



**Evaluación de estrategias de biofortificación con enfoque agronómico sobre la concentración de zinc
en maíz dulce (*Zea mays* L.) var. Saccharata**

Ruiz López, Edison Marcelo

Departamento de Ciencias de la Vida y la Agricultura

Carrera de Ingeniería Agropecuaria

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero Agropecuario

Ing. Landázuri Abarca, Pablo Aníbal

04 de julio del 2022



Departamento de Ciencias de la vida y la Agricultura

Carrera de Ingeniería Agropecuaria

Certificación

Certifico que el trabajo de titulación, **“Evaluación de estrategias de biofortificación con enfoque agronómico sobre la concentración de zinc en maíz dulce (*Zea mays L.*) var Saccharata”** fue realizado por el señor **Ruiz López, Edison Marcelo** el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 04 de julio de 2022



Firmado electrónicamente por:
**PABLO ANIBAL
LANDAZURI
ABARCA**

.....
Landázuri Abarca Pablo Aníbal

C.C: 1708262348



Departamento de Ciencias de la vida y la Agricultura

Carrera de Ingeniería Agropecuaria

Responsabilidad de Autoría

Yo, **Ruiz López, Edison Marcelo**, con cédula de ciudadanía n°1726620196, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **“Evaluación de estrategias de biofortificación con enfoque agronómico sobre la concentración de zinc en maíz dulce (*Zea mays L.*) var Saccharata”** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 04 de julio de 2022

Ruiz López, Edison Marcelo

C.C: 1726620196



Departamento de Ciencias de la vida y la Agricultura

Carrera de Ingeniería Agropecuaria

Autorización de Publicación

Yo Ruiz López, Edison Marcelo, con cédula de ciudadanía n° 1726620196, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: "Evaluación de estrategias de biofortificación con enfoque agronómico sobre la concentración de zinc en maíz dulce (*Zea mays* L.) var Saccharata" en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 04 de julio de 2022

Ruiz López, Edison Marcelo

C.C: 1726620196

Resultados de la herramienta para verificación y/o análisis de similitud de contenidos

Ruiz Lopez Edison Marcelo_Trabajo de titulación.docx

Scanned on: 13:56 June 20, 2022 UTC



Overall Similarity Score



Results Found



Total Words in Text

Identical Words	1254
Words with Minor Changes	273
Paraphrased Words	350
Omitted Words	0



Escaneado electrónicamente por:
**PABLO ANIBAL
LANDAZURI
ABARCA**

Landázuri Abarca Pablo Aníbal

C.C: 1708262348

Dedicatoria

A mis padres Marcelo y Martha, quienes son mi mayor inspiración, que gracias a su guía y apoyo me ha permitido culminar esta etapa de mi vida

A mi hermana Belén, por su apoyo y comprensión en todos mis proyectos

A mis amigos, quienes han hecho que esta etapa sea inolvidable

Agradecimientos

Quiero agradecer de manera especial al Ing. Pablo Landázuri por los conocimientos impartidos. Quien, con su dirección, paciencia y predisposición, permitió llevar a cabo esta investigación.

Al Ing. Juan Tigero, por siempre estar pendiente y compartir sus conocimientos, además de proporcionarme todo el apoyo necesario durante el desarrollo de mi investigación.

A la Ing. Denisse Torres, por su amistad y el apoyo constante durante todas las etapas de la investigación.

A mi familia quienes han sido el motor de aliento para seguir avanzando por las etapas de mi vida. En especial a mi padre, quien fue el amigo más entrañable al que pude conocer en mi vida, una persona que dio ejemplo con su rectitud y sabiduría. A mi madre por ser la fortaleza y el amor que siempre están presentes en el hogar. A mi hermana, que me ha motivado a cumplir mis metas a pesar de las circunstancias.

Quiero agradecer a mis amigos, que siempre estuvieron para brindarme su apoyo, y me han acompañado a través de mi formación personal.

Marcelo Ruiz

Índice de contenidos

Carátula	1
Certificación	2
Responsabilidad de Autoría	3
Autorización de Publicación.....	4
Resultados de la herramienta para verificación y/o análisis de similitud de contenidos	5
Dedicatoria	6
Agradecimientos	7
Índice de tablas	13
Índice de Figuras	14
Resumen	15
Abstract	16
Capítulo I.....	17
Introducción.....	17
Antecedentes	17
Justificación e importancia del tema.....	20
Objetivos	21
Objetivo general.....	21
Objetivos específicos	21
Hipótesis	21
Capítulo II.....	22
Marco referencial	22
Origen y Distribución	22
Taxonomía	22

Morfología	22
Ciclo de cultivo y etapas de crecimiento	25
Maíz Dulce	26
Variedades de maíz dulce estándar (su1).....	26
Variedades de maíz “potenciado de azúcar” (se)	27
Variedades de maíz superdulce o extradulce (sh y bt).....	27
Variedades mejoradas de maíz super dulce (híbridos)	28
El Zinc.....	28
Importancia del Zinc en plantas	28
Mecanismos de adquisición de zinc en plantas	30
El Zinc en el suelo.....	31
Formas de zinc.....	32
Factores que influyen en la disponibilidad de zinc para las plantas	32
El zinc en la salud humana	34
Fitato como factor anti nutricional	36
Estrategias preventivas para el déficit de zinc en humanos.....	37
Biofortificación.....	38
Biofortificación genética	38
Biofortificación agronómica.....	39
Capítulo III.....	41
Materiales y métodos	41
Ubicación y características del área de estudio	41
Establecimiento del ensayo	42
Manejo del ensayo.....	42

Análisis de suelo.....	42
Preparación del terreno	43
Siembra	43
Fertilización	44
Biofortificación	45
Control de químico de insectos y plagas	46
Control de malezas	46
Riego.....	46
Cosecha	46
Postcosecha	46
Análisis de laboratorio.....	47
Diseño experimental	49
Características de las unidades experimentales	49
Factores.....	50
Tratamientos	50
Análisis estadístico	50
Variables de estudio.....	51
Características agronómicas de la planta	51
Características agronómicas de la mazorca	51
Concentración de nitrógeno en grano	52
Concentración de fósforo.....	52
Concentración de Zn.....	53
Biomasa.....	53
Rendimiento	54

CAPÍTULO IV.....	55
Resultados y discusión	55
Parámetros de crecimiento del maíz	55
Altura.....	55
Número de macollos.....	55
Materia seca	56
Características agronómicas de la mazorca	57
Longitud de mazorca	57
Diámetro	58
Hileras por mazorca.....	58
Granos por hilera	58
Peso de mazorcas	59
Características productivas	60
Peso de 1000 semillas	60
Porcentaje de desgrane.....	62
Índice de mazorca	62
Biomasa.....	63
Rendimiento	63
Concentración de nutrientes en granos de maíz dulce	64
Contenido de proteína	64
Contenido de fósforo en maíz dulce	65
Contenido de zinc	66
Análisis de Regresión	68
Relación entre contenido de fósforo y contenido de zinc en granos de maíz dulce.....	68

Relación entre el contenido de proteína y zinc en granos de maíz dulce	69
Correlación entre parámetros de crecimiento, prouctivos y mazorca	70
Capitulo V	72
Conclusiones y recomendaciones	72
Conclusiones	72
Recomendaciones	73
Bibliografía.....	74

Índice de tablas

Tabla 1	Etapas de crecimiento del maíz.....	25
Tabla 2	Sensibilidad relativa de cultivos a la deficiencia de zinc	34
Tabla 3	Ingesta dietética recomendada (IDR) y límites superiores de ingesta (UL) para zinc por edad, género y tipo de dieta.....	36
Tabla 4	Análisis de suelo previo a instalación de ensayo	42
Tabla 5	Especificaciones de siembra	43
Tabla 6	Extracción de macro y micronutrientes en mazorca y planta de maíz dulce	44
Tabla 7	Descripción de los tratamientos.....	50
Tabla 8	Medias \pm desviación estándar de la altura (cm), número de macollos por planta y materia seca (g planta ⁻¹) de maíz dulce (var Saccharata) bajo 6 estrategias de biofortificación con zinc	56
Tabla 9	Medias \pm desviación estándar de longitud (cm), diámetro (cm), hileras por mazorca, granos por hilera y peso de mazorcas (g) de maíz dulce (var Saccharata) bajo 6 estrategias de biofortificación con zinc.....	60
Tabla 10	Medias \pm desviación estándar del peso de 1000 semillas, porcentaje de desgrane, índice de cosecha, biomasa (ton ha ¹) y rendimiento (ton ha ¹) de maíz dulce (var Saccharata) bajo 6 estrategias de biofortificación con zinc	61
Tabla 11	Correlación de los parámetros de crecimiento del maíz dulce, características de la mazorca y características productivas	70

Índice de Figuras

Figura 1 Morfología del maíz	23
Figura 2 Morfología grano de maíz	24
Figura 3 Morfología de la raíz del maíz (corona).....	24
Figura 4 Etapas de crecimiento del maíz.....	25
Figura 5 Mecanismo absorción de zinc, boro y manganeso en plantas	30
Figura 6 Causas de la deficiencia de zinc en los cultivos	31
Figura 7 Disponibilidad de nutrientes de acuerdo con el pH del suelo	32
Figura 8 Deficiencia de zinc en cultivos a nivel mundial	35
Figura 9 Estructura del fitato	37
Figura 10 Invernadero de horticultura - IASA 1.....	41
Figura 11 Diagrama del procesamiento de muestras para análisis de zinc y fósforo	47
Figura 12 Diagrama para el análisis de proteína mediante método Kjeldahl para vegetales.....	48
Figura 13 Disposición de unidades experimentales	49
Figura 14 Esquema de toma de muestras para determinación de biomasa	53
Figura 15 Diagrama de caja del contenido de proteína en granos de maíz dulce (var, Saccharata) bajo 6 estrategias de biofortificación con zinc	64
Figura 16 Diagrama de caja del contenido de fósforo en granos de maíz dulce (var Saccharata) bajo 6 estrategias de biofortificación con zinc	65
Figura 17 Diagrama de caja del contenido de zinc en grano de maíz dulce (var Saccharata) bajo 6 estrategias de biofortificación con zinc	67
Figura 18 Regresión del contenido de fósforo con el contenido de zinc en granos de maíz dulce	68
Figura 19 Regresión del porcentaje de proteína con el contenido de zinc en granos de maíz dulce	69

Resumen

El presente estudio se realizó con el objetivo de evaluar seis estrategias de biofortificación con zinc sobre la concentración de zinc en granos de maíz dulce. Las estrategias que se utilizaron fueron foliar al 1% de $ZnSO_4$, suelo $12\text{ kg ha}^{-1} ZnSO_4$, cebado de semilla al 1% de $ZnSO_4$ y la combinación de las anteriores. Se utilizó medio kilo de semillas de maíz dulce Bandit Harris Moran y fueron sembradas en 5 semilleros de 220 alvéolos, para posterior trasplante en campo. Todas las unidades experimentales recibieron fertilización base de 172.2 kg ha^{-1} de urea, calculado a partir de un análisis de suelo previo. Las aplicaciones foliares realizaron en la etapa vegetativa V9 y las aplicaciones al suelo se suministraron al momento del trasplante. Los resultados mostraron que las estrategias de biofortificación influyeron positivamente en la altura de planta, materia seca por planta, número de mazorcas, longitud de mazorca, diámetro de mazorca, hileras por mazorca, granos por hilera, peso de mazorca, peso de 1000 semillas, porcentaje de desgrane, biomasa, concentración de fósforo y zinc en granos ($p < 0,05$). Sin embargo, no se encontró efecto significativo de las estrategias de biofortificación sobre número de macollos por planta ($p=0,38$) y en la concentración de proteínas en grano ($p=0.10$). Las estrategias combinadas fueron las que experimentaron mayor concentración de zinc con relación a las estrategias solas y testigo. Además, los análisis de correlación permitieron corroborar la viabilidad para la biofortificación de maíz dulce Bandit Harris Moran, al encontrar baja relación entre P y Zn, infiriendo baja concentración de fitatos, los cuales limitan biodisponibilidad de Zn en grano.

Palabras clave: estrategias de biofortificación, biofortificación agronómica, maíz dulce, zinc

Abstract

The objective of this study was to evaluate six biofortification strategies with zinc on the concentration of zinc in grains of sweet corn. The strategies used are foliar at 1% ZnSO₄, soil 12 kg ha⁻¹ ZnSO₄, seed priming at 1% ZnSO₄ and the combination of the above. Half a kilo of sweet corn seeds Bandit Harris Moran and were planted in 5 seedbeds with 220 alveoli, for later transplantation in the field. All the experimental units received fertilization based on 172.2 kg ha⁻¹ of urea, calculated from a previous soil analysis. Foliar applications were made at the V9 vegetative stage and soil applications were given at transplant. The results showed that biofortification strategies positively influenced plant height, dry matter per plant, number of ears, length of ear, diameter of ear, rows per ear, grains per row, weight of ear, weight of 1000 seeds, shelling percentage, biomass, phosphorus, and zinc concentration in grains ($p < 0.05$). However, no significant effect of biofortification strategies was found on the number of tillers per plant ($p = 0.38$) and on grain protein concentration ($p = 0.10$). The combined strategies were the ones that experienced the highest concentration of zinc in relation to the strategies alone and control. In addition, the connection analyzes allowed to corroborate the feasibility for the biofortification of sweet corn Bandit Harris Moran, finding a low relationship between P and Zn, inferring low concentration of phytates, which limit the bioavailability of Zn in grain.

Keywords: biofortification strategies, agronomic biofortification, sweet corn, zinc

Capítulo I

Introducción

Antecedentes

El cultivo de maíz es uno de los más importantes en el mundo, junto a el arroz y trigo, por ello ha experimentado una acelerada transformación tecnológica en su forma de cultivo, incidiendo en la revolución agrícola alrededor del mundo (FAO, 1993) .La superficie cultivada de este cereal a nivel mundial supera los 210 millones de hectáreas (FAO, 2020). En Ecuador se produce más del millón de toneladas por año, de los cuales el 85% de la producción involucra la producción de maíz amarillo duro, siendo este destinado a la elaboración de balanceados (Triviño & Villena, 2019). Los Ríos es la provincia donde se concentra el 49.26% de la producción nacional, seguido de Manabí, Guayas, Loja y Orellana (INEC, 2021).

En 1820 fue descrito por primera vez el maíz dulce como *Zea mays* var. *Saccharata*. Este tipo de maíz se caracteriza por la presencia de genes que inhiben la conversión de azúcares en almidón. En 1924 fue introducido con el híbrido (Redgreen), a partir de ahí ha tomado interés por la industria de congelados y enlatados, por ser una hortaliza con gran adaptación a técnicas de conservación (Parera, 2017).

En Estados Unidos el maíz dulce ha reportado 3,2 millones de toneladas de producción, con ingresos por más de 774 millones de dólares (USDA, 2021), ubicándose como el principal productor de este cultivo a nivel mundial (FAO, 2020). Entre los principales países importadores de maíz dulce se encuentran Rusia con 99.2 mil toneladas, seguido de Alemania, Reino Unido, Japón y Corea del Sur (Kamol & Pulam, 2007). En términos de consumo anual per-cápita de maíz dulce, Estados Unidos reporta 10,8 kg (Parera, 2017). En Ecuador no existe datos estadísticos sobre la superficie cultivada, ni de ingresos por ventas de maíz dulce. Sin embargo, la mayor concentración de productores se ubica en los Ríos con 225 hectáreas (El Universo, 2008).

La base de la alimentación de la mayoría de los países andinos es el consumo del maíz, representando el recurso principal para la obtención de nutrientes, pero lamentablemente los cereales son inherentemente bajos en contenidos de proteínas y de minerales, en especial de Zn (Sharma, et al., 2013). Además, el desarrollo de cultivares y variedades híbridas, ha provocado mejor desempeño de los cultivos, pero con déficits nutrimentales (Suganya, et al., 2021).

El Zn es un micronutriente esencial, el cual interviene en funciones fisiológicas de las plantas, entre ellas; metabolismo de carbohidratos, fotosíntesis, formación de polen, síntesis de proteínas, resistencia de infección por patógenos, entre otras (Suganya, et al., 2021). Por tal motivo la disponibilidad de este mineral está relacionado estrechamente con el rendimiento de los cultivos.

La disponibilidad del Zinc para la planta se ve afectada por su naturaleza inmóvil en el suelo, el cual es tomado por difusión (Sharma, et al., 2013). Además, otros factores que influyen son; pH, materia orgánica, contenido de arcillas, actividad microbiológica del suelo, concentraciones de otros elementos como fósforo y cobre. (Alloway B. , 2009). Por esta razón la deficiencia de este micronutriente es recurrente a pesar de poseer grandes cantidades de Zn en el suelo.

Se han desarrollado varias estrategias para aumentar la disponibilidad de Zn en los cultivos, ya sea a través de herramientas biotecnológicas y enfoques de mejoramiento clásico y molecular. La biofortificación es una práctica agrícola que permite incrementar el contenido y aumentar la biodisponibilidad de vitaminas y minerales en los alimentos, generando un impacto positivo en el estado nutricional de las personas (Sacoto, 2020; Zikankuba, Mteremko, & James, 2019). En la actualidad existen tres enfoques asociados a la biofortificación, como son transgénico, convencional y agronómico, los cuales involucran el uso de biotecnología, mejoramiento de cultivos y estrategias de fertilización, respectivamente (Freire, et al., 2020; Garg, et al., 2018). Los cultivos de interés para utilizar estos enfoques de enriquecimiento son trigo, maíz, sorgo, lupino, frijol común, papa, batata y tomate (Garg, et al., 2018).

Los programas de biofortificación de cultivos, están direccionados a elementos químicos considerados esenciales como son: calcio, cobre, yodo, hierro, magnesio, selenio y zinc (Freire, et al., 2020), en los cuales hay mayor índice de deficiencias en seres humanos (Genc, et al., 2005). Las carencias en hierro y zinc se posicionan en el quinto y sexto lugar entre las principales causas de morbilidad a nivel mundial (Kumar, et al., 2019), alrededor del 50 % de las muertes en niños menores a 5 años son causadas por la falta de estos micronutrientes (Ahmed, Hossain, & Sanin, 2012).

La aplicación de estrategias agronómicas de biofortificación, se han llevado a cabo desde hace algunas décadas, como es el caso de Turquía, donde ensayos en el cultivo de trigo, demostraron, que la aplicación de fertilizantes basados en Zn, mejoran la producción y concentración del mineral en la planta y en el grano del trigo (Yilmaz, et al., 1997). De igual manera Finlandia se destaca en programas de biofortificación agronómica que ha permitido obtener cereales de alto contenido nutrimental beneficiando la salud humana (Cakmak I. , 2008).

El CGIAR en América Latina y Caribe por medio de Harvestplus ha sido responsable de los programas más exitosos en la región. El plan enfocado en el progreso de acciones para la biofortificación de productos como el arroz, frijol, maíz, camote y yuca ha conseguido liberar 45 variedades mejoradas entre los años 2007 al 2018 alrededor del continente (HarvestPlus, 2018). En tanto el Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo CIMMYT a partir del 2004 ha encabezado investigaciones para la biofortificación del maíz en el cono sur, permitiendo el lanzamiento de algunas variedades enriquecidas disponibles en el mercado (GRAIN, 2019).

En Ecuador se han realizado varios ensayos con el fin de enriquecer cultivos primarios como la papa. Un estudio realizado en la provincia de Ambato concluyó que la adición de 25 kg ha^{-1} de Zinc a la fertilización convencional del cultivo de papa, permite alcanzar más de 24 t/ha de producción (Saltos, 2016). En la provincia de Chimborazo se realizó un estudio donde se evaluó la aplicación de Zinc al suelo y follaje del cultivo de papa, siendo la fertilización foliar más eficiente que la edáfica (Pisuña , 2015).

Justificación e importancia del tema

El déficit de micronutrientes es un problema a nivel mundial que tiene mayor presencia en países de desarrollo y en poblaciones rurales, representando una amenaza a la salud pública, el cual se enmarca dentro de la llamada “hambre oculta”, definiéndose como nutrición de mala calidad, que si bien puede llegar a satisfacer las necesidades calóricas por la ingesta de vegetales ricos en carbohidratos, no provee la cantidad necesaria de vitaminas y minerales que son indispensables para un buen estado de salud (Siwela, et al., 2020), esto incrementa el riesgo de contraer enfermedades infecciosas, tales como diarrea, sarampión, paludismo y neumonía (Kumar, et al., 2019).

