S., & Pérez, G. T. (2024). Whole flour of purple maize as a functional ingredient of gluten-free bread: Effect of in vitro digestion on starch and bioaccessibility of bioactive compounds. *Foods*, **13**(2), 194. <https://doi.org/10.3390/foods13020194>
- Morales-Aparicio, M. M., Ayala-Niño, F., Mendoza-González, A. C., & Mateo-Cid, L. E. (2025). Efecto de las harinas de *Ulva lactuca* y *Gracilaria blodgettii* sobre las propiedades físicas y químicas de un suelo alcalino y el crecimiento de acelga (*Beta vulgaris* var. *cycla*). *Terra Latinoamericana*, **43**, e1895. <https://doi.org/10.28940/terra.v43i.1895>
- Mouga, T., Almeida, M. M., Pitacas, F. I., Rodrigues, A. M., Vitória, C., & Anjos, O. (2025). Caracterización elemental y nutricional mediante análisis de espectroscopia vibracional de *Ulva* sp., *Gracilaria multipartita* y *Sargassum muticum*. *Ciencias Aplicadas*, **15**(8), 4212. <https://doi.org/10.3390/app15084212>
- Mukherjee, A., Gaurav, A. K., Singh, S., Yadav, S., Bhowmick, S., Abeysinghe, S., & Verma, J. P. (2022). The bioactive potential of phytohormones: A review. *Biotechnology reports (Amsterdam, Netherlands)*, **35**, e00748. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2022.e00748>
- Mutlu, C., Arslan-Tontul, S., Candal, C., Kilic, O. and Erbas, M. (2018), Physicochemical, Thermal, and Sensory Properties of Blue Corn (*Zea Mays*

L.). *Journal of Food Science*, 83: 53-59. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.14014>

Nabti, E., Jha, B., & Hartmann, A. (2017). Impact of seaweeds on agricultural crop production as biofertilizer. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 14(7), 1437–1454. <https://doi.org/10.1007/s13762-017-1355-4>

Nankar, A. N., Dungan, B., Paz, N., Sudasinghe, N., Schaub, T., Holguin, F. O., & Pratt, R. C. (2016a). Quantitative and qualitative evaluation of kernel anthocyanins from southwestern United States blue corn. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 96(13), 4542–4552. <https://doi.org/10.1002/jsfa.7671>

Nankar, A. N., Grant, L., Scott, M. P., & Pratt, R. C. (2016b). *Agronomic and kernel compositional traits of blue maize landraces from the southwestern United States*. *Crop Science*, 56(5), 2663–2674. <https://doi.org/10.2135/cropsci2015.12.0773>

Nankar, A. N., Scott, M. P., & Pratt, R. C. (2020c). *Compositional Analyses Reveal Relationships among Components of Blue Maize Grains*. *Plants*, 9(12), 1775. <https://doi.org/10.3390/plants9121775>

Nielsen, R. L. (2019). *Grain fill stages in corn*. Purdue University, Department of Agronomy. Recuperado de <https://www.agry.purdue.edu/ext/corn/news/timeless/GrainFill.html>

Nielsen, R. L., Thomison, P. R., Brown, G. A., Halter, A. L., Wells, J., & Wuethrich, K. L. (2002). Delayed planting effects on flowering and grain maturation of dent corn. *Agronomy Journal*, 94(3), 549–558. <https://doi.org/10.2134/agronj2002.5490>

- Ortigoza Guerreño, J., López Talavera, C. A., & González Villalba, J. D. (2019). *Guía técnica cultivo de maíz*. San Lorenzo, Paraguay: FCA, UNA. <https://www.sidalc.net/search/Record/dig-iica-11324-11893/Description>
- Otto, M., Krasowska, S., MacWilliams, D., Beattie, A., & Blencowe, A. (2024). The solid-state stability of anthocyanins under various conditions and the implications for storage and shelf-life. *Dyes and Pigments*, 231, Article 112367. <https://doi.org/10.1016/j.dyepig.2024.112367>
- Pan, F. G., Liu, Y. J., Liu, J. B., & Wang, E. L. (2019). Stability of blueberry anthocyanin, anthocyanidin and pyranoanthocyanidin pigments and their inhibitory effects and mechanisms in human cervical cancer HeLa cells. *RSC Advances*, 9(19), 10842–10853. <https://doi.org/10.1039/C9RA01772K>
- Pimentel Alvarado, O., & Delgadillo Aldrete, S. (2015). *Agenda Técnica Agrícola, Baja California*. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. <https://isbn.cloud/9786077668121/agenda-tecnica-agricola-baja-california/>
- Pino Q., M. T., Domínguez D., E., & Saavedra, J. (2018). Protocolos estandarizados para la valorización de frutos nativos del PROCISUR frente a la creciente demanda por ingredientes y aditivos especializados. PROCISUR – IICA. <https://www.sidalc.net/search/Record/dig-inia-cl-20.500.14001-63093/Description>
- Qasmi, R. (1991). Amino acid composition of some common seaweeds. *Pakistan Journal of Pharmaceutical Sciences*, 4(1), 49–54. <https://europepmc.org/article/med/16414681>
- Radwan, F., Gomaa, M., Kandil, E., & Farag, F. (2018). *Response of some maize hybrids to foliar spray of seaweed and biofertilization*. *Journal of the Advances*

in *Agricultural Researches*, 23(1), 90–99.  
[https://journals.ekb.eg/article\\_162141\\_0.html](https://journals.ekb.eg/article_162141_0.html)

Rayorath, P., Mundaya, N. J., Amir, F., Khan, W., Ravishankar, P., Simon, D. H., Alan, T. C., & Balakrishnan, P. (2008). Rapid bioassays to evaluate the plant growth-promoting activity of *Ascophyllum nodosum* (L.) Le Jol. using a model plant, *Arabidopsis thaliana* (L.) Heynh. *Journal of Applied Phycology*, 20, 423–429. <https://doi.org/10.1007/s10811-007-9280-6>

Ricci, E. M., & Margaría, C. B. (2022). *Aparatos bucales de insectos: Estructura, funcionamiento, daños ocasionados de importancia agroforestal y hábitos de alimentación*. Editorial de la Universidad Nacional de La Plata. <https://doi.org/10.35537/10915/143456>

Rocandio-Rodríguez, M., Castillo-González, F., Ávila-Perches, M. A., Virgen-Vargas, J., & Lozano-del Río, A. J. (2020). Estimation of genetic diversity in seven races of native maize from the Highlands of Mexico. *Agronomy*, 10(2), 309. <https://doi.org/10.3390/agronomy10020309>

Rocchetti, G., Giuberti, G., Gallo, A., Bernardi, J., Marocco, A., & Lucini, L. (2018). Effect of dietary polyphenols on the in vitro starch digestibility of pigmented maize varieties under cooking conditions. *Food Research International*, 108, 183–191. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.03.049>

Rodríguez Pérez, G., García Ramírez, A., Reynaga Franco, F. de J., Mendivil Mendoza, J. E., Salazar Huerta, F. J., & Hidalgo Ramos, D. M. (2023). Composición fisicoquímica en granos de maíz morado mejorado (*Zea mays* L.) en el sur de Sonora, como alternativa funcional a la salud humana. *LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades*, 4(1), 4327–4340. <https://doi.org/10.56712/latam.v4i1.567>

- Rodríguez-Larramendi, Luis, Guevara-Hernández, Francisco, Ovando-Cruz, Jesús, Marto-González, Juan R., & Ortiz-Pérez, Rodobaldo. (2016). Crecimiento e índice de cosecha de variedades locales de maíz (*Zea mays* L.) en comunidades de la región Frailesca de Chiapas, México. *Cultivos Tropicales*, 37(3), 137-145. <https://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.1.1404.6967>
- Rodríguez-Larramendi, Luis, Guevara-Hernández, Francisco, Ovando-Cruz, Jesús, Marto-González, Juan R., & Ortiz-Pérez, Rodobaldo. (2016). Crecimiento e índice de cosecha de variedades locales de maíz (*Zea mays* L.) en comunidades de la región Frailesca de Chiapas, México. *Cultivos Tropicales*, 37(3), 137-145. <https://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.1.1404.6967>
- Salinas-Moreno, Y., Cruz-Chávez, F. J., Díaz-Ortiz, S. A., & Castillo-González, F. (2012). *Granos de maíces pigmentados de Chiapas, características físicas, contenido de antocianinas y valor nutracéutico*. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 35(1), 33–41. <https://doi.org/10.35196/rfm.2012.1.33>
- Sampayo-Maldonado, S., Castillo-Martínez, C. R., Jiménez-Casas, M., Sánchez-Monsalvo, V., Jasso-Mata, J., & López-Upton, J. (2017). Germinación in vitro de semillas de *Cedrela odorata* L. de genotipos extintos. *Agroproductividad*, 10(8), 53–58. <https://doi.org/10.22004/ag.econ.352722>
- Santiago-López, N., García-Zavala, J. J., Mejía-Contreras, A., Espinoza-Banda, A., Santiago López, U., Esquivel-Esquivel, G., & Molina-Galán, J. D. (2017). *Rendimiento de grano de poblaciones de maíz Tuxpeño adaptado a Valles Altos de México*. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8(1), 145–156. <https://doi.org/10.29312/remexca.v8i1.78>