El maíz es un cultivo con interés principal para la biofortificación, al ser un cereal que es base de la alimentación de muchas personas, en especial a nivel de población rural, donde es más evidente el déficit de micronutrientes como el zinc. La biofortificación agronómica es la alternativa más adecuada para el acceso de población de bajos recursos a alimentos enriquecidos, resolviendo problemas de salud relacionados con el déficit del mineral (Maqbool & Beshir, 2019).

La biofortificación con zinc en maíz dulce es viable para mejorar la ingesta dietética del nutriente en humanos, debido a la particular distribución y acumulación del mineral en las estructuras del grano de este tipo de maíz (Cheaha, et al., 2020). Además, se ha reportado que los procesos de desgerminación involucrados en el procesamiento del maíz, produce la reducción considerable de la concentración de zinc (Suma & Urooj, 2014). Por lo tanto, el maíz dulce al consumirlo en fresco permite facilitar y aumentar la biodisponibilidad de nutrientes como el zinc.

En la actualidad existen escasos programas de mejora para la biofortificación en maíz, ya que la mayoría han estado encaminados a resolver los problemas de deficiencia en el cultivo, más no proveer alimentos nutritivos a la población (Cheaha, et al., 2020). Debido a ello es importante implementar estrategias agronómicas que permitan incrementar el valor nutritivo de los productos de consumo masivo.

Objetivos

Objetivo general

Evaluar el efecto de las estrategias de biofortificación con enfoque agronómico sobre la concentración de zinc en maíz dulce (*Zea mays L.*) var. Saccharata.

Objetivos específicos

- Determinar el efecto de las estrategias de biofortificación sobre los parámetros productivos de maíz dulce.
- Establecer la mejor estrategia de biofortificación agronómica (foliar, cebado de semillas, aplicación al suelo y combinación de estrategias) sobre las concentraciones de zinc en grano.

Hipótesis

H₀: Las estrategias de biofortificación agronómicas solas o combinadas no afectan a la concentración de zinc en grano de maíz dulce y mantiene los parámetros productivos del cultivo en comparación al manejo convencional del cultivo.

H₁: Las estrategias de biofortificación agronómicas solas o combinadas contribuyen a aumentar la concentración de zinc en grano de maíz dulce y mejora los parámetros productivos del cultivo en comparación al manejo convencional del cultivo.

Capítulo II

Marco referencial

Origen y Distribución

El cultivo del maíz data de épocas precolombinas y su antepasado silvestre más cercano es el Teosinte (*Zea diploperennis*), la cual es una hierba que fue domesticada hace 9.000 años en México, para después extenderse por toda América (Matsuoka, Vigouroux, Goodman, & Doebley, 2002), y posteriormente introducido en el año 1492 a Europa por Colón (Tenaillon & Charcosset, 2011).

En Latinoamérica se han descrito 232 variedades de maíz, de ellas 132 tienen origen andino (Timothy, et al., 1963). Históricamente en Ecuador se ha cultivado este cereal en las zonas de sierra centro (consumo fresco) y costa (maíz duro), donde se han descrito 17 variedades de un total de 29 en todo el país (Yáñez, et al., 2003).

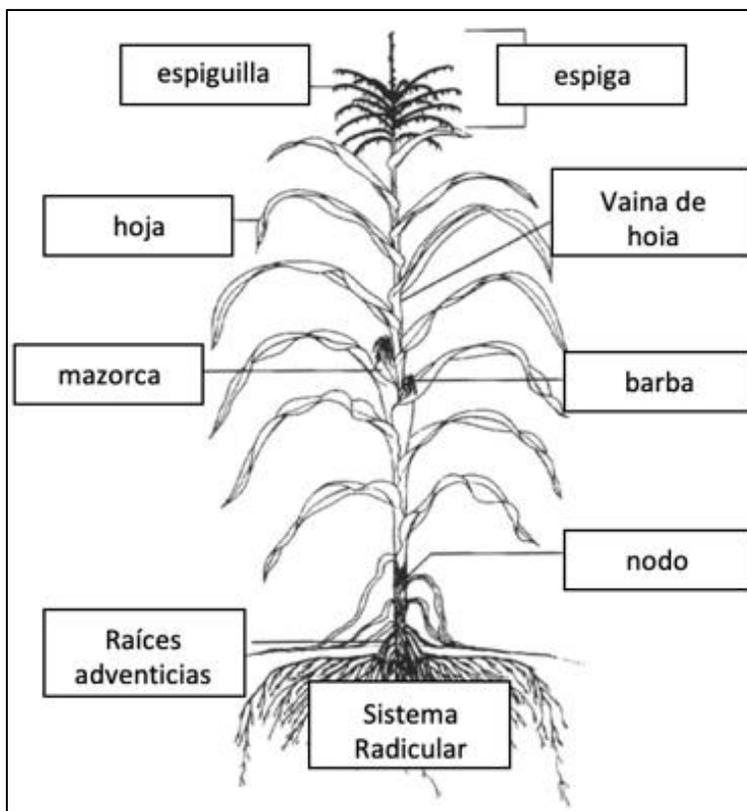
Taxonomía

El “mahiz” como antiguamente lo denominaban culturas provenientes de Centroamérica, fue base primordial del desarrollo de estas poblaciones. Clasificada por primera vez como *Zea mays* por el botánico Linnaeus (Parera, 2017; Tenaillon & Charcosset, 2011). El maíz ha sido descrito botánicamente en el reino *Plantae*, orden *Poales*, familia *Gramineae (Poaceae)*, subfamilia *Panicoideae*, género *Zea*, y especie *Zea Mays* (USDA, 1996).

Morfología

El maíz posee la estructura básica de las gramíneas (figura 1), con 8 nudos o más y altura variable dependiendo de la variedad, factores genéticos y ambientales (Parera, 2017). Las hojas son lanceoladas y se ubican en lados opuestos alternos por cada nudo. Es una planta monoica, teniendo la inflorescencia masculina y femenina separadas en la misma planta. La primera de ellas se ubica terminalmente en forma de espiga, permitiendo la polinización cruzada (alogamia). La inflorescencia femenina se encuentra de forma axilar, cubierta por brácteas (Kling & Edmeades, 1997).

Figura 1

Morfología del maíz

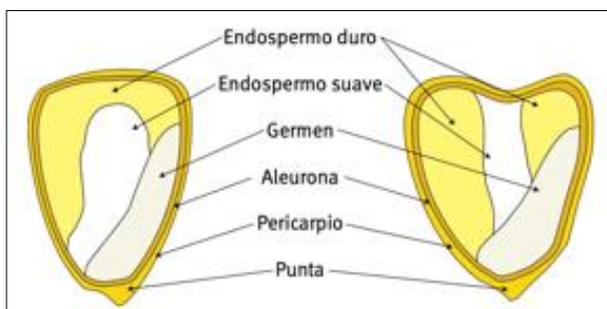
Nota. Recuperado de Morphology and grow of maize (p.7), por Kling & Edmeades, 1997.

<https://biblio1.iita.org/bitstream/handle/20.500.12478/3968/U97BkKlingMorphologyNothomDev.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Los granos del maíz son cariósides, y se componen de pericarpio, endospermo y embrión (figura 2). El primero de ellos se deriva del tejido materno, el cual se encarga de la protección de la semilla (Parera, 2017). El endospermo conforma la mayor parte de la semilla seca y es un tejido de reservas energéticas, constituido por 88% de almidón y 8% de proteína (Kling & Edmeades, 1997). El embrión es un tejido graso constituido por; el escudete (encargado de digerir el almidón proveniente del endospermo) y embrión axis (estructura que posteriormente se diferenciará en plúmula y radícula) (Kling & Edmeades, 1997; Parera, 2017).

Figura 2

Morfología grano de maíz

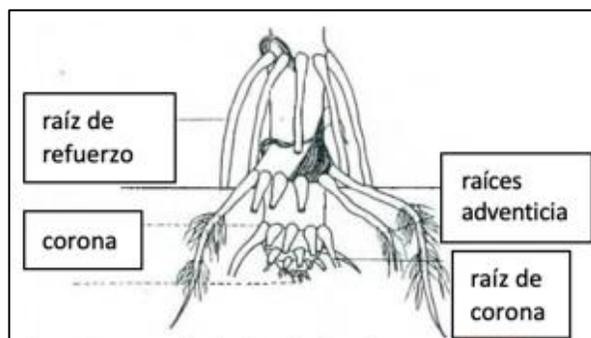


Nota. Recuperado de Morphology and grow of maize (p.9), por Kling & Edmeades, 1997.
<https://biblio1.iita.org/bitstream/handle/20.500.12478/3968/U97BkKlingMorphologyNothomDev.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Las raíces que se desarrollan a partir del embrión se denominan raíces seminales, se encargan de la absorción de nutrientes y agua para el desarrollo de la planta, deteniendo su crecimiento al formarse la segunda hoja (etapa V2) (Parera, 2017). El conjunto de nudos y entrenudos se condensan para formar la corona, esta estructura se encuentra por debajo del perfil del suelo (figura 3). A partir de los nudos más cercanos a la corona se forma raíces adventicias, estas brindan el soporte y captan agua y nutrientes durante todo el ciclo de la planta (Kling & Edmeades, 1997).

Figura 3

Morfología de la raíz del maíz (corona)



Nota. Recuperado de Morphology and grow of maize (p.9), por Kling & Edmeades, 1997.
<https://biblio1.iita.org/bitstream/handle/20.500.12478/3968/U97BkKlingMorphologyNothomDev.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Ciclo de cultivo y etapas de crecimiento

Existen varios factores que afectan el ciclo del cultivo, entre los cuales se encuentran componentes bióticos y abióticos, tales como el clima, disponibilidad de agua, salinidad, patógenos, etc. Existen diversos tipos de variedades de maíz, que se ven influidos por su genotipo, para su desarrollo más acelerado o no. El maíz comprende dos fases; vegetativa (V) y reproductiva (R). Las fases se componen desde la germinación hasta la madurez fisiológica de la planta (tabla 1), y comprenden cambios físicos de la planta y la mazorca (figura 4).

Tabla 1

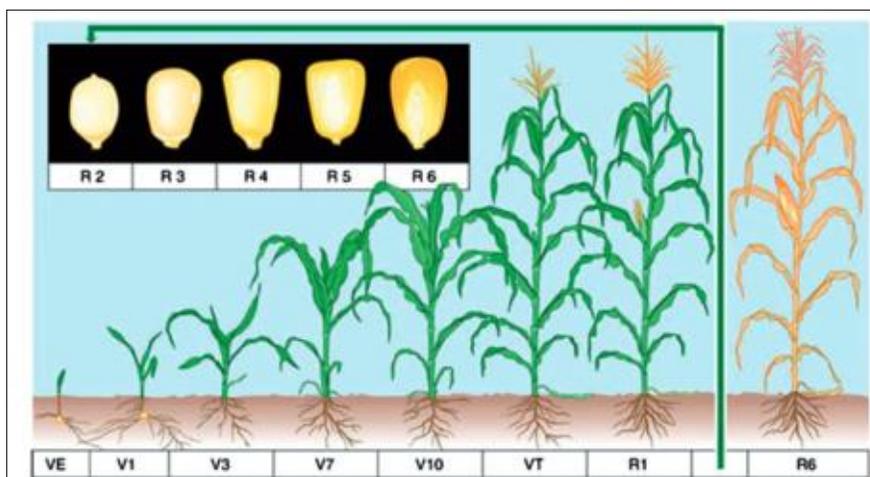
Etapas de crecimiento del maíz

Etapa Vegetativa		Etapa Reproductiva	
VE= Emergencia	V3=Tercera hoja	R1=Barbas (estigmas)	R4=Grano masa
V1=Primera hoja	Vn= n hoja	R2=Grano ampolla	R5=Grano dentado
V2=Segunda hoja	VT=Panojado	R3=Grano lechoso	R6=Madurez fisiológica

Nota. Adaptado de Producción de maíz dulce (p.23), por Parera, 2017, INTA.

Figura 4

Etapas de crecimiento del maíz



Nota. Recuperado de Fertirriego en maíz (p.4), por INTAGRI, 2020, [https:// www.intagri.com/articulos/cereales/fertirriego-en-maiz](https://www.intagri.com/articulos/cereales/fertirriego-en-maiz)

Maíz Dulce

En 1820 se describe por primera vez al maíz dulce (*Zea mays* L.) var. *saccharata* (Parera, 2017). Este cultivo ha tenido interés en su fitomejoramiento hace siglos, permitiendo el desarrollo de híbridos comerciales. En su mejoramiento se empleó líneas endogámicas las cuales se auto fecundaron, con el objetivo de seleccionar las características fenotípicas de interés en el pedigrí de poblaciones de reproducción, a través de ello se eligieron los híbridos con mejor potencial para comercialización (Kamol & Pulam, 2007). El enfoque de los trabajos de mejoramiento fue la manipulación de la constitución química del endospermo, permitiendo variar así la síntesis de almidón durante el desarrollo del grano. Se encontraron 4 genes con mutación de utilidad; *shrunken2* (*sh2*), *brittle1* (*bt*), *sugary1* (*su1*) y *sugary booster1* (*se*), su uso permitió el desarrollo de nuevas variedades super dulces (Kamol & Pulam, 2007).

Variedades de maíz dulce estándar (su1)

Las variedades de maíz dulce estándar se basan en el uso de las mutaciones *su1*. El *Sugary-1* es una mutación que se relaciona con la falta de actividad de las enzimas desramificadoras de almidón de tipo isoamilasa, conocido por sus siglas en inglés como (DBE) (Mouille, et al., 1996; Zhang, et al., 2019). Esta mutación permite la acumulación de polisacáridos solubles en agua (WSP) como el fitoglucógeno y reducción de homopolisacáridos como la amilopectina. El aumento de fitoglucógeno hace que los granos de maíz sean más dulces y a la madurez presenten una apariencia arrugada, traslucidos y aspecto vítreo cuando están secos, como resultado de la alteración de hidratos de carbono (Dinges, Colleoni, Myers, & James, 2001). El contenido en grano lechoso de sucrosa y fitoglucógeno es de 10,2% y 22, 8% respectivamente (Creech, 1965).

El principal inconveniente que presentan estas variedades es la reducida vida postcosecha, por su acelerada pérdida de sucrosa a temperatura ambiente. Por lo que se recomienda su uso para el procesamiento industrial como congelados (Kamol & Pulam, 2007).

Variedades de maíz “potenciado de azúcar” (se)

Descrito por primera vez en 1980 por el profesor Dr. Rhodes de la Universidad de Illinois (Beckingham, 2007). Sugarybooster1 es una mutación recesiva proveniente de la mutación su1, la cual afecta a la biosíntesis del almidón, acumulando el doble de azúcares en relación con su1 (Zhang, et al., 2019). Conserva las características de cremosidad y apariencia cristalina a la madurez del grano propias de su1, además de prolongar la vida útil postcosecha. Este tipo de mutación ayudó al desarrollo de híbridos de alta calidad para el mercado fresco. Sin embargo, la apariencia amarillo opaco del grano, ha hecho que su desarrollo fuera menos acelerado (Kamol & Pulam, 2007).

Variedades de maíz superdulce o extradulce (sh y bt)

El shruken-2 (sh2) fue descubierto en la década de los 50s por el Dr. Laughman, genetista y profesor de la Universidad de Illinois. Posteriormente fue comercializado bajo el nombre de “Illini Xtra Sweet”, hoy en día conocido como maíz super dulce (Beckingham, 2007; Kamol & Pulam, 2007).

El alelo mutante sh2 está localizado en el brazo largo del cromosoma 3, el cual modifica la cantidad de azúcares, aumentando la cantidad de 3 hasta 8 veces más de dulzor en comparación al maíz dulce estándar (Kamol & Pulam, 2007). Las características del grano a la cosecha son; muy dulces (29,9% sucrosa), textura crujiente y prolongada vida útil (Creech, 1965). Esto debido a la baja cantidad de WSP y poca o nula cantidad de almidón. Sin embargo, el grano seco posee una apariencia encogida y arrugada, con bajo vigor y germinación (Ordás, Romay, & Revilla, 2007).

Brittle-1 (bt1) es un gen mayormente usado en Hawaii y extendido para el uso en climas tropicales, y está relacionado con el alelo de inhibición de color A2, que ha permitido el desarrollo de granos de color. Posteriormente se lanzó el bt2, el cual comparte similares características con los genes sh2, reduciendo la acción de las enzimas ADPG pirofosforilasa, permitiendo reducir la acumulación de WSP (Janick, 2015).

Variedades mejoradas de maíz super dulce (híbridos)

El desarrollo de nuevas variedades mejoradas se ha incrementado, debido a los problemas que enfrentan las variedades con un solo gen. Como es el caso de *su1*, que brinda cremosidad al grano, pero pierden el dulzor rápidamente después de su cosecha.

En el ámbito de los maíces super dulces (*sh*, *bt*) poseen buena vida útil postcosecha, pero carecen de buena germinación, vigor y cremosidad (Kamol & Pulam, 2007). Para mejorar las características fenotípicas y agronómicas, se han combinado alelos *se* y *su1*, permitiendo mantener la cantidad de fitoglucógeno, brindando cremosidad al grano y elevando la cantidad de azúcares (Ordás, Romay, & Revilla, 2007). De igual manera fitomejoradores han desarrollado híbridos bajo los nombres comerciales “Sweet Gene-hybrid” y “Sweetie”, que basan la utilización de los genes *su1* y *sh2* (Kamol & Pulam, 2007). En la actualidad el mejoramiento del maíz dulce se sustenta en la utilización de tres grupos genéticos Goldem Bantam, Stowell’s Evergreen y Country Gentleman (Ordás, Romay, & Revilla, 2007).

El Zinc

El zinc es un oligoelemento perteneciente a los denominados “elementos traza esenciales”, por las bajas cantidades que se necesita para el desarrollo de plantas, animales y seres humanos. A pesar de ello cumplen importantes funciones metabólicas, enzimáticas y estructurales de los seres vivos.

Importancia del Zinc en plantas

El zinc es un microelemento posee funciones muy importantes para el correcto funcionamiento celular. El papel inmunomodulador del microelemento permite corregir fallos celulares en el fotosistema II, activando la acción de la enzima SPP (péptido señal peptidasa), para la corrección del daño (Sharma, et al., 2013). Además, está involucrado en el funcionamiento complejo enzimático constituido por; ARN polimerasa, deshidrogenasas, fosfolipasa, ribulosa bifosfato carboxilasa, entre otras (Cakmak I. , 2008).

Fotosíntesis

Según Alloway (2008), la fotosíntesis está ligada a la anhidrasa carbónica, enzima controlada por el zinc. Afecta al metabolismo y absorción de carbohidratos en plantas C3 y en plantas C4 (maíz y sorgo). Los bajos niveles fotosintéticos afectan a la síntesis de clorofila. Debido a malformaciones en las paredes de los cloroplastos.

Formación de almidón

El metabolismo del almidón se relaciona con la actividad de la enzima aldolasa y sintetasa, controladas por el zinc. La baja actividad enzimática de la aldolasa provoca la acumulación de azúcares en las hojas e impide el desplazamiento de la sacarosa a través de los tejidos vasculares. Por el contrario, buenos niveles de zinc permiten la acumulación de almidones (Alloway B. , 2008). En el maíz existe relación positiva entre la cantidad de zinc y la acumulación de almidón en la aleurona, aumentando así el número de granos (Dun-Yi, et al., 2020).

Crecimiento

El zinc forma parte estructural de los promotores de crecimiento (Alloway B. , 2009). Tales como las auxinas (AII), que influyen en las funciones fisiológicas de división y elongación celular. El ácido indol acético promueve el crecimiento de raíces, tanto primarias como secundarias, afecta a la dominancia apical y ayuda a la respuesta ante patógenos (Fu, et al., 2015).

Reproducción

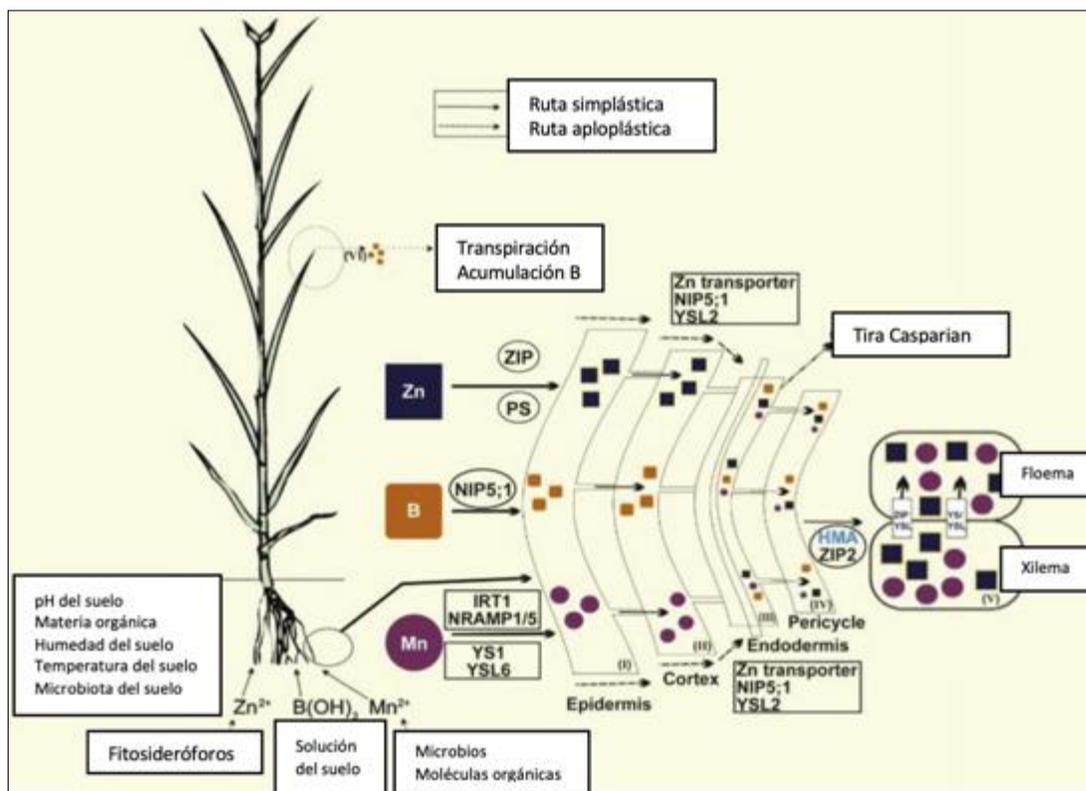
La microsporogénesis y fertilidad del polen son factores reproductivos que están vinculados con el suministro de zinc en fases vegetativas. Los bajos niveles del mineral provocan el aumento de ácido abscísico en la planta y reducción del rendimiento de semilla en cereales y leguminosas (Pandey, Pathak, & Sharma, 2005).

Mecanismos de adquisición de zinc en plantas

Las plantas poseen dos mecanismos para la asimilación de zinc y otros metales. El primero de ellos es la *estrategia de reducción* (I), utilizado por plantas dicotiledóneas. El mecanismo consiste en la reducción del estado de oxidación del metal antes de ser transportado a través de las membranas celulares alojadas en la raíz (Sharma, et al., 2013). Mientras que en plantas monocotiledóneas utilizan las *estrategias de quelación* (II), la cual se fundamenta en secreción de fitosideróforos (figura 5). Responsables de solubilizar los iones de metales (Fe,Zn,Cu,Mn), para formar complejos metal-fitosideróforo, los cuales son trasladados por parte de las proteínas transportadoras a través de la membrana celular (Mendoza, 2004).

Figura 5

Mecanismo absorción de zinc, boro y manganeso en plantas



Nota. Application of Micronutrients in Rice-Wheat Cropping System of South Asia (p.360), por Nadeem & Farooq, 2019, [https://www. https://doi.org/10.1016/j.rsci.2019.02.002](https://doi.org/10.1016/j.rsci.2019.02.002)

Las raíces producen ácidos orgánicos y fitosideroforos, que son considerados quelantes de metales, facilitando la absorción de Zn^{2+} en gramíneas. El transporte del zinc hacia el grano inicia con mecanismo de difusión del metal a células del parénquima del xilema, para después ser transportados fuera del simplasto al xilema muerto. En la época de llenado del grano, el zinc es movilizado en el floema por proteínas transportadoras al fruto (Palmgren, et al., 2008).

El Zinc en el suelo

El zinc es un importante mineral que forma parte del suelo, y su concentración se encuentra determinada por la composición geoquímica del material parental del suelo. Los suelos meteorizados, con alta cantidad de sílice provocan que la mayoría de los elementos se diluyan. Solo la mitad del zinc se encuentra disponible o soluble (Robson, 1993). El zinc se encuentra en rangos de 10 a 100 $mg \cdot kg^{-1}$, teniendo mayor presencia en suelos arcillosos. En contrario, los bajos niveles del micronutriente se reportan usualmente en suelos ligeros (arenosos). La disponibilidad del zinc en el suelo está sujeta a diversas causas (Alloway B. , 2009).

Figura 6

Causas de la deficiencia de zinc en los cultivos



Nota. Adaptado de "Zinc in soils and crop nutrition" (p. 45), por B. Alloway, 2008, Zinc Association and the International Fertilizer Industry Association.

Formas de zinc

El zinc se encuentra en el suelo en tres formas; a) iones libres y zinc complejo presente solución orgánica del suelo, b) zinc absorbible e intercambiable, c) minerales complejos e insolubles. Las reacciones involucradas para su disponibilidad comprenden; a) precipitación y disolución, b) acomplejamiento y des-acomplejamiento, c) adsorción y desorción (Alloway B. , 2008).

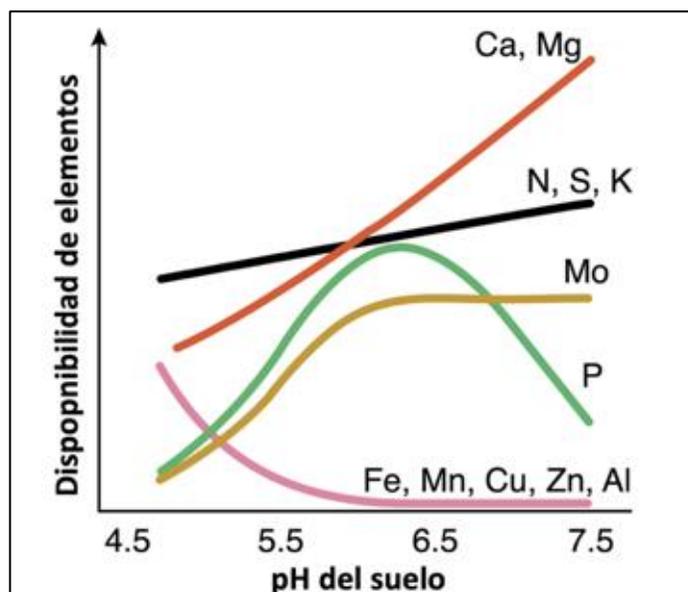
Factores que influyen en la disponibilidad de zinc para las plantas

La interacción de propiedades físicas y químicas del suelo puede determinar la biodisponibilidad de zinc. Los cuales se describen a continuación.

pH. Los pH altos favorecen a la retención de los metales en la superficie del suelo (adsorción), provocando la disminución de solubilidad y movilidad del zinc. Esto se debe a la unión de Zn^{+2} con el grupo OH, formado hidróxido de zinc (insoluble en agua) (Cavagnaro, 2008). Los suelos con pH alto están relacionados con suelos arenosos y en especial de tipo calcáreo (Alloway B. , 2008).

Figura 7

Disponibilidad de nutrientes de acuerdo con el pH del suelo



Nota. Adaptado de Nutrients availability, por Gazey, 2018, <https://agric.wa.gov.au/n/2113>

Materia orgánica. La adición de materia orgánica de rápida descomposición a suelos con déficit permite formar complejos orgánicos solubles. El bajo peso molecular de la solución mejora la movilidad del zinc del suelo hacia las raíces de la planta. Sin embargo, suelos con alta cantidad de materia orgánica puede estar relacionada con déficit de zinc, debido a la formación de complejos orgánicos con materia orgánica de estado sólido (Alloway B. , 2008).

Fósforo. Existe antagonismo en la relación fósforo – zinc. Concentraciones altas de fósforo interfieren en las funciones metabólicas de las plantas para la asimilación de zinc (Alloway B. , 2008). El zinc al combinarse con el fósforo del suelo forma grupos Zn-fosfatos, limitando la absorción del zinc debido a la baja solubilidad de la molécula. Además, los altos niveles del oligoelemento provocan reducción de la población de micorrizas arbusculares, las cuales tienen en entre muchas de sus funciones, tomar el zinc del suelo y transferir a la planta (Cavagnaro, 2008).

Tipo de suelo. Los suelos ligeros tienen baja disponibilidad de zinc. De igual manera los suelos pedregosos, ya que impiden la exploración de las raíces. Además, aquellos suelos que son calcáreos impiden la movilidad del zinc a pesar de contar con suficiente zinc en el suelo, debido a la adsorción de CaSO_4 (Alloway B. , 2008). Además, en los suelos sódicos, el dominio de los sitios de intercambio por parte de los iones de sodio hace que los iones de zinc se pierdan por lixiviación, especialmente bajo riego con agua que contenga una alta concentración de sodio.

Tipo de cultivo y variedad. Existen cultivos que son más sensibles a las deficiencias de zinc. Cultivos como el maíz dulce, frijol, arroz, sorgo son más sensibles a deficiencias de zinc, en comparación a la alfalfa, trigo, centeno, avena, que son más resistentes a la escasez del oligoelemento (tabla 2). También hay variedades que son más eficientes para tomar el zinc del suelo y translocarlos en la planta (Alloway B. , 2008).

Tabla 2

Sensibilidad relativa de cultivos a la deficiencia de zinc

Alto	Medio	Bajo
Frijol	Cebada	Alfalfa
Cítricos	Algodón	Espárragos
Linaza	Lechuga	Zanahoria
Árboles frutales	Papa	Trébol
Uvas	Soya	Césped
Lúpulo	Hierba de Sudán	Avena
Maíz	Remolacha azucarera	Guisante
Cebolla	Remolacha de mesa	Centeno
Nueces de Pecán	Tomate	Trigo
Arroz		
Sorgo		
Maíz dulce		

Nota. Tomado de "Zinc in soils and crop nutrition" (p. 36), por B. Alloway, 2008, Zinc Association and the International Fertilizer Industry Association. Recuperado de <http://www.topsoils.co.nz/wp-content/uploads/2014/09/Zinc-in-Soils-and-Crop-Nutrition-Brian-J.-Alloway.pdf>

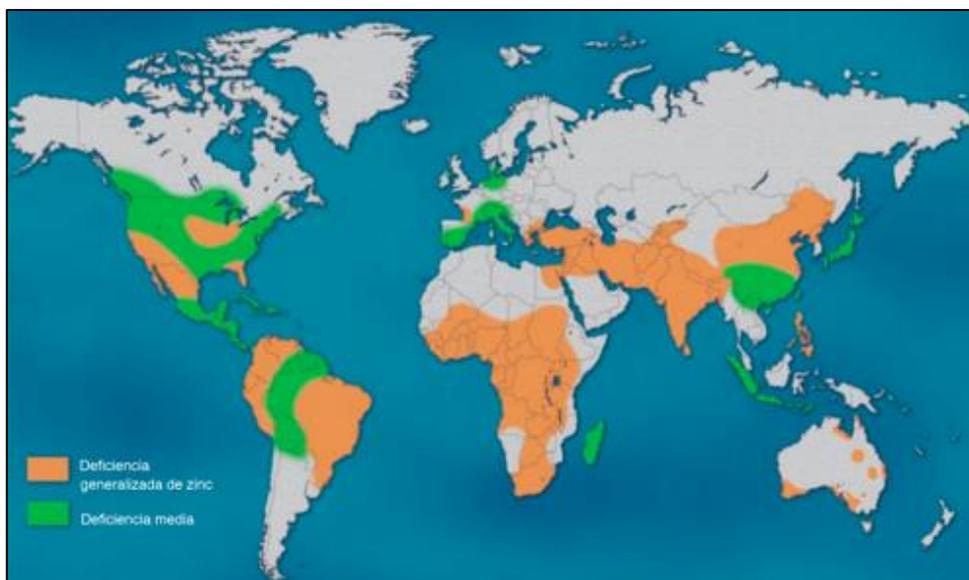
El zinc en la salud humana

El zinc es componente estructural y funcional de muchas macromoléculas, e involucra alrededor 300 reacciones enzimáticas, por ello representa el segundo oligoelemento con más importancia después del hierro (Tapiero & Tew, 2003). El zinc influye en el funcionamiento del sistema inmunológico, crecimiento y desarrollo celular, funcionamiento del sistema sensorial, regulación y expresión génica, desarrollo neuroconductual (Sharma, et al., 2013).

Se estima que un tercio del planeta vive en territorios con alta probabilidad de riesgo en déficit de zinc. La mayor parte de población en situación de riesgo se encuentra en zonas marginales y en países subdesarrollados (figura 7). Para prevención del déficit de este mineral se utilizan alternativas como: suplementación de zinc con medicamentos, fortificación de alimentos preparados, modificación de la dieta, biofortificación de cultivos mediante la utilización de fertilizantes inorgánicos (Alloway B. , 2009).

Figura 8

Deficiencia de zinc en cultivos a nivel mundial



Nota. Tomado de "Zinc in soils and crop nutrition" (p.109), por B. Alloway, 2008, Zinc Association and the International Fertilizer Industry Association. Recuperado de <http://www.topsoils.co.nz/wp-content/uploads/2014/09/Zinc-in-Soils-and-Crop-Nutrition-Brian-J.-Alloway.pdf>

Deficiencia de zinc en humanos

El consumo diario recomendado de zinc oscila de 2 a 15 mg Zn, dependiendo del sexo, edad, tipo de alimentación, entre otros factores (tabla 3). Las deficiencias de zinc pueden provocarse por dietas alimenticias basadas en la ingesta de alimentos con factores anti-nutricionales. Las dietas basadas en el consumo de cereales y tubérculos son inherentes a los bajos niveles de nutrientes que componen el alimento, además de poseer altas cantidades de fitatos, los cuales inhiben la absorción de zinc y otros metales (Graham & Welch, 1996). Las personas más sensibles a déficit de zinc son mujeres embarazadas, lactantes (nacimientos precoces), niños en etapas tempranas de crecimiento y ancianos (López, Castillo, & Diazgranados, 2010).

Las enfermedades asociadas a bajos niveles del mineral son; Retraso de crecimiento, susceptibilidad a enfermedades infecciosas, riesgo de cáncer por disfunciones inmunitarias, retraso maduración sexual, trastornos neuroconductuales y cognitivos, alopecia, hipogonadismo, problemas en cicatrización de heridas, pérdida de apetito, aumento de frecuencias de diarreas, anemia (Sharma, et al., 2013).

Tabla 3

Ingesta dietética recomendada (IDR) y límites superiores de ingesta (UL) para zinc por edad, género y tipo de dieta

Edad	Sexo	Peso de referencia (kg)	RDA (mg/d)		UL (mg/d)
			DM	DC	
6–11 meses	M + F	9	4	5	6
1–3 años	M + F	12	3	3	8
4–8 años	M + F	21	4	5	14
9–13 años	M + F	38	6	9	26
14–18 años	M	64	10	14	44
14–18 años	F	56	9	11	39
Embarazo	F	—	11	15	39
Lactación	F	—	10	11	39
≥ 19 años	M	65	13	19	40
≥ 19 años	F	55	8	9	40
Embarazo	F	—	10	13	40
Lactación	F	—	9	10	40

Nota. Adaptado de International Zinc Nutrition Consultative Group (IZiNCG). Technical Document #1. Assessment of the risk of zinc deficiency in populations and options for its control. Food Nutr Bull 2004; 25(suppl 2): S94–204. (DM= Dieta mixta, DC= Dieta en base de cereales, M= masculino, F= Femenino)

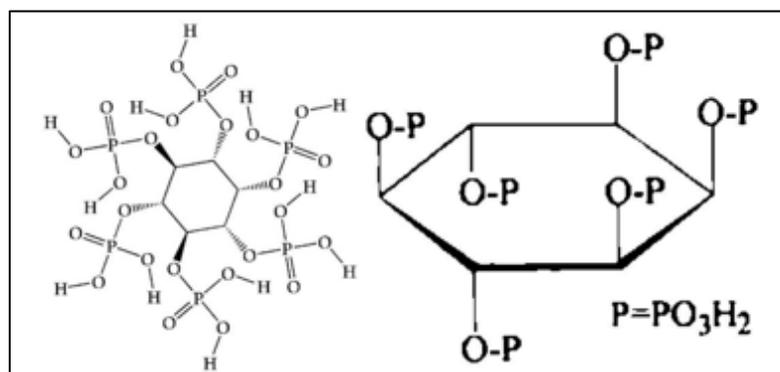
Fitato como factor anti nutricional

El ácido fítico (figura 9) forma parte de semillas de cereales y oleaginosas, en forma de hexafosfato de inositol (IP6). En el caso del maíz la mayor parte de este compuesto se concentra en la capa de aleurona de la semilla y en el embrión (Cheaha, et al., 2020).

El contenido puede variar dependiendo de la especie, variedad, tipo de fertilización y procesamiento, pudiendo representar hasta el 80% del fósforo contenido en la semilla (Coulibaly, Kouakou, & Chen, 2011). El ácido fítico tiene como particularidad quelar metales como el Zn, Fe, Ca, Mn, Cu y K, dando como resultado sales muy insolubles, provocando baja biodisponibilidad de los minerales. Otro factor para la inhibición mineral a causa del ácido fítico es la falta de la enzima fitasa en humanos, responsable de descomponer el fitato (Cheaha, et al., 2020).

Figura 9

Estructura del fitato



Nota. Tomado de "Progress in breeding low phytate crops", por Raboy, 2002, Journal of Nutrition.

Estrategias preventivas para el déficit de zinc en humanos

La ingesta de alimentos de calidad, sumado a una dieta mixta entre alimentos de origen vegetal y animal, permiten prevenir deficiencias nutrimentales. El enriquecimiento de los alimentos es una estrategia implementada sobre cultivos como los cereales y algunas leguminosas, debido a su baja calidad nutritiva. Entre las diversas estrategias implementadas hacia el enriquecimiento en zinc comprenden el uso de fertilizantes, la ingeniería genética, manejo cultural, biofortificación. Además del control de factores edáficos como el pH, contenido de materia orgánica, humedad. Otra estrategia es la administración de zinc en forma de suplemento, pero el alto costo condiciona el acceso a población de escasos recursos económicos.

Biofortificación

Es el proceso de aumentar la biodisponibilidad de minerales esenciales en partes comestibles de la planta, a través del fitomejoramiento (biofortificación genética), la aplicación de fertilizantes al suelo, hojas y semillas (biofortificación agronómica) o la combinación de estas (Sharma, et al., 2013). Estas intervenciones se han llevado a cabo en cultivos básicos (maíz, arroz, trigo, cebada) ya que el alcance puede ser mayor en poblaciones de bajos recursos económicos. Además de incrementar la ingesta de minerales, también permite mejorar parámetros productivos del cultivo como la vigorosidad de la plántula, esto aseguraría tener mejores tasas de siembra (Alloway B. , 2008).

Existen actualmente dos desafíos importantes; a) secuestro de nutrientes beneficiosos evitando a elementos tóxicos, b) evitar la acumulación de nutrientes en partes no comestibles de las plantas como raíces (Palmgren, et al., 2008).

Biofortificación genética

El fitomejoramiento direccionado a aumentar la biodisponibilidad micronutrientes, se basa en el desarrollo y selección de variedades que posean características que influyan en mejor asimilación y aumento de concentración del mineral en partes comestibles del cultivo (Borrill, et al., 2014). El proceso para el desarrollo de variedades mejoradas incluye la selección de germoplasma disponible, fitomejoramiento de los genotipos parentales, pruebas de acumulación de nutrientes en el germoplasma, realización de marcadores moleculares a partir de pruebas genéticas. Una vez seleccionadas las líneas con mejores características, se prueban los genotipos en diversos entornos para lograr la interacción genotipo-ambiente, con el fin de asegurar que el aumento de los minerales no afecte al desempeño del cultivo (Bouis & Saltzman, 2017). Las principales limitaciones se centran en el análisis de extensas genomas en especies relacionadas y parentales, cultivos poliploides, similitud de nucleótidos entre genomas (Borrill, et al., 2014). Otro enfoque de mejora es la manipulación de los niveles de antinutrientes y pronutrientes de los alimentos (Zhao & McGrath, 2009).