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2002). *NOM-021-SEMARNAT-2000: Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis*. Diario Oficial de la Federación. <https://platiica.economia.gob.mx/normalizacion/nom-021-semarnat-2000/>

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), cierre de la producción agrícola (1980-2024). [https://www.gob.mx/agricultura/dgsiap/acciones-y-programas/produccion-agricola-404122?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.gob.mx/agricultura/dgsiap/acciones-y-programas/produccion-agricola-404122?utm_source=chatgpt.com) recuperado 27 /10/2025.

Shevchenko, N. M., Anastyuk, S. D., Gerasimenko, N. I., Dmitrenok, P. S., Isakov, V. V., & Zvyagintseva, T. N. (2007). Polysaccharide and lipid composition of the brown seaweed *Laminaria gurjanovae*. *Russian Journal of Bioorganic Chemistry*, 33(1), 88–98. <https://doi.org/10.1134/S1068162007010116>

Shim D., K.J. Lee, y B.W. Lee. (2017). Response of phenology- and yield-related traits of maize to elevated temperature in a temperate region. *Crop J.* 5(4): 305–316. doi: 10.1016/j. cj.2017.01.004

Simic, M, Zilic, ˇ S, Simurina, ˇ O, Filipcev, B, Skrobot, ˇ D, & Vancetovic, J (2018). Effects of anthocyaninrich popping maize flour on the phenolic profile and the antioxidant capacity of mixbread and its physical and sensory properties. *Polish J. Food Nutr. Sci.*, 68, 289–297. <https://doi.org/10.2478/pjfns20180002>

Singh, P. M., Gilley, J. R. and Splinter, W. E. (1976). Temperature thresholds for corn growth in a controlled environment. *Transactions of the ASAE.* 19(6):1152-1155. <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=36192>

- Soleri, D., & Smith, S. E. (1995). *Morphological and phenological comparisons of two Hopi maize varieties conserved in situ and ex situ*. *Economic Botany*, 49(1), 56-77. <https://doi.org/10.1007/BF02862278>
- Stirk, W. A., Arthur, G. D., Lourens, A. F., Novák, O., Strnad, M., & Van Staden, J. (2004). Changes in cytokinin and auxin concentrations in seaweed concentrates when stored at an elevated temperature. *Journal of Applied Phycology*, 16(1), 31–39. <https://doi.org/10.1023/B:JAPH.0000019057.45363.f5>
- Stirk, W. A., Novak, O., Strnad, M., & Van Staden, J. (2003). Cytokinins in macroalgae. *Plant Growth Regulation*, 41(1), 13–24. <https://doi.org/10.1023/A:1027376507197>
- Stirk, W. A., Tarkowská, D., Turečová, V., Strnad, M., & Van Staden, J. (2014). Abscisic acid, gibberellins and brassinosteroids in Kelpak®, a commercial seaweed extract made from *Ecklonia maxima*. *Journal of Applied Phycology*, 26(1), 561–567. <https://doi.org/10.1007/s10811-013-0062-z>
- Sugiharto, K., Rahman, A. N. F., & Zainal. (2020). The effect of solvent type and extraction duration on purple corn anthocyanin compounds (*Zea mays* L.). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 486(1), 012055. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/486/1/012055>
- Tena, N., Martin, J., & Asuero, A. G. (2020). State of the art of anthocyanins: Antioxidant activity, sources, bioavailability, and therapeutic effect in human health. *Antioxidants*, 9(5), 451. <https://doi.org/10.3390/antiox9050451>
- Tong, Y., Wu, Y., Liu, J., & Wu, X. (2021). Low nitrogen supply influences grain composition and metabolic reprogramming in wheat. *Plant Physiology and Biochemistry*, 167, 472–481. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.08.024>