Biofortificación agronómica

Son estrategias basadas en el empleo de fertilizantes aplicados al suelo, foliar o semilla, excediendo el nivel de suficiencia, con el fin de incrementar la concentración de minerales en las partes de las plantas consumidas por el ser humano (Rengel, Batten, & Crowley, 1999).

Esta técnica es de las más implementadas, por su facilidad, relación costo-beneficio y compatibilidad para llevarse a cabo como complemento de otros programas de fitomejoramiento (Cakmak I. , 2008).

Biofortificación foliar

Las plantas son capaces de absorber componentes solubles a través de poros acuosos ubicados en cutículas de las hojas (Stacey, Oosterhuis, & McLaughlin, 2008). La pulverización de micronutrientes en las hojas de la planta permite la translocación del mineral a los vasos vasculares, acumulándose en tejidos vegetativos. Los fertilizantes utilizados para el uso en este enfoque de biofortificación son las sales inorgánicas y quelatos, con la particularidad que los fertilizantes quelatados tienen mayor peso molecular, por lo que su absorción es menor en relación con las sales inorgánicas (Schönherr & Schreiber, 2004). Sin embargo, la capacidad de translocación de los metales es mayor cuando se aplica quelatos (Rengel, Batten, & Crowley, *Agronomic approaches for improving the micronutrient density in edible portions of the crops*, 1999).

Biofortificación al suelo

Este enfoque se basa en la utilización de sales inorgánicas o quelatos para incrementar la concentración de minerales en el suelo. Las plantas poseen varios mecanismos para la absorción de nutrientes del suelo (Sharma, et al., 2013). La biodisponibilidad de los minerales depende no solo de la concentración de este, sino también por propiedades fisicoquímicas del suelo (Palmgren, et al., 2008). Las raíces de las plantas son capaces de liberar compuestos orgánicos, con el fin de formar compuestos de bajo peso molecular, facilitando el paso de los metales por la membrana plasmática de células radiculares (Sharma, et al., 2013).

Biofortificación a la semilla

Es un método que implica la hidratación controlada de la semilla (imbibición), mediante la utilización de soluciones osmóticas preparadas a partir de fertilizantes, implicando en la activación del metabolismo germinativo de la semilla (Leubner, 2006). La poca cantidad de fertilizante empleado como la capacidad de tratar lotes de semillas a la vez hacen que este método de biofortificación tenga buena relación costo-beneficio (Ali, et al., 2018). Además de influir sobre la velocidad de germinación, uniformidad de germinación y vigorosidad de la planta (Leubner, 2006). El proceso consiste en sumergir lotes de semillas en soluciones osmóticas con aireación permanente durante un tiempo limitado (antes de perder tolerancia a la desecación), posteriormente se secan las semillas al aire para su posterior uso en campo (Ali, et al., 2018). Las principales limitantes son el control de tiempo de cebado, almacenamiento de semilla tratada y temperatura de almacenamiento (Leubner, 2006).

Capítulo III

Materiales y métodos

Ubicación y características del área de estudio

El estudio se realizó en el invernadero de horticultura dentro del campus de la Carrera de Ingeniería Agropecuaria (IASA 1) perteneciente a la Universidad de las Fuerzas Armadas (ESPE), ubicado en la hacienda “El Prado”, parroquia San Fernando, cantón Rumiñahui, provincia de Pichincha. Geográficamente se localiza a $0^{\circ}23'20''$ S, $78^{\circ}24'44''$ O y a una altitud de 2748 m.s.n.m (Arce, 2009). La temperatura media a campo abierto es $13,96^{\circ}\text{C}$ y $18,4^{\circ}\text{C}$ dentro del invernadero. La precipitación anual promedio es de 1285 mm, con humedad relativa de 68% (campo abierto) y 40.16% (bajo invernadero) y luminosidad de $1500 \text{ umol.m}^2\text{s}^{-1}$ (Arce, 2009; Villarreal, 2018). Ecológicamente se encuentra en el piso altitudinal montano bajo, zona de vida bosque húmedo montano, región latitudinal templada (Holdridge, 1982).

Figura 10

Invernadero de horticultura - IASA 1



Nota. Adaptado de [IASA], de Google maps, s.f.
<https://goo.gl/maps/si5ryZTxq3TqUUUmU9>.

Establecimiento del ensayo

Esta investigación se desarrolló durante los meses de noviembre 2021 a marzo de 2022, periodo en el cual se evaluó los parámetros productivos de la planta y mazorca del maíz dulce, además de contenido nutricional de los granos de maíz (Zn, N y P).

Manejo del ensayo

Análisis de suelo

Se recolectó 6 submuestras de suelo, posteriormente se mezclaron y se tomó 1 kg de suelo homogenizado para ser analizados en laboratorio. El análisis se realizó en el laboratorio de suelos, foliares y aguas de Agrocalidad, ubicado en la Granja del MAGAP, parroquia Tumbaco, ciudad Quito. De acuerdo con el informe del análisis de suelo (tabla 4), se pudo evidenciar ligera alcalinidad del suelo (pH de 7,72), deficiencia en nitrógeno y nivel de fósforo fuertemente elevado.

Tabla 4

Análisis de suelo previo a instalación de ensayo

Parámetro analizado	Unidad	Resultado	Interpretación Sierra Ecuatoriana
pH a 25 °C	---	7,72	Ligeramente Alcalino
Materia Orgánica	%	2,64	Alto
Nitrógeno	%	0,13	Bajo
Fósforo	mg kg ⁻¹	238,4	Muy Alto
Potasio	cmol kg ⁻¹	0,23	Medio
Calcio	cmol kg ⁻¹	13,63	Alto
Magnesio	cmol kg ⁻¹	3,82	Alto
Hierro	mg kg ⁻¹	238,6	Alto
Manganeso	mg kg ⁻¹	9,99	Alto
Cobre	mg kg ⁻¹	6,99	Alto
Zinc	mg kg ⁻¹	9,06	Alto

Nota. Interpretación por INIAP, 2020

Preparación del terreno

El área total del ensayo fue deshierbada manualmente, y se retiró el cultivo anterior (espinaca), posteriormente se delimitó el área con la ayuda de estacas y piola. El suelo de las camas fue aireado y nivelado utilizando azadón y rastrillo. Además, se construyó una estructura con largueros de bambú de 2m de alto, para cubrir el área total del ensayo con malla anti pájaros, debido a la alta incidencia de gorriones (*Passer domesticus*), los cuales sacaron y trozaron las plantas de maíz en fases iniciales, necesitando una resiembra total.

Siembra

Se sembraron las semillas de maíz dulce híbrido var. Bandit Harris Moran en 10 bandejas de germinación de 220 alveolos. Los semilleros fueron llenados con turba Lambert LM-GPS previamente humedecida. Cuatro bandejas fueron destinadas para los tratamientos T1, T5 y T6 debido a que las semillas tenían un tratamiento previo de cebado con $ZnSO_4$ al 1%. Se colocó una semilla por cada alveolo y se mantuvieron las plántulas en las bandejas de germinación hasta que alcanzaron 10 cm de altura.

Tabla 5

Especificaciones de siembra

Descripción	Valor
Longitud de la hilera	21 m
Distancia entre hileras	0.30 m
Distancia entre sitios	0.20 m
Sitios por hilera	105
Plantas por sitio	1
Hileras por cama	2
Superficie útil por cama	14.7 m ²
Densidad poblacional	80.000 plantas/ha

Nota. Descripción de siembra de plantas de maíz dulce en campo

El trasplante se realizó una vez que todas las plántulas de las bandejas tuvieran una altura de 10 cm. El suelo fue humedecido previamente y las plantas fueron sembradas de acuerdo con la tabla 6.

Fertilización

Para los cálculos de fertilización se tomó en cuenta la extracción de nutrientes de la planta de maíz dulce, reflejados en tabla 7.

Tabla 6

Extracción de macro y micronutrientes en mazorca y planta de maíz dulce

Órgano	Extracción (kg ha ⁻¹)										
	N	P	K	S	Ca	Mg	B	Fe	Mn	Cu	Zn
Mazorca	57,17	10,20	38,11	4,15	2,24	4,37	0,026	0,100	0,049	0,015	0,081
Planta	141,23	15,02	193,92	13,00	23,09	15,24	0,056	0,412	0,336	0,056	0,145
Total	198,4	25,22	232,03	17,15	25,33	19,61	0,082	0,512	0,385	0,071	0,226

Nota. Tomado de "Producción de raíz dulce" (p. 39), por Parera, 2017, INTA, Recuperado de https://inta.gob.ar/sites/default/files/libesu8734_inta_asaho_web_maiz_dulce_v1.pdf

Todas las unidades experimentales recibieron únicamente fertilización nitrogenada, debido a que fue el único macronutriente que se encontró en deficiencia. Para el cálculo de la dosis de nitrógeno a aplicar, se utilizó la ecuación del método de Stanford cuya fórmula es la siguiente:

$$\text{Dosis de N} = \frac{\text{DC} - \text{S}}{\text{E}}$$

Donde:

DC = Demanda del cultivo

S = Aporte del suelo

E = Eficiencia del fertilizante

(Saavedra, 2015)

En total se aplicó 172.2 kg ha⁻¹ de Urea verde (46% N). La fertilización fue fraccionada en tres partes iguales, al trasplante, 30 ddt (días después del trasplante) y previo a la antesis.

Biofortificación

Foliar

Previo a la preparación de la solución se midió el pH del agua utilizada y se corrigió con HNO_3 hasta tener pH de 6.5. Se preparó una solución de ZnSO_4 al 1% a partir de sulfato de zinc monohidratado. Después se aplicó mediante aspersión en hojas y tallos de la planta con la ayuda de una bomba de mochila manual de 20 litros, según los tratamientos. La época de aplicación fue una vez que las plantas estén en etapa vegetativa V9.

Cebado de semilla

Se utilizó agua destilada y sulfato de zinc monohidratado para la preparación de la solución de cebado al 1% de ZnSO_4 . Previo al cebado, las semillas de maíz fueron lavadas hasta desprender el fungicida adherido. Se colocaron las semillas junto con la solución en un envase de vidrio en proporción 1:5 p/v. Durante el tiempo de cebado se proporcionó aireación constante con la ayuda de un air pump de 2.5 W. Finalizado el tiempo de cebado, se lavó las semillas a profundidad por tres ocasiones con agua destilada y se secaron a la sombra, hasta retomar el peso inicial. Las semillas se sembraron en bandejas de germinación al igual que las semillas que no requerían del cebado de los otros tratamientos.

Suelo

Se aplicó 12 kg ha^{-1} sulfato de zinc granular monohidratado (33% Zn) a los costados de las hileras en bandas según el tratamiento. La aplicación del total de zinc se lo hizo al momento del trasplante junto a la fertilización de base. Posterior a la aplicación se humedeció el suelo para mejor absorción del nutriente.

Biofortificación combinada

Las estrategias de biofortificación descritas anteriormente se combinaron dependiendo del tratamiento asignado sin ningún cambio en la metodología.

Control de químico de insectos y plagas

Al momento del trasplante y 45 ddt se realizaron aspersiones con CLORPILAQ[®] 48 (Chlorpyrifos) en dosis de 1 litro por hectárea, para el control del gusano trozador (*Agrotis ipsilon*). Además, se aplicó 1.5 litros por hectárea de NEEM-X 0.40 EC para el control del gusano del choclo (*Helicoverpa zea*) en la etapa R2 del cultivo (llenado de mazorca).

Control de malezas

El control post-emergente de malezas se realizó una vez cada tres semanas de forma manual con la ayuda de azadón y rastrillo.

Riego

Se utilizó riego RAF el cual contó con dos cintas de riego de 15mm con caudal de 2.1 l h⁻¹, ubicadas a los laterales de cada hilera. La frecuencia de riego fue durante 2 h día⁻¹ por 3 días. Los riegos fueron modificados en tiempo y días cuando se presentaba mayor evapotranspiración por incidencia de sol.

Cosecha

La cosecha se realizó a finales del mes de marzo cuando el grano de maíz se encontró al 76% de humedad. Se retiró las mazorcas de toda el área de ensayo, apartando las correspondientes a las plantas etiquetadas para los análisis. Se procuró cosechar en horas de la mañana, evitando la incidencia directa del sol y se colocaron las mazorcas en gavetas de plástico para después ser pesadas en una balanza digital. Las gavetas con las mazorcas fueron almacenadas en cuarto frío a -10 °C hasta su procesamiento de postcosecha.

Postcosecha

Las mazorcas Las mazorcas fueron limpiadas de tierra y posibles insectos, retirando solo las hojas delanteras que envolvían a las mazorcas. Las mazorcas fueron empacadas en bandejas plásticas B-12, cubiertas con filme plástico sellado con calor. Se almacenaron en cuarto frío a -10 °C hasta su venta.

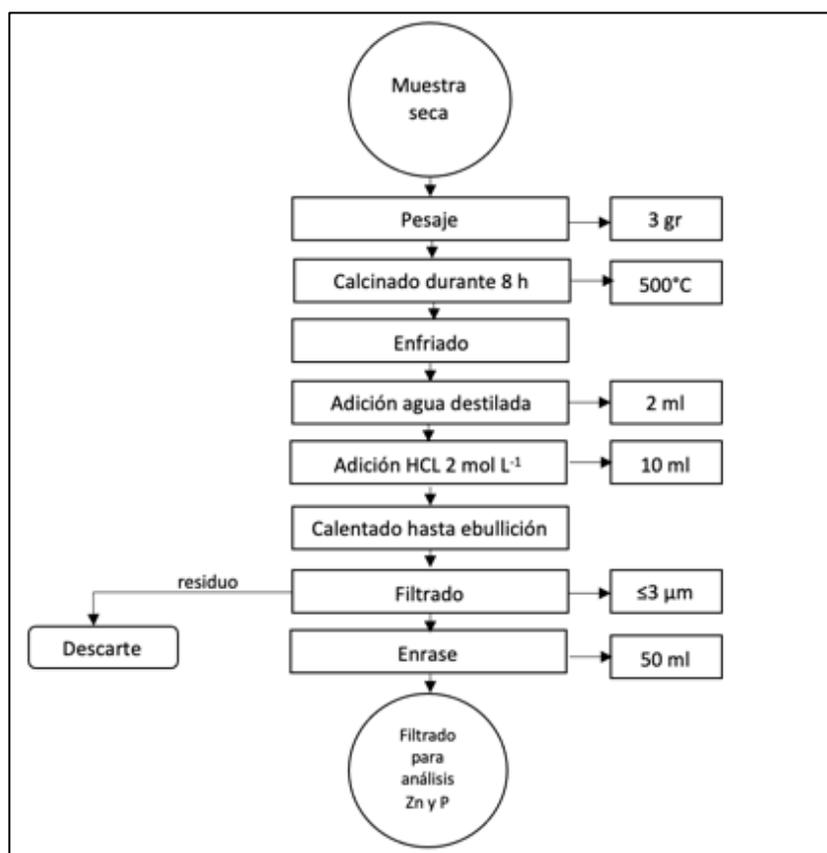
Análisis de laboratorio

Determinación de nutrientes (Zn, P y N)

Para el análisis nutricional de los granos de maíz, se cosecharon las mazorcas de 5 plantas tomadas al azar, una vez retiradas las hojas de cobertura se colocaron en fundas de papel por tratamiento y se enviaron a la estufa a $70^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ durante 48 horas, hasta que tengan un peso estable. Las mazorcas secas fueron desgranadas y posteriormente se pulverizaron los granos de maíz con la ayuda de un molino eléctrico (partículas $<1\text{ mm}$). A partir de las muestras molidas se prepararon los filtrados para el análisis de nutrientes (exceptuando para N), mediante la metodología del siguiente diagrama.

Figura 11

Diagrama del procesamiento de muestras para análisis de zinc y fósforo

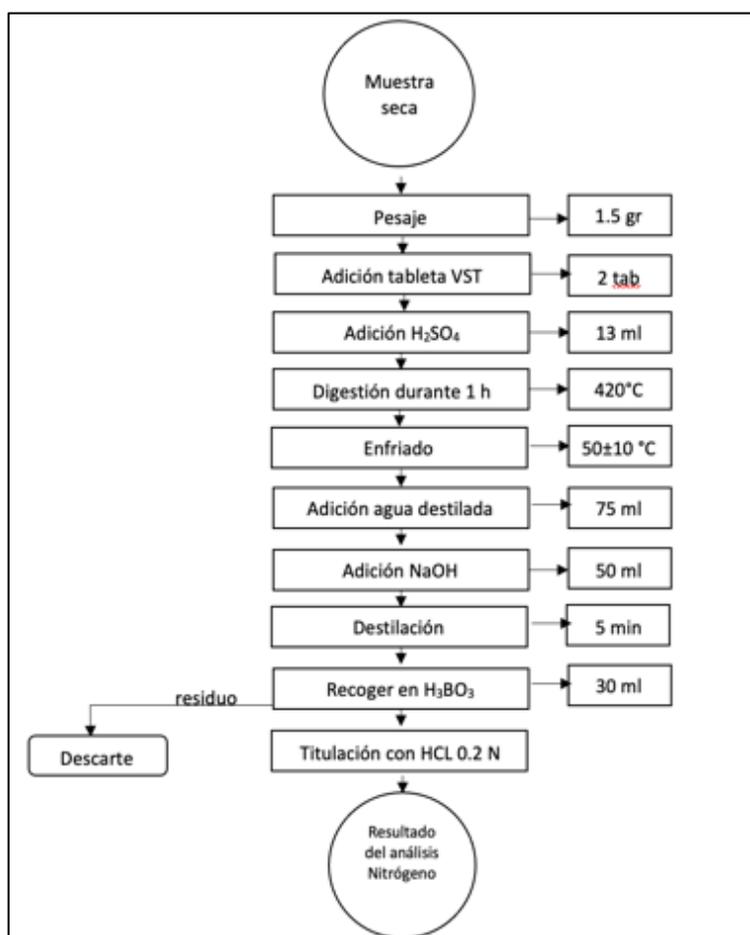


Nota. Tomado de "Métodos de análisis de tejidos vegetales" Sadzawka, et al., 2007

Para los análisis de zinc se utilizó directamente los filtrados y se determinó el contenido mediante el espectrofotómetro de absorción atómica Shimadzu AA-6800. Mientras que para la determinación del fósforo se preparó soluciones de vanadato de amonio ($0,9 \text{ g L}^{-1}$), molibdato de amonio (19 g L^{-1}) y ácido nítrico ($1,5 \text{ mol L}^{-1}$), mezcladas en partes iguales. Se tomó en tubos de ensayo 1 ml de los filtrados y 4 ml de la solución anterior y se dejó reposar por una hora. Posteriormente se leyó a 466 mm de absorbancia en el espectrofotómetro Spectroflex 6600.

Figura 12

Diagrama para el análisis de proteína mediante método Kjeldahl para vegetales



Nota. Tomado de "Métodos de análisis de tejidos vegetales" Sadzawka, et al., 2007

Para el contenido de proteína (N) se utilizaron las muestras molidas previamente y se sometieron a digestión mediante el método de Kjeldahl para vegetales, descrito en el diagrama de la figura 12.

Diseño experimental

El experimento se dispuso mediante un diseño de bloques completamente al azar con siete tratamientos y tres repeticiones. El modelo matemático que se siguió fue el siguiente:

$$Y_{ijk} = \mu + F_i + B_j + \varepsilon_{ijk}$$

Donde:

Y_{ijk} = Acumulación de zinc en granos de maíz

μ = Media general

F_i = Efecto de la i-ésima estrategia de biofortificación

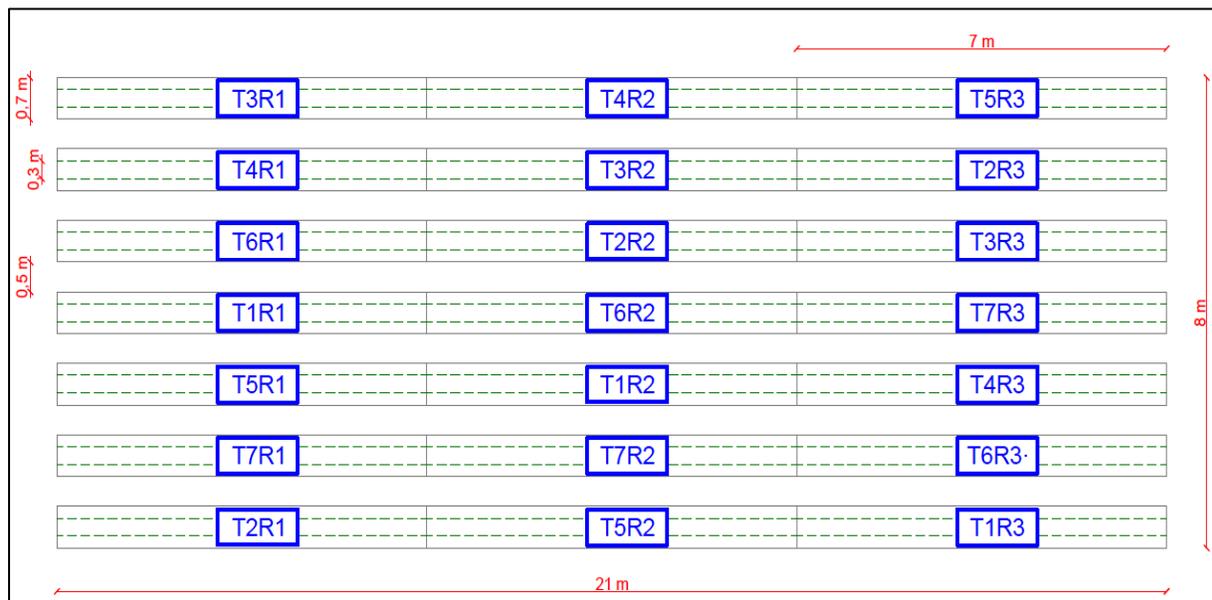
B_j = Efecto de la j-ésimo bloque

ε_{ijk} = Error experimental.

Características de las unidades experimentales

Figura 13

Disposición de unidades experimentales



Nota. Los códigos correspondientes a cada unidad experimental (azul) se detallan en la tabla 4

Se formaron siete camas de 0.7 m de ancho, 21 m de largo, 0,15 m de altura y 0.5 m de camino entre camas. Cada cama fue dividida en 3 para un total de 21 unidades experimentales (figura 11).

Factores

En esta investigación se analizó las estrategias de biofortificación de zinc como único factor de estudio sobre la concentración de zinc.

Tratamientos

Como indica la tabla 4, el estudio contó con siete tratamientos que son resultado de la combinación de estrategias de biofortificación suelo, foliar y cebado de semilla.

Tabla 7

Descripción de los tratamientos

Tratamiento	Descripción
T1	Cebado de semilla (Solución al 1% ZnSO ₄)
T2	Aplicación al suelo (12 mg kg ⁻¹ ZnSO ₄)
T3	Aplicación foliar (Solución al 1% ZnSO ₄)
T4 (Testigo)	Sin aplicación de Zinc
T5	Cebado de semilla (Solución al 1%) + Aplicación de Zn al suelo (12 mg kg ⁻¹)
T6	Aplicación al suelo (12 mg kg ⁻¹) + Aplicación foliar (Solución al 1%)
T7	Cebado de semilla (Solución al 1%) + Aplicación foliar (Solución al 1%)

Nota. La disposición de los tratamientos en campo se muestra en la figura 11

Análisis estadístico

Las variables de estudio inicialmente se caracterizaron mediante estadística descriptiva (media y desviación estándar), así como la valoración de normalidad y homocedasticidad. Para evaluar el efecto de las estrategias de biofortificación con zinc sobre los parámetros productivos, parámetros de crecimiento y contenido nutrimental (ANAVA). Posteriormente se utilizó una prueba de comparación de medias de Tukey. Todos los análisis fueron realizados en el software estadístico R con un nivel de significancia del 5%.

Variables de estudio

Para todas las variables agronómicas se seleccionaron 10 plantas al azar de cada unidad experimental. Las plantas fueron etiquetadas y analizadas al final del ciclo del cultivo.

Características agronómicas de la planta

Altura, número de mazorcas y macollos

Se registró la altura (cm) con la ayuda de una cinta métrica desde la base de la planta hasta la hoja bandera, antes de la inflorescencia masculina. Se determinó el número de macollos por planta y número de total de mazorcas, de las cuales se agruparon en plantas con una o dos mazorcas.

Características agronómicas de la mazorca

Peso, diámetro, longitud, número de hileras y número de granos por hilera

El peso de la mazorca fue tomado individualmente, se utilizó una balanza digital de $\pm 0,1$. El diámetro (cm) se tomó con cinta métrica, a la altura del tercio medio de la mazorca. La longitud (cm) fue determinada con la ayuda de cinta métrica desde el ápice, exceptuando el pedúnculo de la mazorca. Se contaron las hileras y el número de granos por hilera, procurando excluir granos abortados e hileras sobrepuestas.

Porcentaje de desgrane (PD)

Para este parámetro las mazorcas fueron desgranadas en fresco y se determinó mediante la siguiente fórmula:

$$PD = \frac{PG}{PM}$$

Donde:

PG= Peso de grano (g)

PM= Peso de la mazorca (g)

(INIAP, 2018)

Peso de 1000 semillas (P1000)

Las mazorcas fueron desgranadas en fresco y se tomaron 200 semillas al azar de cada tratamiento.

$$P1000 \text{ (g)} = 200 \text{ semillas} * 5$$

(CYMMYT, 2017)

Concentración de nitrógeno en grano

Fue calculado a partir de la titulación del resultado de la digestión de las muestras. La normalidad de la solución para todas las muestras fue de 0.1.

$$\%N = \frac{14 * N * V * 100}{m * 1000}$$

Donde:

N = Normalidad de la solución

V = Gasto de titulación

m = Masa de la muestra (g)

(Sadzawka, et al., 2007)

Concentración de fósforo

A partir del resultado obtenido de la lectura a 466 nm de absorbancia en espectrofotómetro.

$$\%P = \frac{(A - B) * VF}{m * 10000}$$

Donde:

A = mg L⁻¹ de P en la muestra

B = mg L⁻¹ promedio de blancos

VF = Volumen de filtrado (ml)

m = masa de la muestra analizada (g)

(Sadzawka, et al., 2007)

Concentración de Zn

A partir de los resultados obtenidos en espectrofotometría de absorción atómica (ASS).

$$\%Zn = \frac{(A - B) * VF}{m * 10000}$$

Donde:

A= mg L⁻¹ de Zn en la muestra

B= mg L⁻¹ promedio de blancos

VF= Volumen de filtrado (ml)

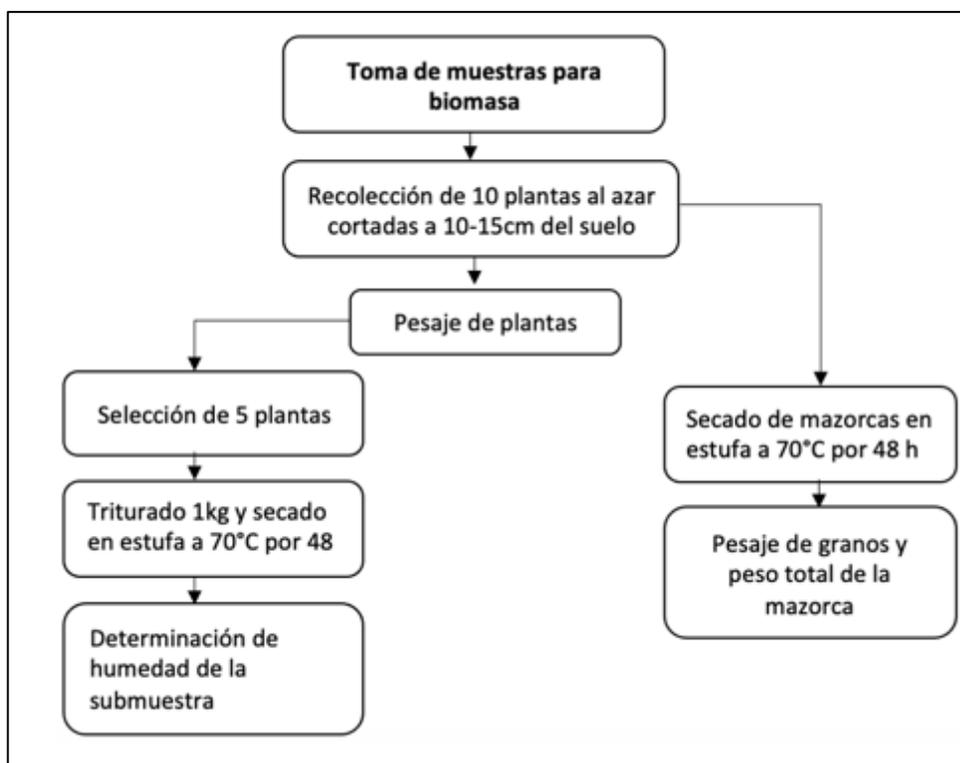
m= masa de la muestra analizada (g)

(Sadzawka, et al., 2007)

Biomasa

Figura 14

Esquema de toma de muestras para determinación de biomasa



Nota. Adaptado de "Protocolos para mediciones de plantas en las plataformas de investigación" por CIMMYT, 2017, Centro de mejoramiento de maíz y trigo.

Para la determinación de biomasa se tomó muestras de 10 plantas al final del ciclo del cultivo. Se siguió el protocolo propuesto por CYMMYT (2017), descrito en el esquema de la figura 13. Una vez obtenidos los pesos de las muestra y submuestras de 10 plantas, se aplicó la siguiente fórmula.

$$\text{Biomasa 10 plantas} = [\text{PF} - (\text{PF} * \%H)] + \text{PSM}$$

Donde:

PF = Peso fresco de 10 plantas

%H = Humedad de la submuestra

PSM = Peso seco de 10 mazorcas

$$\text{Biomasa total} = \text{Biomasa de 10 plantas} * \# \text{ plantas UE}$$

(CYMMYT, 2017)

Rendimiento

Para esta variable se consideró 76% de humedad del grano de maíz a la cosecha. Se determinó mediante la siguiente ecuación en ton ha⁻¹:

$$\text{Rendimiento} = \frac{\text{PC} * \text{PD} * \text{MS} * 1000}{20 * \text{AP}}$$

Donde:

PC = Peso fresco (kg) de mazorcas cosechadas por unidad experimental (UE)

PD = Proporción de desgrane

MS = Materia seca de mazorcas cosechadas (100 - %Humedad grano a la cosecha)
expresado en decimales.

AP = Área de la UE

(INIAP, 2018)

CAPÍTULO IV

Resultados y discusión

Parámetros de crecimiento del maíz

Altura

La altura de las plantas de maíz dulce (*var Saccharata*) fue medida en fase productiva (después de la floración femenina). Como muestra la tabla 8, se determinó que hubo diferencias significativas entre los tratamientos ($F_{6,14} = 11.50, p > 0,001$). Siendo que los tratamientos que involucraron el cebado de semilla (1% de $ZnSO_4$), como también la estrategia combinada de aplicación al suelo (12 kg $ZnSO_4$) más aspersión foliar (1% de $ZnSO_4$) influyeron positivamente en el crecimiento de la planta en 15.06% al 28.91% de incremento en comparación al testigo. Esto se debe por la relación del zinc como parte estructural de promotores de crecimiento como el ácido indol acético, cuya función es la división y elongación celular (Alloway B. , 2009). Corroborado por el estudio de Mohsin *et al.* (2014) donde la aplicación combinada foliar-cebado de semilla al 2% en maíz híbrido DK-919 durante los años 2009 a 2010, influyó en el aumento de altura de la planta con relación al testigo. Además, en otro estudio en el cual se utilizó como estrategia agronómica proveer a la semilla de maíz GM-6 una mezcla de 4g de $ZnSO_4$ con solución viscosa jaggery, de $ZnSO_4$ por kilogramo de semilla, resultó en mayor altura de la planta de maíz en comparación al control (Ladumor, et al., 2019).

Número de macollos

El número de macollos por planta no tuvo diferencias entre estrategias de biofortificación ($F_{6,14} = 1.16, p = 0.378$). Esto puede estar relacionado a la existencia de varios factores que determinan la presencia y número de macollos como; población, antecedentes genéticos del híbrido, condiciones de crecimiento, disponibilidad de nutrientes entre otros (Thomison, 2017). Los macollos son estructuras vegetales que crecen en los laterales de la planta de maíz influyendo en la superficie foliar como también en la tasa fotosintética.

Sin embargo, ha existido preocupación por parte de agricultores, asumiendo que la presencia de retoños perjudicaría el rendimiento del maíz. Por ello se han realizado estudios, donde se determina que la presencia de estas ramas laterales no afecta al rendimiento, más bien en algunos casos se verían beneficiados al aumentar el rendimiento (Veenstra, et al., 2021).

Tabla 8

Medias \pm desviación estándar de la altura (cm), número de macollos por planta y materia seca (g planta⁻¹) de maíz dulce (var Saccharata) bajo 6 estrategias de biofortificación con zinc

Tratamiento	Altura (cm)	Número de macollos	Materia seca (g planta ⁻¹)
1 (CE) 1% de ZnSO ₄	1.91 \pm 0.04abc	1.97 \pm 0.25ns	78.17 \pm 1.35abcd
2 (SU) 12 kg ha ⁻¹	1.90 \pm 0.12bc	2.00 \pm 0.10ns	77.49 \pm 4.70bcd
3 (FO) 1% de ZnSO ₄	1.78 \pm 0.04cd	1.93 \pm 0.06ns	72.76 \pm 1.69cd
4 (Testigo)	1.66 \pm 0.04d	1.77 \pm 0.15ns	68.02 \pm 1.35d
5 (FO +CE) 1% de ZnSO ₄ + 1% de ZnSO ₄	2.14 \pm 0.12a	1.97 \pm 0.15ns	93.91 \pm 6.26a
6 (CE+SU) 1% de ZnSO ₄ + 12 kg ha ⁻¹	2.00 \pm 0.10abc	2.07 \pm 0.21ns	85.40 \pm 9.46abc
7 (FO+SU) 1% de ZnSO ₄ + 12 kg ha ⁻¹	2.04 \pm 0.09ab	2.03 \pm 0.06ns	92.55 \pm 8.63ab

Nota. Se muestra medias y desviación estándar n=10. Medias de cada columna seguida de la misma letra no presenta diferencias significativas al $p < 0.05$ por test de Tukey HSD. (CE= Cebado de semillas, SU= Aplicación al suelo y FO= aplicación foliar).

Materia seca

La materia seca por planta presentó diferencias significativas entre estrategias de biofortificación ($F_{6,14} = 8.70$, $p > 0,001$). Las plantas en las que se aplicó zinc foliar (1% de ZnSO₄) con cebado de semilla (1% de ZnSO₄), presentaron mayor acumulación de materia seca, seguido de las otras estrategias combinadas. Sin embargo, los tratamientos en los que se aplicó un solo tipo de biofortificación, no se diferenciaron estadísticamente con el testigo (tabla 8).

El maíz tiende a acumular más materia seca desde su germinación hasta la etapa vegetativa V16, posterior a esta etapa los recursos son redireccionados hacia el desarrollo de la espiga y producción de grano (Hanway, 1996). La biodisponibilidad de zinc durante las etapas tempranas de desarrollo es vital para promover el crecimiento y aumento del área foliar (Sharma, et al., 2013). Esto se debe por la influencia del zinc sobre el aumento de triptófano y auxinas en la planta (Nadergoli, Yarnia, & Khoei, 2011). Según la investigación realizada por Ladumor *et al.* (2019), se incrementó la materia seca por planta (89.76 g) cuando las semillas fueron tratadas previamente con 4g de ZnSO₄ por kilo de semilla.

Características agronómicas de la mazorca

Longitud de mazorca

El análisis estadístico para la longitud de la mazorca presentó diferencias significativas entre estrategias de biofortificación con zinc ($F_{6,14} = 4.46, p = 0,013$). La longitud de las mazorcas osciló entre 16.64 cm y 17.74 cm. Las plantas que recibieron biofortificación foliar (1% de ZnSO₄) y la combinación foliar más suelo (1% de ZnSO₄+ 12 kg ha⁻¹) tuvieron mayor tamaño de mazorca (tabla 9). Estos resultados sugieren el transporte eficiente del zinc a través de la removilización del nutriente absorbido por las hojas hacia el floema y posteriormente hacia la mazorca. Además, la suplementación de zinc permitiría mejor captación de nitrógeno durante la etapa de llenado de la mazorca, influyendo positivamente en las características de la misma (Grzebisz & Szczepaniak, 2008). Resultados similares a los obtenidos por Mohsin, *et al.* (2014), quien reportó mayor longitud de la mazorca cuando se aplicó zinc vía foliar (2%) más cebado de semilla (2%) en maíz híbrido DK-919, coincidiendo con la investigación de Ladumor, *et al.* (2019) y Rasool, Ahmad, & Farooq (2019). En contraste con la investigación realizada por Zunaira, *et al.* (2022), donde la longitud de la mazorca no se vio afectada por la aplicación exógena de zinc y hierro.

Diámetro

El diámetro de las mazorcas de maíz dulce varió significativamente por el uso de las distintas estrategias de biofortificación ($F_{6,14} = 4.46, p = 0,018$). El diámetro osciló entre 4.43 cm y 4.72 cm, siendo los tratamientos de fertilización foliar + aplicación al suelo (1% de $ZnSO_4 + 12 \text{ kg ha}^{-1}$) y cebado de semilla + aplicación al suelo (1% de $ZnSO_4 + 12 \text{ kg ha}^{-1}$), los que presentaron mayor diámetro (tabla 9). Estos resultados permiten determinar que la combinación de estrategias de biofortificación siempre y cuando incluyan fertilización foliar, permiten mejores características agronómicas de la mazorca. Estos resultados coinciden con los reportados por Safyan, Bahari, & Reza (2012) y Mohsin, *et al.* (2014) en donde las aplicaciones combinadas fueron las que mostraron mayor diámetro. Sin embargo, en la investigación desarrollada por Ladumor, *et al.* (2019) determinó que el tratamiento de semilla con 4kg $ZnSO_4$ promovió mejor desarrollo de la mazorca en comparación a la combinación de estrategias de biofortificación.

Hileras por mazorca

El análisis estadístico del número de hileras por mazorca determinó no que existió diferencias estadísticas significativas entre estrategias de biofortificación ($F_{6,14} = 4.46, p \geq 0,05$). Sin embargo, el tratamiento que evidenció menor cantidad de hileras (13.3) fue el tratamiento testigo (sin aplicación de zinc). Estos resultados pueden deberse a la interacción genotipo – ambiente, limitando el número de hileras a los que determina el híbrido (var. Harris Bandit). En contraste a estudios donde se complementó la biofortificación del maíz con otros elementos como hierro, manganeso o boro (Rasool, Ahmad, & Farooq, 2019; Zunaira, *et al.*, 2022; Rajendran & Veeramani, 2022).

Granos por hilera

El número de granos por hilera en mazorca mostró diferencias significativas entre estrategias de biofortificación ($F_{6,14} = 8.30, p = 0,006$). Como se observa en la tabla 9, el tratamiento que tuvo mayor cantidad de granos por hilera (31.87) fue la combinación de la aplicación foliar + suelo.

Esto está relacionado por la interacción del zinc con la capacidad de absorción de nitrógeno del suelo. El nitrógeno tiene una estrecha relación con la división celular, por lo que en la etapa de llenado de la mazorca es vital el suministro de nitrógeno y este se encuentra limitado por las rutas de absorción de nutrientes para el llenado de granos (Siddiqui, Oad, Abbasi, & Gandahi, 2009). Coincidiendo con la investigación de Rajendran & Veeramani (2022), donde la biofortificación foliar con zinc más hierro al 0.5% permitió tener mayor cantidad de granos por hilera. Al contrario de los hallazgos de Zunaira *et al.* (2022), el cual reportó que no influyó la biofortificación de Fe + Zn en este parámetro.

Peso de mazorcas

El peso de las mazorcas varió significativamente por el uso de las distintas estrategias de biofortificación ($F_{6,14} = 8.30, p \leq 0,006$). Como se muestra en la tabla 9, el peso de las mazorcas osciló entre 187.40 g a 222.57 g. Siendo el tratamiento testigo (sin aplicación de zinc), el que tuvo menor peso de mazorca (187.40 g).