- Vaghela, P., Gandhi, G., Trivedi, K., Anand, K. G. V., Chavda, D., Manna, M., Seth, T., Seth, A., Shanmugam, M., & Ghosh, A. (2023). Underpinning beneficial maize response to application of minimally processed homogenates of red and brown seaweeds. *Frontiers in Plant Science*, *14*, 1273355. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1273355>
- Van Oosten MJ, Pepe O, De Pascale S, Silletti S, Maggio A (2017). The role of biostimulants and bioeffectors as alleviators of abiotic stress in crop plants. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture* 4(5): 1-12; doi:10.1186/s40538-017-0089-5
- Vázquez-Carrillo, M. G., Aparicio-Eusebio, L. A., Salinas-Moreno, Y., Buendía-González, M. O., & Santiago-Ramos, D. (2018). *Nutraceutical, physicochemical, and sensory properties of blue corn polvorones, a traditional flour-based confectionery*. *Plant Foods for Human Nutrition*, *73*(4), 321–327. <https://doi.org/10.1007/s11130-018-0692-z>
- Vázquez-Carrillo, M. G., Preciado-Ortíz, R. E., Santiago-Ramos, D., Palacios-Rojas, N., Terrón-Ibarra, A., & Hernández-Calette, A. (2018). Estabilidad del rendimiento y calidad del grano y tortilla de nuevos híbridos de maíz con valor agregado para el subtrópico de México. *Revista Fitotecnia Mexicana*, *41*(4A), 509–518. <https://www.scielo.org.mx/pdf/rfm/v41n4a/0187-7380-rfm-41-4a-509.pdf>
- Wang, J. y Mazza, G. (2002). Inhibitory effects of anthocyanins and other phenolic compounds on nitric oxide production in LPS/IFN gamma-activated RAW 264.7 macrophages, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *50*(4), 850-857, DOI: <https://doi.org/10.1021/jf010976a>

- Wang, S.Y. y Lin, H.S. (2000). Antioxidant activity in fruit and leaves of blackberry, raspberry and strawberry is affected by cultivar and maturity, *Journal Agricultural and Food Chemistry*, 48(2), 140-146, DOI: <https://doi.org/10.1021/jf9908345>
- Waqas, M. A., Wang, X., Zafar, S. A., Noor, M. A., Hussain, H. A., Azher Nawaz, M., & Farooq, M. (2021). Thermal Stresses in Maize: Effects and Management Strategies. *Plants (Basel, Switzerland)*, 10(2), 293. <https://doi.org/10.3390/plants10020293>
- Yang, H., Gu, X., Ding, M., Lu, W., & Lu, D. (2018). Heat stress during grain filling affects activities of enzymes involved in grain protein and starch synthesis in waxy maize. *Scientific reports*, 8(1), 15665. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-33644-z>
- Zhang, F., Mackenzie, A. F., & Smith, D. L. (1993). Corn yield and shifts among corn quality constituents following application of different nitrogen fertilizer sources at several times during corn development. *Journal of Plant Nutrition*, 16(8), 1317–1337. <https://doi.org/10.1080/01904169309364615>
- Zhang, Z., Wang, S., & Chen, X. (2021). Phenolic compounds in plants: Biosynthesis and biological functions. *Journal of Plant Biology*, 64(1), 1–12. <https://doi.org/10.1007/s12374-020-09367-8>
- Zhu, F. (2018). Anthocyanins in cereals: Composition and health effects. *Food Research International*, 109, 232–249. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.04.015>
- Zhu, Y., Ling, W., Guo, H., Song, F., Ye, Q., Zou, T., Li, D., Zhang, Y., Li, G., Xiao, Y., Liu, F., Li, Z., Shi, Z., & Yang, Y. (2013). Anti-inflammatory effect of purified dietary anthocyanin in adults with hypercholesterolemia: A randomized

controlled trial. *Nutrition, Metabolism & Cardiovascular Diseases*, 23(9), 843–849. <https://doi.org/10.1016/j.numecd.2012.06.005>

Zhuang, L., Wang, C., Hao, H., Song, W., & Guo, X. (2024). Maize Anthesis-Silking Interval Estimation via Image Detection under Field Rail-Based Phenotyping Platform. *Agronomy*, 14(8), 1723. <https://doi.org/10.3390/agronomy14081723>.