Los resultados obtenidos sugieren que los antecedentes de suelo con deficiencia de zinc afectan fuertemente al rendimiento y biomasa de la planta. Al igual que el estudio realizado por Rajendran & Veeramani (2022) donde concluyó que la adición de fertilización orgánica e inorgánica por partes iguales más aplicación foliar al 0.5% de zinc más hierro permitió incrementar el peso de las mazorcas en 13,17 g con relación al testigo. Sin embargo, en la investigación de Zunaira, *et al.* (2022) los tratamientos donde se involucró biofortificación al suelo con 10 kg ha^{-1} de ZnSO_4 y la combinación de 10 kg ha^{-1} de ZnSO_4 más 12 kg ha^{-1} de FeSO_4 , fueron los que presentaron mayor peso de mazorca en comparación a la biofortificación foliar y testigo, entre los cuales no hubo diferencias estadísticas significativas.

Tabla 9

Medias \pm desviación estándar de longitud (cm), diámetro (cm), hileras por mazorca, granos por hilera y peso de mazorcas (g) de maíz dulce (var *Saccharata*) bajo 6 estrategias de biofortificación con zinc

Tratamiento	Longitud (cm)	Diámetro (cm)	Hileras por mazorca	Granos por hilera	Peso de mazorcas (g)
1 (CE) 1% de ZnSO ₄	17.43 \pm 0.36ab	4.61 \pm 0.09ab	13.33 \pm 0.06a	29.27 \pm 1.14b	222.57 \pm 9.38a
2 (SU) 12 kg ha ⁻¹ ZnSO ₄	17.09 \pm 0.37ab	4.53 \pm 0.17ab	13.63 \pm 0.35a	27.77 \pm 0.99b	209.50 \pm 8.15a
3 (FO) 1% de ZnSO ₄	17.71 \pm 0.11a	4.58 \pm 0.07ab	13.83 \pm 0.45a	30.07 \pm 0.75ab	212.43 \pm 5.97a
4 (Testigo)	16.64 \pm 0.26b	4.43 \pm 0.17b	13.40 \pm 0.26a	28.00 \pm 0.44b	187.40 \pm 1.73b
5 (FO+CE) 1% de ZnSO ₄ + 1% de ZnSO ₄	17.33 \pm 0.42ab	4.57 \pm 0.06ab	14.03 \pm 0.40a	29.50 \pm 0.44b	205.10 \pm 8.55a
6 (CE+SU) 1% de ZnSO ₄ + 12 kg ha ⁻¹	17.53 \pm 0.10ab	4.76 \pm 0.06a	14.07 \pm 0.38a	28.67 \pm 0.75b	222.50 \pm 1.68a
7 (FO+SU) 1% de ZnSO ₄ + 12 kg ha ⁻¹	17.74 \pm 0.47a	4.72 \pm 0.09a	14.20 \pm 0.20a	31.87 \pm 1.10a	211.03 \pm 2.87a

Nota. Se muestra medias y desviación estándar n=10. Medias de cada columna seguida de la misma letra no presenta diferencias significativas al $p < 0.05$ por test de Tukey HSD. (CE= Cebado de semillas, SU= Aplicación al suelo, FO= Aplicación foliar)

Características productivas

Peso de 1000 semillas

Para la variable del peso de 1000 semillas de maíz dulce tuvo diferencias significativas entre las estrategias de biofortificación con zinc ($F_{6,14} = 10.06$, $p = 0,002$). Las plantas en las que se aplicó fertilización al suelo (12 kg ha⁻¹ ZnSO₄) combinado con aplicación foliar (1% ZnSO₄) presentó mayor peso de 1000 semillas (108.33 g), en comparación a las estrategias de biofortificación solas y testigo (tabla 10).

Tabla 10

Medias \pm desviación estándar del peso de 1000 semillas, porcentaje de desgrane, índice de cosecha, biomasa (ton ha¹) y rendimiento (ton ha¹) de maíz dulce (var Saccharata) bajo 6 estrategias de biofortificación con zinc

Tratamiento	Peso 1000 semillas (g)	Porcentaje desgrane	Índice de Mazorca	Biomasa ton ha ⁻¹	Rendimiento ton ha ⁻¹
1 (CE) 1% de ZnSO ₄	91.50 \pm 2.00cd	0.70 \pm 0.04ab	1.10 \pm 0.10abc	13.07 \pm 0.25a	11.04 \pm 0.60bc
2 (SU) 12 kg ha ⁻¹ ZnSO ₄	97.00 \pm 6.06abc	0.67 \pm 0.02ab	1.13 \pm 0.12abc	12.90 \pm 0.70ab	12.18 \pm 0.93abc
3 (FO) 1% de ZnSO ₄	94.00 \pm 1.50bcd	0.68 \pm 0.03ab	1.03 \pm 0.06bc	12.47 \pm 0.47ab	11.52 \pm 1.28abc
4 (Testigo)	81.75 \pm 2.75d	0.65 \pm 0.05b	1.00 \pm 0.00c	11.67 \pm 0.15b	10.43 \pm 0.45c
5 (FO+CE) 1% de ZnSO ₄ + 1% de ZnSO ₄	102.00 \pm 5.77abc	0.68 \pm 0.04ab	1.27 \pm 0.06a	13.33 \pm 0.60a	13.48 \pm 0.44ab
6 (CE+SU) 1% de ZnSO ₄ + 12 kg ha ⁻¹	105.75 \pm 1.75ab	0.71 \pm 0.02ab	1.23 \pm 0.06ab	13.10 \pm 0.60a	12.94 \pm 1.10ab
7 (FO+SU) 1% de ZnSO ₄ + 12 kg ha ⁻¹	108.33 \pm 9.36a	0.78 \pm 0.06a	1.30 \pm 0.10a	13.37 \pm 0.45a	13.37 \pm 0.70a

Nota. Se muestra medias y desviación estándar. Medias de cada columna seguida de la misma letra no presenta diferencias significativas al $p < 0.05$ por test de Tukey HSD. (CE= Cebado de semillas, SU= Aplicación al suelo, FO= Aplicación foliar).

El mayor peso de los granos está relacionado con el incremento de la actividad fotosintética atribuido a mayor área foliar, biomasa y brotes (Sharma, Agarwala, & Sharma, 1990). Estos resultados concuerdan con los hallazgos de Zunaira, et al. (2022), donde la aplicación de 10 Kg ha⁻¹ ZnSO₄ con 12 kg ha⁻¹ FeSO₄ influyó en mayor peso de 1000 granos. No obstante, los datos expuestos por Mohsin, et al. (2014) indican mejores resultados cuando se combina la aplicación foliar (2% ZnSO₄) más cebado de semillas (2% ZnSO₄). Similar a lo reportado por Safyan, Bahari, & Reza (2012), quienes concluyeron que la aspersión foliar de zinc más hierro, ayudó a incrementar el peso de 1000 granos de maíz.

Porcentaje de desgrane

El porcentaje de desgrane varió significativamente entre estrategias de biofortificación con zinc ($F_{6,14} = 3.41, p = 0,027$). Como lo muestra la tabla 10, la relación del peso de la mazorca con el peso del grano fluctuó entre 65% a 78%. El tratamiento que tuvo mejor desempeño en esta variable fue la combinación de biofortificación foliar (1% de $ZnSO_4$) más biofortificación al suelo ($12 \text{ kg ha}^{-1} ZnSO_4$). Sin embargo, los tratamientos restantes y testigo no tuvieron diferencias estadísticamente significativas entre ellos. El rendimiento de grano también ha sido asociado con la humedad de grano, genotipos, prácticas culturales y condiciones agroclimáticas (Rajendran & Veeramani, 2022). En este ámbito existen discrepancias entre estudios, en los cuales se afirma que la mayor parte del zinc responsable del llenado del grano es removilizado desde el suelo (Grzebisz & Szczepaniak, 2008). Por otra parte, se sugiere que alrededor del 60% de zinc se moviliza del tallo a los granos (Bender, Haegele, Ruffo, & Below, 2013). Corroborado por Rajendran & Veeramani (2022) quienes encontraron 81.1% de desgrane cuando aplicaron hierro y zinc vía aspersión.

Índice de mazorca

Se reflejó fuerte variación significativa del índice de cosecha por aplicación de diferentes estrategias de biofortificación con zinc ($F_{6,14} = 6.62, p = 0,0018$). Los mejores índices de mazorca fueron 1.30, 1.27 y 1.23, correspondientes a las biofortificaciones combinadas foliar + suelo, foliar + semilla y suelo + semilla respectivamente (tabla 10). Los resultados obtenidos sugieren que la combinación de rutas de absorción beneficia al rendimiento de mazorcas por planta. Las rutas de absorción del zinc hacia la semilla constan de varias etapas, empezando por absorción mediante células epidérmicas de la raíz o absorción directa a través de las hojas, acumulación en xilema (apoplástico) y floema (simplástico) para posterior traslocación a las semillas (Palmgren, et al., 2008). Sin embargo, según Ladumor, *et al.* (2019) tratar con 4g de $ZnSO_4$ por kilogramo de semillas, permitiría tener mayor número de mazorcas por planta.

Biomasa

El rendimiento biológico de las plantas de maíz dulce presentó diferencias significativas entre estrategias de biofortificación ($F_{6,14} = 4.38, p = 0,01$). Como lo indica la tabla 10, la biomasa osciló entre $11.67 \text{ ton ha}^{-1}$ hasta $13.37 \text{ ton ha}^{-1}$. Los tratamientos con mejor rendimiento fueron los que combinaron estrategias de biofortificación. Mientras que los tratamientos que tuvieron una única ruta de aplicación (con excepción del cebado de semillas) resultaron con menor desempeño y no presentaron diferencias estadísticas con el testigo. El incremento de producción de biomasa puede estar atribuido a la correcta nutrición del cultivo, buenas condiciones al momento de la siembra, en especial las semillas que fueron tratadas previamente con fuentes de zinc, resultando en mayor cantidad de materia seca. Coincidiendo con ensayos en los que el cebado de semilla benefició en el rendimiento biológico (Mohsin, et al., 2014; Ladumor, et al., 2019).

Rendimiento

El rendimiento de maíz por hectárea mostró diferencias estadísticas significativas entre estrategias de biofortificación con zinc ($F_{6,14} = 5.96, p = 0,029$). Los tratamientos con mejor desempeño fueron la combinación de aplicaciones foliar + suelo (1% de $\text{ZnSO}_4 + 12 \text{ kg ha}^{-1}$), foliar + cebado (1% de $\text{ZnSO}_4 + 1\%$ de ZnSO_4) y cebado + suelo (1% de $\text{ZnSO}_4 + 12 \text{ kg ha}^{-1}$), con rendimientos de $13.48 \text{ ton ha}^{-1}$, $13.37 \text{ ton ha}^{-1}$ y $12.94 \text{ ton ha}^{-1}$ respectivamente. Respecto a los tratamientos restantes, no presentaron diferencias significativas entre ellos con el testigo (tabla 10). Estas evidencias sugieren que el uso combinado de estrategias mejora el rendimiento del maíz. Resultados similares a los obtenidos por Rajendran & Veeramani (2022), quienes reportaron que la biofortificación foliar de zinc y hierro al 0.5% aumentó el rendimiento de maíz.

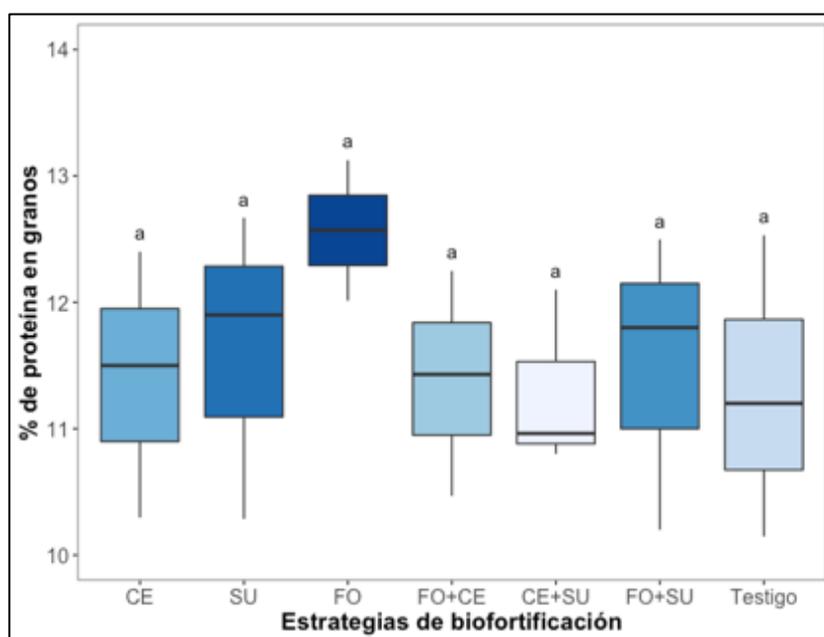
Concentración de nutrientes en granos de maíz dulce

Contenido de proteína

La concentración de proteína en grano de maíz dulce no tuvo diferencias estadísticas significativas entre estrategias de biofortificación con zinc ($F_{6,14} = 2.20, p = 0,105$). El contenido de proteína fluctuó entre 10.80% hasta 13.83% (figura 14).

Figura 15

Diagrama de caja del contenido de proteína en granos de maíz dulce (var, Saccharata) bajo 6 estrategias de biofortificación con zinc



Nota. Cajas con la misma letra no presenta diferencias significativas al $p < 0.05$ por test de Tukey HSD. (CE= Cebado de semillas, SU= Aplicación al suelo, FO= Aplicación foliar).

Estos resultados se deben a la ligera alcalinidad (pH 7,7) y concentración elevada de calcio en el suelo. Estos factores pueden obstaculizar la absorción y acumulación de nutrientes en tejidos vegetales (Gonzalez, Obrador, Lopez, & Alvarez, 2008). El desempeño de los sistemas biológicos depende de los iones de zinc, ya que este mineral forma parte estructural de proteínas y cumple funciones catalíticas (Anzellotti & Farrell, 2008).

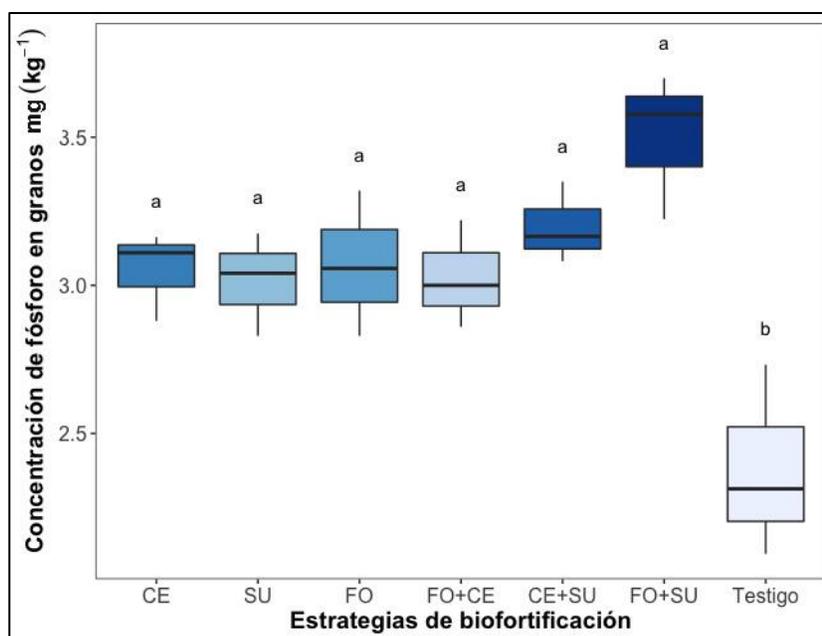
Los hallazgos de esta investigación son similares a los obtenidos por Mugenzi, *et al.* (2018). Sin embargo, Mohsin, *et al.* (2014) reportó que la aplicación de zinc redujo la cantidad de proteína en granos de maíz híbrido DK-919 durante los años 2009 a 2010. Resultado similar al obtenido por Zunaira, *et al.* (2022) quienes obtuvieron menor contenido de proteína cuando aplicó al suelo $10 \text{ kg ha}^{-1} \text{ Zn}$ más $12 \text{ kg ha}^{-1} \text{ Fe}$ en comparación al control. Estas evidencias se fundamentan en la dilución del nitrógeno por el incremento de la producción de grano (Monasterio, *et al.*, 2007).

Contenido de fósforo en maíz dulce

El análisis estadístico del contenido de fósforo en grano de maíz determinó que existió diferencias estadísticas significativas entre estrategias de biofortificación ($F_{6,14} = 8.34, p = 0,0006$).

Figura 16

Diagrama de caja del contenido de fósforo en granos de maíz dulce (var Saccharata) bajo 6 estrategias de biofortificación con zinc.



Nota. Cajas con la misma letra no presenta diferencias significativas al $p < 0.05$ por test de Tukey HSD. (CE= Cebado de semillas, SU= Aplicación al suelo, FO= Aplicación foliar).

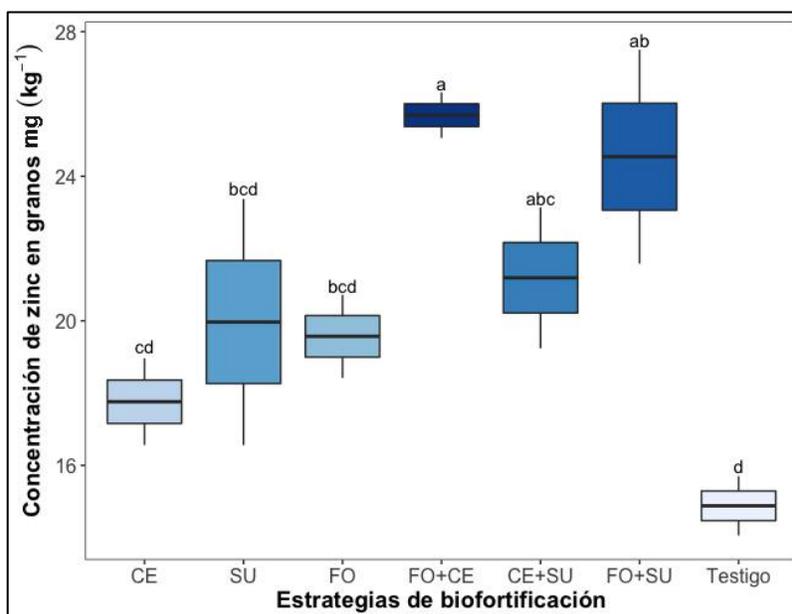
La estrategia combinada de aplicación de foliar + suelo (1% de ZnSO_4 + 12 kg ha^{-1} ZnSO_4) experimentó mayor acumulación de fósforo (3.50 mg kg^{-1}), mientras que el tratamiento considerado como testigo fue el de menor desempeño (2.38 mg kg^{-1}), tal como muestra la figura 15. Los nutrientes tales como el Zn, P y Fe, tienden acumularse en el todo el embrión en especial en el escudete, y la distribución de estos elementos inorgánicos dentro del grano varía de acuerdo con el estado de madurez del grano de maíz. En los granos inmaduros de maíz dulce (estado lechoso) el fósforo tiende a ser mayor cuando hay concentraciones altas de Fe y Zn en aleurona, endospermo, eje embrionario y escutelo, por lo que es probable que estos elementos se unan fácilmente al fitato (Cheaha, et al., 2020). Los hallazgos de este estudio son análogos a los datos reportados por Ladumor, *et al.* (2019), quienes obtuvieron mayor contenido de fósforo al aplicar 8 kg ha^{-1} de ZnSO_4 . Además, afirman que las aplicaciones de zinc mejoran gradualmente la absorción y acumulación de fósforo mientras se incrementa la dosis de zinc.

Contenido de zinc

El contenido de zinc en granos de maíz presentó diferencias estadísticas significativas entre métodos de biofortificación ($F_{6,14} = 8.34, p = 0,0006$). Tal como lo muestra la figura 16 los tratamientos que combinaron rutas de absorción tuvieron mayor acumulación de zinc. Las mayores concentraciones de zinc en grano fueron de 25.70 mg kg^{-1} , 25.70 mg kg^{-1} y 21.17 mg kg^{-1} para los tratamientos con aplicaciones foliar + cebado, foliar + suelo y cebado + suelo respectivamente. La acumulación de zinc en los tejidos vegetales se ve influida por los mecanismos de transporte y traslocación del elemento. Cuando el zinc es absorbido mediante aplicaciones foliares se transporta fácilmente con asimilados por el floema hacia los granos en desarrollo (Rengel, Batten, & Crowley, 1999).

Figura 17

Diagrama de caja del contenido de zinc en grano de maíz dulce (var Saccharata) bajo 6 estrategias de biofortificación con zinc



Nota. Cajas con la misma letra no presenta diferencias significativas al $p < 0.05$ por test de Tukey HSD. (CE= Cebado de semillas, SU= Aplicación al suelo, FO= Aplicación foliar).

Sin embargo, este mecanismo se podría ver afectado por la unión a proteínas o moléculas que se encuentren en el tejido vascular. La respuesta de acumulación de zinc en tejidos vegetales por la aplicación foliar vs suelo depende del acceso diferencial al floema y xilema (Broadley , White , Hammond , Zelko, & Lux , 2007). El xilema podría experimentar discontinuidad si este solo se encuentra conectado al tejido vegetativo y no al grano (Cakmak, et al., 2010). En este contexto la biofortificación que combina rutas de absorción brinda mejores resultados (Phattarakul, et al., 2012). Los resultados de este estudio coinciden con la investigación de Mohsin, *et al.* (2014), quienes obtuvieron mayor concentración de zinc cuando se aplicó zinc foliar (2%) combinado con el cebado de semilla (2%). Otros estudios lograron triplicar la concentración de zinc combinando aplicación foliar y suelo (Cakmak, et al., 2010). Mientras que Zunaira, et al. (2022) afirmó que la aplicación de 1% Zn + Fe sería eficaz en el aumento de zinc en grano.

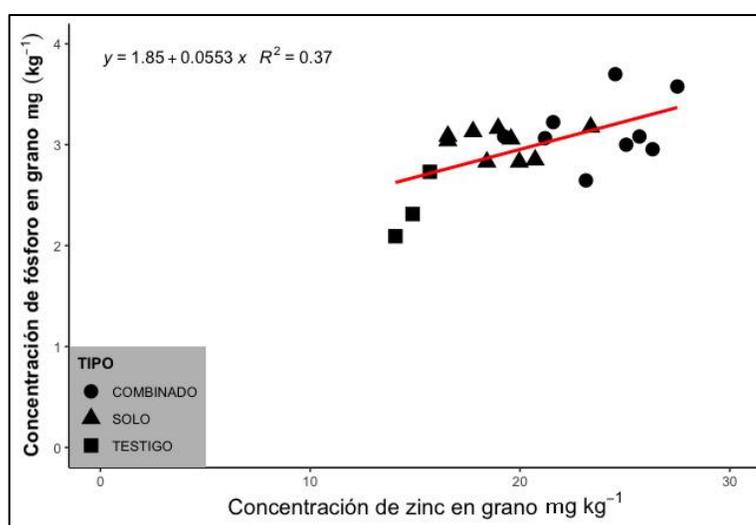
Análisis de Regresión

Relación entre contenido de fósforo y contenido de zinc en granos de maíz dulce

Los granos de maíz dulce híbrido mostraron correlación significativa entre el P y Zn ($r=0.37$). Sin embargo, el coeficiente de relación muestra que estas dos variables tienen una correlación positiva baja (figura 17).

Figura 18

Regresión del contenido de fósforo con el contenido de zinc en granos de maíz dulce



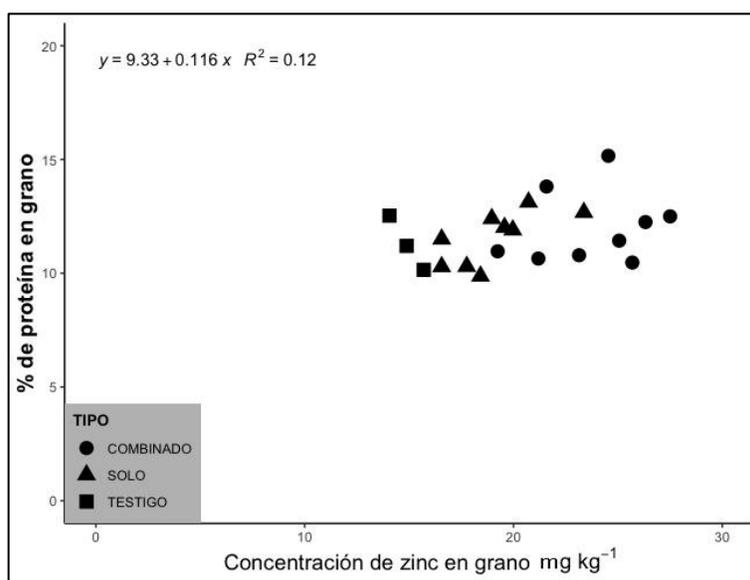
La relación del fósforo con el zinc es de suma importancia, ya que el 80% al 85% del fósforo contenido en el grano de maíz se almacena en forma de fitato, este se une con el zinc para formar Zn-fitato, provocando la reducción de la biodisponibilidad dietética del nutriente. Según Raboy (2002) el contenido de fósforo puede ser utilizado como indicador para determinar la presencia de fitato en el grano de maíz. Estos resultados sugieren la posibilidad de biofortificar con zinc el maíz dulce híbrido Bandit Harris Moran sin el peligro de elevar las concentraciones de fitatos, provocado por el aumento del contenido de fósforo en grano. Las observaciones en este estudio fueron consistentes con los hallazgos de Cheaha, *et al.* (2020), quienes encontraron correlación significativa entre Zn y P ($r = 0,307$) contenidos en granos de maíz dulce.

Relación entre el contenido de proteína y contenido de zinc en granos de maíz dulce

El análisis de regresión determinó que no hubo asociación significativa entre las variables proteína y contenido de zinc en granos de maíz dulce (figura 18). El coeficiente de correlación entre estas variables fue ($r=0.12$).

Figura 19

Regresión del porcentaje de proteína con el contenido de zinc en granos de maíz dulce



Los resultados sugieren la viabilidad de biofortificación agronómica con zinc al maíz dulce híbrido var. Bandit Harris Moran, sin alterar la cantidad de proteína en grano. La cantidad de proteína en grano se ve afectado por factores genotípicos y condiciones de cultivo (FAO, 1993). Las variedades actuales de maíz dulce han sido modificadas para mejorar la cantidad de azúcares por su interés industrial, afectando en la mayor parte a la calidad nutrimental Suganya, *et al.* (2021). Por ello es importante el mejoramiento de los componentes nutritivos sin afectar otros elementos contenidos en el maíz. Sin embargo, en el estudio de Mohsin, *et al.* (2014) se encontró correlación negativa alta ($r=-0.71$) al comparar estas dos variables en maíz híbrido DK-919 y Pioneer 30Y-87, justificando su resultado por la dilución de nitrógeno en otras partes vegetativas a medida que se incrementó el rendimiento en el maíz biofortificado.

Correlación entre parámetros de crecimiento, características de mazorca y parámetros productivos.

Los datos de correlación proporcionados en la tabla 11 de las variables analizadas en este estudio, revelan fuerte relación entre parámetros de crecimiento con parámetros productivos como la altura de la planta con materia seca por planta ($r=0.87$), índice de mazorca ($r=0.76$), biomasa ($r=0.78$), rendimiento y contenido de zinc en granos ($r=0.72$). A pesar de ello, no se encontró relación de números de macollos con la mayoría de las variables a excepción de las variables contenido de zinc en grano ($r=0.39$), peso de 1000 semillas ($r=0.48$), rendimiento ($r=0.41$) y diámetro ($r=0.43$).

Tabla 11

Correlación de los parámetros de crecimiento del maíz dulce, características de la mazorca y características productivas

Parámetro	Altura planta (cm)	# MAC	MS (g pl ⁻¹)	# MAZ	LM (cm)	DM (cm)	HXM	GXH	GXM	PM (g)	P1000 (g)	PD (g)	IM	BIO (ton ha ⁻¹)	REND (ton ha ⁻¹)	Zn (g kg ⁻¹)
Altura P	-															
# MAC	0.39*	-														
MS	0.87**	0.35ns	-													
# MAZ	0.57**	0.17ns	0.45**	-												
LM	0.22ns	0.15ns	0.34ns	0.50**	-											
DM	0.44**	0.43**	0.48**	0.50**	-0.75**	-										
HXM	0.56**	0.37ns	0.67**	0.32ns	0.47**	0.59**	-									
GXH	0.36ns	0.05ns	0.52**	0.70**	0.86**	0.47**	0.47**	-								
GXM	0.50**	0.19ns	0.66**	0.64**	0.70**	0.59**	0.77**	0.92**	-							
PM	0.21ns	0.12ns	0.06ns	0.10ns	0.29ns	0.43*	0.07ns	0.01ns	0.30ns	-						
P1000	0.64**	0.48**	0.66**	0.46**	0.60**	0.65**	0.63**	0.47**	0.61**	0.88**	-					
PD	0.47**	0.11ns	0.49**	0.51**	0.50**	0.76**	0.51**	0.63**	0.86**	0.85**	0.60**	-				
IM	0.76**	0.32ns	0.84**	0.90**	0.47**	0.61**	0.72**	0.54**	0.70**	0.05ns	0.72**	0.67**	-			
BIO	0.78**	0.22ns	0.78**	0.81**	0.34ns	0.39*	0.30ns	0.39*	0.41*	0.24ns	0.57**	0.42*	0.71**	-		
REND	0.70**	0.41*	0.74**	0.84**	0.29ns	0.46**	0.60**	0.29ns	0.47**	0.73**	0.71**	0.39*	0.89**	0.85**	-	
Zn	0.72**	0.39*	0.75**	0.30ns	0.38*	0.28ns	0.49**	0.41*	0.51**	0.32ns	0.78**	0.25ns	0.85**	0.58**	0.87**	-

Nota. *, ** y ns representa la significancia al 5%, 1% en niveles de probabilidad y no significativo correspondientemente. (#MAC= número de macollos, MS = materia seca, #MAZ= número de mazorcas, LM= longitud de la mazorca, DM= diámetro de la mazorca, HXM= hileras por mazorcas, GXM= granos por mazorca, PM= peso de mazorca, P1000= peso de 1000 semillas, PD= porcentaje de desgrane, IM= índice de mazorca, BIO= biomasa total, REND= rendimiento, Zn= contenido de zinc en grano

En tanto que la mayoría de los coeficientes de correlación de las características de la mazorca fueron significativas a excepción la longitud de la mazorca con rendimiento, biomasa y peso de la mazorca. El rendimiento está fuertemente correlacionado con la biomasa($r=0.85$), índice de mazorca ($r=0.89$), peso de 1000 semillas($r=0.71$), peso de la mazorca ($r=0.73$). Mientras que el zinc mostró correlación alta con la altura de la planta ($r=0.72$), materia seca por planta($r=0.75$), peso de 1000 semillas($r=0.78$), índice de mazorca ($r=0.85$) y rendimiento($r=0.87$). En consonancia con el reporte de Mohsin, *et al.* (2014), quienes encontraron fuerte correlación significativa entre atributos de crecimiento, rendimiento y calidad de maíz dulce.

Capítulo V

Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

Las estrategias de biofortificación con zinc mediante aplicaciones solas o combinadas, generaron un efecto positivo sobre la concentración de zinc en granos de maíz dulce híbrido Bandit Harris Moran de tal forma que se logró incrementar entre 19.46% a 72.48% la concentración de zinc en granos de maíz dulce, en comparación al manejo convencional del cultivo.

Las estrategias de biofortificación con zinc mostraron efectos positivos sobre los parámetros productivos, crecimiento y calidad de mazorca del maíz dulce híbrido Bandit Harris Moran. Los métodos combinados de biofortificación incrementaron en 30% el índice de mazorca, 14.56 % biomasa y 28.18% en rendimiento del cultivo.

Los métodos de biofortificación que mostraron mejores resultados para la concentración de zinc son aquellos en los que se combinó estrategias de biofortificación. Siendo la aplicación de foliar 1% más la aplicación al suelo de $12 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ZnSO}_4$, la que mostró mejores resultados

En este estudio, la baja correlación entre la concentración de zinc y fósforo en granos de maíz dulce ($r^2=0,37$) cosechados en punto de consumo, sugiere que los enfoques de biofortificación agronómica con zinc sobre el maíz híbrido dulce Bandit Harris Moran pueden llevarse a cabo sin riesgo de aumento concomitante de concentración de fósforo, y por lo tanto de fitato.

Recomendaciones

Se recomienda la aplicación foliar 1% de $ZnSO_4$ más 12 kg ha^{-1} de $ZnSO_4$ al suelo, para aumentar la concentración de zinc en granos y potencializar el rendimiento del maíz dulce híbrido Bandit Harris Moran

Se recomienda hacer estudios sobre la concentración de zinc, fósforo y hierro por estructuras del grano, tales como escudete, aleurona, endospermo y embrión. Para determinar la dinámica e interacción de los nutrientes al interior del grano.

Se recomienda seleccionar variedades de maíz nacional con potencial de mejoramiento agronómico y/o genético, para implementación en programas de biofortificación a escala nacional.

Bibliografía

- Ahmed, T., Hossain, M., & Sanin, K. I. (2012). Global Burden of Maternal and Child Undernutrition and Micronutrient Deficiencies. *Annals of Nutrition & Metabolism*, 8-17. .
- Ali, N., Farooq, M., Hassan, M., Arshad, M., Saleem, M., & Faran, M. (2018). Micronutrient seed priming improves stand establishment, grain yield and biofortification of bread wheat. *Crop and Pasture Science*, 479–487. <https://doi.org/10.1071/CP1804>.
- Alloway, B. (2008). *Zinc in Soils and Crop Nutrition*. Bélgica: Zinc Association and the International Fertilizer Industry Association. .
- Alloway, B. (2009). Soil factors associated with zinc deficiency in crops and humans. *31(5)*, 537–548. <https://doi.org/10.1007/s10653-009-9255-4>.
- Anzellotti, A. I., & Farrell, N. P. (2008). Zinc metalloproteins as medicinal targets. *Chemical Society reviews*, 1629–1651. <https://doi.org/10.1039/b617121b>.
- Arce. (2009). Descripción ecológica en IASA 1. Sangolquí.
- Aref, F. (2010). Zinc and Boron Fertilization on Concentration and Uptake of Iron and Manganese in the Corn Grain. *Journal of American Science*, 8.
- Bailey, R., West, J. K., & Black, R. (2015). The Epidemiology of Global Micronutrient Deficiencies. *Annals of Nutrition and Metabolism*, 66(Supl 2), 22-33. <https://doi.org/10.1159/000371618>.
- Beckingham, C. (2007). *Sweet corn growing*. Recuperado el 04 de 2022, de NSW Department of Primary Industries: <https://www.dpi.nsw.gov.au/agriculture/horticulture/vegetables/commodity-growing-guides/sweet-corn>
- Bender, R., Haegele, J., Ruffo, M., & Below, F. (2013). Nutrient Uptake, Partitioning, and Remobilization in Modern, Transgenic Insect-Protected Maize Hybrids. *Agronomy Journal*, 161-170. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.2134/agronj2012.0352>.

- Biswas, C., & Benbi, D. (1996). Sustainable yield trends of irrigated maize and wheat in a long-term experiment on a loamy sand in semi-arid India. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 46(3), 225-234. <https://doi.org/10.1159/000371618>.
- Borrill, P., Connorton, J., Balk, J., Miller, A., Sanders, D., & Uauy, C. (2014). Biofortification of wheat grain with iron and zinc: integrating novel genomic resources and knowledge from model crops. *Frontiers in Plant Science*, <https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00053>.
- Bouis, H., & Saltzman, A. (2017). Improving nutrition through biofortification: A review of evidence from HarvestPlus, 2003 through 2016. *Global Food Security*, 49-58. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2017.01.009>.
- Broadley, M., White, P., Hammond, J., Zelko, I., & Lux, A. (2007). Zinc in plants. *New Phytologist*, 677-702.
- Brown, W., Darrah, L., Creech, R., & Schertz, K. (1985). Origin, Adaptation, and Types of Corn. *National Corn Handbook Project*.
- Cakmak, I. (2000). Possible roles of zinc in protecting plant cells from damage by reactive oxygen species. *New Phytologist*, 146(2), 185-205. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2000.00630.x>.
- Cakmak, I. (2008). Enrichment of cereal grains with zinc. *Plant and Soil*, 302(2), 1-17. <https://doi.org/10.1007/s11104-007-9466-3>.
- Cakmak, I., Kalayci, M., Kaya, Y., Torun, A., Aydin, N., Wang, Y., . . . Horst, W. (2010). Biofortification and localization of zinc in wheat grain. *Journal of agricultural and food chemistry*, 9092–9102. <https://doi.org/10.1021/jf101197h>.
- Cavagnaro, T. (2008). The role of arbuscular mycorrhizas in improving plant zinc nutrition under low soil zinc concentrations: a review. *Plant soil*, 315-325. <http://www.jstor.org/stable/42951830>.

- Cheaha, Z. X., O'Hareb, T. J., Harperc, S. M., Kochanek, J., Bella, M. J., & L. (2020). Zinc biofortification of immature maize and sweetcorn (*Zea mays* L.) kernels for human health. *Scientia Horticulturae*, 272(109559), 1–17. <https://doi.org/10.1007/s11104-007-9466-3>.
- Coulibaly, A., Kouakou, B., & Chen, J. (2011). Phytic Acid in Cereal Grains: Structure, Healthy or Harmful Ways to Reduce Phytic Acid in Cereal Grains and Their Effects on Nutritional Quality. *American Journal of Plant Nutrition and Fertilization Technology*, 1-22. <https://scialert.net/abstract/?doi=ajpnft.2011.1.22>.
- Creech, R. (1965). Genetic Control of Carbohydrate Synthesis in Maize Endosperm. *Genetics*, 1175–1186. <https://doi.org/10.1093/genetics/52.6.1175>.
- CYMMYT. (2017). Protocolos para mediciones de plantas en las plataformas de investigación. *Centro de mejoramiento de maíz y trigo*.
- Díaz, G., Sabando, F., Montes, S., & Vásconez, G. (2009). EVALUACIÓN PRODUCTIVA Y CALIDAD DEL GRANO DE CINCO HÍBRIDOS DE MAÍZ (*Zea mays* L.) EN DOS LOCALIDADES DE LA PROVINCIA DE LOS RÍOS. *Ciencia y Tecnología*, 9.
- Díaz, S. (2019). *Evaluación de tres fuentes de hierro para la biofortificación foliar en Rye Grass Perenne (Lolium perenne) variedad Amazon*. Obtenido de <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/15927>
- Dinges, J., Colleoni, C., Myers, A., & James, M. (2001). Molecular Structure of Three Mutations at the Maize sugary1 Locus and Their Allele-Specific Phenotypic Effects1. *Plant Physiology*, 125(3), 1406-1418. <https://doi.org/10.1104/pp.125.3.1406>.
- Dun-Yi, L., Wei, Z., Yu-Min, L., Xin-Ping, C., Chun-Qin, Z., & Q. (2020). Soil Application of Zinc Fertilizer Increases Maize Yield by Enhancing the Kernel Number and Kernel Weight of Inferior Grains. *Frontiers in Plant Science*, <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/fpls.2020.00188>.
- El Universo. (21 de 09 de 2008). La Península 'debuta' con producción de maíz dulce. *El Universo*.