Žilić, S., Kocadağlı, T., Vančetović, J., & Gökmen, V. (2016). *Effects of baking conditions and dough formulations on phenolic compound stability, antioxidant capacity and color of cookies made from anthocyanin-rich corn flour*. *LWT - Food Science and Technology*, 65, 597-603. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.08.057>

Zou, P., Lu, X., Zhao, H., Yuan, Y., Meng, L., Zhang, C., & Li, Y. (2019). Polysaccharides derived from the brown algae *Lessonia nigrescens* enhance salt stress tolerance to wheat seedlings by enhancing the antioxidant system and modulating intracellular ion concentration. *Frontiers in Plant Science*, 10, 48. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00048>

## XII. ANEXOS

### 12.1. Anexo A

Se presentaron avances de la investigación de forma oral en el XXVIII Congreso Internacional en Ciencias Agrícolas de 2025.



**XXVIII Congreso Internacional en Ciencias Agrícolas**  
*"Innovación Biotecnológica: Retos y Oportunidades En la Agricultura Moderna"*  
**Universidad Autónoma de Baja California**  
**Instituto de Ciencias Agrícolas**

Otorga la presente  
**Constancia**  
a

**Uribe-Orozco, María Elena, Durán-Hernández, Dagoberto, Munguía-Carriño, Gamaliel, Galicia-Juárez, Marisol, Basilio-Cortés, Ulin Antobelli, González-Mendoza, Daniel, Michel-López, Claudia Yared, Soto-Ortiz, Roberto, Joya-Dávila, José Gregorio**

Por su participación como **PONENTES** en el trabajo titulado:

***INFLUENCIA DE LA NUTRICIÓN QUÍMICA Y ORGÁNICA SOBRE EL RENDIMIENTO DE MAÍZ AZUL (Zea mays L.) DURANTE EL CICLO PRIMAVERA-VERANO EN EL VALLE DE MEXICALI, B.C.***

En la Modalidad de **Ponencia Oral**

  
**Dr. Daniel González Mendoza**  
Director del  
Instituto de Ciencias Agrícolas



  
**Dra. Claudia Yared Michel López**  
Presidenta del  
XXVIII Congreso Internacional en Ciencias  
Agrícolas

Mexicali, Baja California, 23 y 24 de octubre del 2025



## 12.2. Anexo B

Constancia de aceptación del manuscrito a la revista *Terra Latinoamericana* y actualmente se encuentra en proceso de publicación.



### TERRA LATINOAMERICANA

*Difusión Científica de la Sociedad Mexicana  
de la Ciencia del Suelo A.C.*

---

Texcoco, Estado de México, 07 de enero de 2026

**Dr. Dagoberto Durán-Hernández**

Presente

Por este conducto HAGO CONSTAR que el manuscrito intitulado:

**“Efecto del extracto de algas marinas (*Macrocystis pyrifera* / *Gelidium robustum*) sobre la calidad fisiológica de semillas de maíz azul (*Zea mays* L.) almacenadas por dos periodos”**

Cuyos autores son:

Maria Elena Uribe-Orozco, Dagoberto Durán-Hernández, Onécimo Grimaldo-Juárez, Marisol Galicia-Juárez, Ulin Antobelli Basilio-Cortes, Daniel González-Mendoza y Gamaliel Munguía-Cariño

fue ACEPTADO PARA PUBLICARSE en la Revista Terra Latinoamericana. Para los fines que al interesado convengan, se emite la presente CONSTANCIA, a los siete días del mes de enero de 2026.

*Atentamente*



**Dr. Bernardo Murillo Amador**  
Editor en Jefe  
Revista Terra Latinoamericana

<http://www.terralatinoamericana.org.mx/index.php/terra>  
ISSN 2395-8030.  
Reserva de Derechos al Uso Exclusivo No. 04-2012-092017263600-203

---

LA REVISTA TERRA LATINOAMERICANA SE ENCUENTRA EN EL INDICE DE REVISTAS DEL CONACYT, SCIELO, REDALYC, LATINDEX, DOAJ, EBSCO, SCOPUS (ELSEVIER)  
Departamento de Suelos de la Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco km 38.5 Apdo. Post. 45, Chapingo. 56230 Texcoco, Estado de México, México. Tel. 595 952 1721.  
E-mails Editor en Jefe: [editor@terralatinoamericana.org.mx](mailto:editor@terralatinoamericana.org.mx)