- FAO. (1993). *El maíz en la nutrición humana*. Obtenido de <https://www.fao.org/3/t0395s/T0395S00.htm#Contents>
- FAO. (1993). *El maíz en la nutrición humana*. Roma: Colección FAO alimentación y nutrición.
- FAO. (2020). *Crops and livestock products*. Obtenido de FAOSTAT: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>
- FAO. (2020). *Datos sobre la alimentación y agricultura*. Obtenido de FAOSTAT: <http://www.fao.org/faostat/es/#data/QC>
- Farooq, M., Basra, S., Wahid, A., Kobayashi, N., Fujita, D., & E. (2009). Plant drought stress: effects, mechanisms and management. *Agronomy for Sustainable Development*, 29(1), 185-212. <https://doi.org/10.1051/agro:2008021>.
- Freire, B. M., Pereira, R. M., Lange, C. N., Batista, B. L., Mishra, K., Tandon, P. K., & Srivastava, S. (2020). Biofortification of Crop Plants: A Practical Solution to Tackle Elemental Deficiency. In *Sustainable Solutions for Elemental Deficiency and Excess in Crop Plants* (pp. 135-182). https://doi.org/10.1007/978-981-15-8636-1_7. Singapore: Springer Singapore.
- Fu, S.-F., Wei, J.-Y., Chen, H.-W., Liu, Y.-Y., Lu, H.-Y., & Chou, J.-Y. (2015). Indole-3-acetic acid: A widespread physiological code in interactions of fungi with other organisms. *Plant signaling & behavior*, e1048052-e1048052. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26179718>.
- Garg, M., Sharma, N., Sharma, S., Kapoor, P., Kumar, A., Chunduri, V., & Arora, P. (2018, 02 14). Biofortified Crops Generated by Breeding, Agronomy, and Transgenic Approaches Are improving Lives of Millions of People around the world. *Frontiers in Nutrition*, 5-12. <https://doi.org/10.3389/fnut.2018.00012>.
- Genc, Y., Humphries, J., Lyons, G., Graham, R., E., & W. (2005). Exploiting genotypic variation in plant nutrient accumulation to alleviate micronutrient deficiency in populations. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 18(4), 319-324. <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2005.02.005>.

- Gonzalez, D., Obrador, A., Lopez, L., & Alvarez, J. (2008). Effect of Zinc Source Applied to Soils on its Availability to Navy Bean. *Soil Science Society of America Journal*, 641-649. <https://doi.org/10.2136/sssaj2007.0099>.
- Google maps. (s.f.). *Google maps*. Recuperado el 04 de 2020, de <https://goo.gl/maps/si5ryZTxq3TqUUmU9>.
- Graham, & Welch. (1996). *Breeding for staple-food crops with high micronutrient density*. International Food Policy Research Institute, Washington, D.C.
- GRAIN. (2019). *¿Cultivos biofortificados o biodiversidad?* Barcelona: GRAIN ORG.
- Grzebisz, W., & Szczepaniak, W. (2008). EFFECT OF ZINC FOLIAR APPLICATION AT AN EARLY STAGE OF MAIZE GROWTH ON PATTERNS OF NUTRIENTS AND DRY MATTER ACCUMULATION BY THE CANOPY. *J. Elementol*, 29-39.
- Hanway, J. J. (1996). *How a corn plant develops*. Obtenido de <http://lib.dr.iastate.edu/specialreport>
- Harris, D., Rashid, A., Miraj, G., Arif, M., Shah, H., & E. (2007). 'On-farm' seed priming with zinc sulphate solution—A cost-effective way to increase the maize yields of resource-poor farmers. *Field Crops Research*, 102(2), 119-127. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2007.03.005>.
- HarvestPlus. (2018). *El progreso de las acciones de biofortificación en Latinoamérica y el Caribe*. Cali: CGIAR.
- Holdridge, L. R. (1982). *Curso de ecología vegetal*. San José: Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas IICA.
- Hossain, M., Jahiruddin, M., Islam, M., & Mian, M. (2008). The requirement of zinc for improvement of crop yield and mineral nutrition in the maize–mungbean–rice system. *Plant and Soil*, 306(1), 13-22. <https://doi.org/10.1007/s11104-007-9529-5>.

- Hotz, C., & Brown, K. (2004). Assessment of the Risk of Zinc Deficiency in Populations and Options for Its Control. *International Zinc Nutrition Consultative Group (IZiNCG) Technical Document #1*, 94-204.
- INEC. (2021). *Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua*. Recuperado el 03 de 2022, de Ecuador en cifras: https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Estadisticas_agropecuarias/espac/espac-2020/Presentacion%20ESPAC%202020.pdf
- INIAP. (2018). *Protocolo para evaluación de ensayos de adaptabilidad y eficiencia de maíz duro*. Mocache.
- INTAGRI. (2020). Fertirriego en maíz. *Artículos técnicos Intagri*(47), 4. Obtenido de Intagri: <https://www.intagri.com/articulos/cereales/fertirriego-en-maiz>
- Jackson, M. (1973). *Soil chemical analysis*. New Delhi.
- Janick, J. (2015). *Plant Breeding Reviews*. Wiley Blackwell.
- Kamol, L., & Pulam, T. (2007). Breeding for Increased Sweetness in Sweet Corn. *Journal of Plant Breeding*, 1(1), 27-30.
- Kanwal, Ranjha, & Ahmad, R. (2010). *Zinc Partitioning in Maize Grain after Soil Fertilization with Zinc Sulfate*.
- Kaur, K., Gupta, R., Saraf, S., & Shailendra K., S. (2014). Zinc: The Metal of Life: Zinc: the metal of life. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 13(4), 358-376.
- Kling, J., & Edmeades, G. (1997). *Morphology and growth of maize*. Nigeria: IITNCIMMYT.
- Kumar, S., Palve, A., Joshi, C., Srivastava, R., Rukhsar, & K. (2019). Crop biofortification for iron (Fe), zinc (Zn) and vitamin A with transgenic approaches. *Heliyon*, 5(6), 1914. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01914>.
- Ladumor, R., Gudadhe, N., Onte, S., Narwade, A., Karmakar, N., & Thanki, J. (2019). Evaluation of Maize for Different Methods and Levels of Zinc Application. *Maydica electronic publication*, 14.

- Leubner, G. (2006). Recuperado el 05 de 2022, de The Seed Biology Space: <http://seedbiology.de>
- Licto, S. (2017). *Estudio de la biofortificación foliar con diferentes fuentes de zinc en Rye Grass Perenne (Lolium perenne) variedad Amazon*. Obtenido de Repositorio ESPE: <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/14410/1/T-IASA%20I-005369.pdf>
- López, D., Castillo, C., & Diazgranados, D. (2010). EL ZINC EN LA SALUD HUMANA - II . *Children Nutrition*, 240-247. .
- Maqbool, M., & Beshir, A. (2019). Zinc biofortification of maize Status and challenges. *Plant Breeding*, 138(1), 1-28. <https://doi.org/10.1111/pbr.12658>.
- Matsuoka, Y., Vigouroux, Y., Goodman, M., & Doebley, J. (2002). A single domestication for maize shown by multilocus microsatellite genotyping. *PNAS*, 99(9), <https://doi.org/10.1073/pnas.052125199>.
- Mendoza, A. (2004). Absorción y asimilación de hierro. *Agroestrategias*, <http://www.agroestrategias.com/pdf/Fisiologia%20-%20Absorcion%20y%20Asimilacion%20del%20Hierro.pdf>.
- Mohsin, A., Ahmad, A., Farooq, M., Ullah, S., & A. (2014). INFLUENCE OF ZINC APPLICATION THROUGH SEED TREATMENT AND FOLIAR SPRAY ON GROWTH, PRODUCTIVITY AND GRAIN QUALITY OF HYBRID MAIZE. *J. Anim. Plant Sci.*
- Monasterio, J., Palacios, N., Meng, E., Pixley, K., Trethowan, R., & Peña, R. (2007). Enhancing the mineral and vitamin content of wheat and maize through plant breeding. *Journal of Cereal Science*, 293-307. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0733521007001191>.
- Mouille, G., Maddelein, M.-L., Libessart, N., Talaga , P., Decq, A., Delrue, B., & Ball, S. (1996). Preamylopectin processing: a mandatory step for starch biosynthesis in plants. *Plant Cell*. 1353–1366.
- Mugenzi, I., Yongli, D., Ngnadong, W., Dan, H., Niyigaba, E., Twizerimana, A., & Jiangbo, H. (2018). Effect of combined zinc and iron application rates on summer maize yield, photosynthetic capacity and

- grain quality. *International Journal of Agronomy and Agricultural Research*, 36-46. <http://www.innspub.net>.
- Nadeem, F., & Farooq, M. (2019). Application of Micronutrients in Rice-Wheat Cropping System of South Asia. *Rice Science*, 356-371. 10.1016/j.rsci.2019.02.002 .
- Nadergoli, M. S., Yarnia, M., & Khoei, F. R. (2011). Effect of Zinc and Manganese and Their Application Method on Yield and Yield Components of Common Bean (*Phaseolus vulgaris* L. CV. Khomein). *Middle-East Journal of Scientific Research*.
- Ngoune Tandzi, L., & Mutengwa, C. (2019). Estimation of Maize (*Zea mays* L.) Yield Per Harvest Area: Appropriate Methods. *Agronomy*, 29. <https://doi.org/10.3390/agronomy10010029>.
- Noulas, C., Tziouvalekas, M., & Karyotis, T. (2018). Zinc in soils, water and food crops. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 49, 252-260. <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2018.02.009>.
- OMS. (2014). *Global Nutrition Targets 2025: Anaemia Policy Brief (WHO/NMH/NHD/14.4)*.
- Ordás, B., Romay, M. C., & Revilla, P. (2007). Maíz dulce ¿por qué no? *Horticultura*, 14-18.
- Palmgren, M., Clemens, S., Williams, L., Krämer, U., Borg, S., Schjørring, J., & Sanders, D. (2008). Zinc biofortification of cereals: problems and solutions. *Trends in Plant Science*, 13(9), 464-473. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1360138508002008>.
- Pandey, N., Pathak, G., & Sharma, C. (2005). Zinc is critically required for pollen function and fertilisation in lentil. *Trace elements in medicine and biology*, 86-96. <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2005.09.006>.
- Parera, C. (2017). *Producción de maíz dulce*. Ciudad Autónoma de Buenos Aires: INTA.
- Phattarakul, N., Rerkasem, B., Li, L., Wu, L., Zou, C., Ram, H., . . . Cakmak, I. (2012). Biofortification of rice grain with zinc through zinc fertilization in different countries. *Plant Soil*, 131–141. <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1211-x>.

- Pisuña , M. (2015). *BIOFORTIFICACIÓN AGRONÓMICA DE LA PAPA (Solanum tuberosum L.) MEDIANTE LA APLICACIÓN DE ZINC (Zn) AL SUELO Y FOLLAJE*. Obtenido de Universidad Central del Ecuador.
- Prasad, A. (2013). Discovery of Human Zinc Deficiency: Its Impact on Human Health and Disease. *Advances in Nutrition*, 4(2), 176-190. <https://doi.org/10.3945/an.112.003210>.
- Raboy, V. (2002). Progress in breeding low phytate crops. *Journal of Nutrition*, 503-505.
- Rajendran, A., & Veeramani, I. (2022). Influence of Agronomic biofortification on Maize. *Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology*, 263-271.
<http://www.agrifoodscience.com/index.php/TURJAF/article/view/4679>.
- Rasool, T., Ahmad, R., & Farooq, M. (2019). Seed Priming with Micronutrients for Improving the Quality and Yield of Hybrid Maize. *Gesunde Pflanzen*, 71(1), 37-44. <https://doi.org/10.1007/s10343-018-00440-8>.
- Rengel , Z., Batten , G., & Crowley , D. (1999). Agronomic approaches for improving the micronutrient density in edible portions of field crops. *Field Crops Research*, 27-40.
- Rengel, Z., Batten, G., & Crowley, D. (1999). Agronomic approaches for improving the micronutrient density in edible portions of eld crops. *Field Crops Research*, 14.
- Robson, A. (1993). *Zinc in Soils and Plants* (Vol. 55). Australia: Springer Science & Business Media, 2012.
- Saavedra, G. (2015). *Maíz Dulce (Zea mays convar. saccharata)*. Instituto de Investigaciones Agropecuarias INIA .
- Sacoto, L. (2020). En el tratamiento de la talla baja.
- Sadzawka, A., Carrasco, M., Demanet, R., Flores, H., Grez, R., Mora, M., & Neaman, A. (2007). *Métodos de análisis de tejidos vegetales*. Retrieved from Instituto de Investigaciones Agropecuarias: <https://hdl.handle.net/20.500.14001/8570>

- Safyan, N., Bahari, B., & Reza, M. (2012). The effect of microelements spraying on growth, qualitative and quantitative grain corn in Iran. *International Research Journal of Applied and Basic Sciences*, 2780-2784.
- Saltos, R. (2016). Obtenido de Universidad Técnica de Ambato:
<https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/24351/1/tesis-056%20Maestr%c3%ada%20en%20Agroecolog%c3%ada%20y%20Ambiente%20-%20CD%20438.pdf>
- Schönherr, J., & Schreiber, L. (2004). Size selectivity of aqueous pores in astomatous cuticular membranes isolated from *Populus canescens* (Aiton) Sm. leaves. *Planta*, 405-411.
<http://www.jstor.org/stable/23388473>.
- Service, N. A. (2021). *National Statistics for Sweet Corn*. Recuperado el 03 de 2022, de National Statistics for Sweet Corn: https://www.nass.usda.gov/Statistics_by_Subject/result.php?1AB625B8-19CC-312D-ACF6-58D2EA98E806§or=CROPS&group=VEGETABLES&comm=SWEET%20CORN
- Sharma, A., Patni, B., Shankhdhar, D., Shankhdhar, S., S., & C. (2013). Zinc – An Indispensable Micronutrient. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 19(1), 11-20.
<https://doi.org/10.1007/s12298-012-0139-1>.
- Sharma, P., Agarwala, S., & Sharma, C. (1990). Zinc deficiency and pollen fertility in maize (*Zea mays*). *Plant nutrition - physiology and applications*, 261-265. https://doi.org/10.1007/978-94-009-0585-6_44.
- Siddiqui, M., Oad, F., Abbasi, M., & Gandahi, A. W. (2009). ZINC AND BORON FERTILITY TO OPTIMIZE PHYSIOLOGICAL PARAMETERS, NUTRIENT UPTAKE AND SEED YIELD OF SUNFLOWER. *Sarhad J. Agric.*
- Siwela, M., Pillay, K., Govender, L., Lottering, S., Mudau, F., Modi, A., & Mabhaudhi, T. (2020). Biofortified Crops for Combating Hidden Hunger in South Africa: Availability, Acceptability,

- Micronutrient Retention and Bioavailability. *Foods*, 9(6), 815.
<https://doi.org/10.3390/foods9060815>.
- Stacey, S., Oosterhuis, D., & McLaughlin, M. (2008). The Effect of Chelating Agents on the Foliar Sorption of Zinc Fertilizers. *The Americas Journal of Plant Science and Biotechnology*, 69-73.
- Steel, R., Torrie, J., & Dickey, D. (1997). *Principles and Procedures of Statistics: A Biometrical Approach*. New York: McGraw Hill.
- Suganya, A., Saravanan, A., Baskar, M., Pandiyarajan, P., Kavimani, R., & R. (2021). Agronomic biofortification of maize with zinc by using of graded levels of zinc in combination with zinc solubilizing bacteria and Arbuscular mycorrhizal fungi. *Journal of Plant Nutrition*, 44(7), 988-994.
<https://doi.org/10.1080/01904167.2020.1845383>.
- Suma, P., & Urooj, A. (2014). Nutrients, antinutrients & bioaccessible mineral content (in vitro) of pearl millet as influenced by milling. *Journal of Food Science and Technology*, 756-761.
- Takeda, A. (2000). Movement of zinc and its functional significance in the brain. *Brain Research Reviews*, 34(3), 137-148. [https://doi.org/10.1016/S0165-0173\(00\)00044-8](https://doi.org/10.1016/S0165-0173(00)00044-8).
- Tapiero, H., & Tew, K. (2003). Trace elements in human physiology and pathology: zinc and metallothioneins. *Biomed Pharmacother*, 399-411. [https://doi.org/10.1016/s0753-3322\(03\)00081-7](https://doi.org/10.1016/s0753-3322(03)00081-7).
- Tariq, A., Anjum, S., Randhawa, M., Ullah, E., Naeem, M., Qamar, R., . . . Nadeem, M. (2014). Influence of Zinc Nutrition on Growth and Yield Behaviour of Maize (&i&tZea mays&t;/i&t; L.) Hybrids. *American Journal of Plant Sciences*, 5(18), 2646-2654.
<https://doi.org/10.4236/ajps.2014.518279>.
- Tenaillon, M. I., & Charcosset, A. (2011). Comptes Rendus Biologies. *Comptes Rendus Biologies*, 334(3), 221-228. <https://doi.org/10.1016/j.crv.2010.12.015>.

Thomison, P. (2017). *Does Tillering Impact Corn Yield?* . Obtenido de Agronomic Crops Network:

<https://agcrops.osu.edu/newsletter/corn-newsletter/2017-24/does-tillering-impact-corn-yield>

Timothy, D. H., Hatheway, W. H., Grant, U. J., Torregroza, M., Sarria, D., & Varela, D. (1963). Races of maize in Ecuador. *National Academy of Sciences*.

Triviño, A. B., & Villena, N. P. (2019). La industria del maíz y su incidencia en la matriz productiva del Ecuador en el período 2013-2017. *Espacios*, 40(14), 14.

USDA. (1996). *Tha Plants Data Base*. Obtenido de <http://plants.usda.gov>

USDA. (2021). *National Agricultural Statistics Service*. Recuperado el 03 de 2022, de National Statistics for Sweet Corn: https://www.nass.usda.gov/Statistics_by_Subject/result.php?1AB625B8-19CC-312D-ACF6-58D2EA98E806§or=CROPS&group=VEGETABLES&comm=SWEET%20CORN

Veenstra, R., Messina, C., Berning, D., Haag, L., Carter, P., & . (2021). Effect of tillers on corn yield: Exploring trait plasticity potential in unpredictable environments. *Crop Science*, 3660-3674. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/csc2.20576>.

Villarreal, V. (2018). Evaluación de las condiciones climáticas y fuentes de boro, para la germinación in vitro de polen en frutilla (*Fragaria* × *ananassa*) variedad festival. Sangolquí, Ecuador: Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE.

Yáñez, C., Zambrano, J. L., Caicedo, M., S, Sánchez, V. H., & Heredia, J. (2003). *Catálogo de Recursos Genéticos de Maíces de Altura Ecuatorianos*. Retrieved 03 2022, from INIAP, Estación Experimental Santa Catalina: <https://repositorio.iniap.gob.ec/jspui/bitstream/41000/43/1/iniapsc201.pdf>

Yilmaz, A., Ekiz, H., Torun, B., Gultekin, I., Karanlik, S., Bagci, S., & Cakmak, I. (1997). Effect of different zinc application methods on grain yield and zinc concentration in wheat cultivars grown on zinc-deficient calcareous soils. *Journal of Plant Nutrition*, 20(4-5), 461-471. <https://doi.org/10.1080/01904169709365267>.

Zabala , F. (09 de 2009). *PHYSIOLOGICAL RESPONSES OF TOLERANT AND SUSCEPTIBLE BEAN GENOTYPES*

TO IRON DEFICIENCY. Obtenido de ResearchGate:

https://www.researchgate.net/publication/264898833_PHYSIOLOGICAL_RESPONSES_OF_TOLERANT_AND_SUSCEPTIBLE_BEAN_GENOTYPES_TO_IRON_DEFICIENCY

Zhang, X., De Vries, B., Kaeppler, H., Tracy, W., Kaeppler, S., Hirsch, C., . . . Mogel, K. (2019). Maize sugary enhancer1 (se1) is a gene affecting endosperm starch metabolism. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(41), 20776-20785.

<https://doi.org/10.1073/pnas.1902747116>.

Zhao, A., Lu, X., Chen, Z., Tian, X., Yang, X., & X. (2011). Zinc Fertilization Methods on Zinc Absorption and Translocation in Wheat. *Journal of Agricultural Science*, 3(1), 28.

<https://doi.org/10.5539/jas.v3n1p28>.

Zhao, F.-J., & McGrath, S. (2009). Biofortification and phytoremediation. *Current Opinion in Plant Biology*, 373-380. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2009.04.005>.

Zikankuba, V. L., Mteremko, D., & James, A. (07 de 03 de 2019). Staple Crops Biofortification Linking Agriculture, Food and Nutrition towards Eliminating Hidden Hunger. *European Journal of Nutrition & Food Safety*, 112-121. <https://doi.org/10.9734/ejnfs/2019/v9i230050>.

Zunaira, A., Zyma, B., Muhammad , B., Shahbaz , K., Noreen , Z., Zayrah , R., & Muhammad , M. (2022). Biofortification of maize with zinc and iron not only enhances crop growth but also improves grain quality. *Asian J Agric & Biol*, DOI: 10.35495/ajab.2021.02.079.

<https://drive.google.com/drive/folders/1N4AOgAVW2cnggT5ZpldMEMNrCwxFu7IF?usp=sharing>