

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DEL SUELO



Evaluar Diferentes Concentraciones de Bicarbonatos en Solución Nutritiva Sobre
el Cultivo de Lechuga Orejona cv. Lulú

Por:

PETRONA HERNÁNDEZ GÓMEZ

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÍCOLA Y AMBIENTAL

Saltillo, Coahuila, México

Diciembre, 2021

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DEL SUELO

Evaluar Diferentes Concentraciones de Bicarbonatos en Solución Nutritiva Sobre
el Cultivo de Lechuga Orejona cv. Lulú

Por:

PETRONA HERNÁNDEZ GÓMEZ

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÍCOLA Y AMBIENTAL

Aprobada Por el Comité de Asesoría:



Dr. Armando Hernández Pérez

Asesor Principal



Dra. Juana Cruz García Santiago

Asesor



M.C. Fidel Maximiano Peña Ramos

Asesor



Dr. Ángel Rumualdo Cepeda Dovala

Asesor

Saltillo, Coahuila, México

Diciembre, 2021

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DEL SUELO

Evaluar Diferentes Concentraciones de Bicarbonatos en Solución Nutritiva Sobre
el Cultivo de Lechuga Orejona cv. Lulú

Por:

PETRONA HERNÁNDEZ GÓMEZ

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÍCOLA Y AMBIENTAL

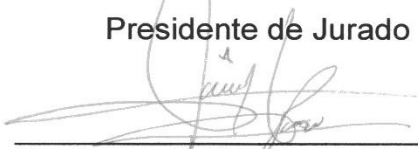
Aprobada por el H. Jurado Examinador



M.C. Fidel Maximiano Peña Ramos
Presidente de Jurado



Dra. Juana Cruz García Santiago
Vocal



Dr. Armando Hernández Pérez
Vocal



Dr. Ángel Rumualdo Cepeda Dovala
Vocal



M.C. Sergio Sánchez Martínez
Coordinador de la División de Ingeniería

Saltillo, Coahuila, México

Diciembre, 2021

AGRADECIMIENTO

A DIOS:

Por darme la oportunidad de vida y lograr uno de mis mayores objetivos

A mi familia:

Gracias a los miembros de mi familia que me apoyaron moralmente y por sus ánimos siempre y les seré muy agradecida

A mis profesores:

Les agradezco de todo corazón, por todas las clases que me compartieron, que fueron tan divertidas

A mis asesores de tesis:

Por el apoyo brindado y atención que fue de mucho aprendizaje y práctica porque sin eso no sería posible lograr esta investigación les seré muy agradecida

A mi tutora:

Por ser tan responsable y se preocupa por sus tutorados aconsejándolos y ayudando para lograr terminar la carrera

A mi Alma Terra Mater:

Gracias de todo corazón por haber logrado estar en esta institución y prestigiosa y formar parte de ella, viví momentos únicos en la vida y donde sea que este siempre la llevare en mi corazón.

Dedicatoria

Les dedico a mis padres que siempre me apoyaron a seguir adelante, y darme ánimos cuando ya no tenía fuerza y a mis hermanos por sacarme risa, a mi niña Yaky por impulsarme a seguir adelante y por hacerme reír, y a mi pareja por apoyarme incondicionalmente.

ÍNDICE GENERAL

I.	RESUMEN	1
II.	INTRODUCCIÓN	2
2.1.	Objetivo General	3
2.2.	Objetivo Especifico	3
III.	Revisión de literatura	4
3.1.	Alcalinidad de agua	4
3.2.	La alcalinidad del suelo	4
3.3.	Efecto de alcalinidad en las plantas	5
3.4.	Manejo de alcalinidad en el agua	6
3.5.	Elementos Esenciales	7
3.6.	Nitrógeno	8
3.7.	Fósforo	8
3.8.	Potasio	9
3.9.	Azufre	10
3.10.	Calcio	10
3.11.	Magnesio	11
3.12.	Boro	11
3.13.	Cloro	12
3.14.	Cobre	12
3.15.	Hierro	13
3.16.	Manganeso	13
3.17.	Molibdeno	14
3.18.	Zinc	14

3.19.	Níquel -----	15
3.20.	Disponibilidad de cationes por efecto de alcalinidad -----	15
3.21.	Conductividad eléctrica -----	17
3.22.	Cultivo de lechuga -----	17
3.23.	Solución nutritiva (SN) -----	18
3.24.	Producción mundial de lechuga -----	18
3.25.	Tipos y variedades de lechuga que se producen en México (Lactuca sativa L): -----	19
3.26.	Nutrición -----	20
3.27.	Fertilización -----	20
IV.	MATERIALES Y MÉTODOS -----	22
4.1.	Localización del experimento -----	22
4.2.	Material vegetativo -----	22
4.3.	Instalación de experimento -----	22
4.4.	Trasplante -----	22
4.5.	Tratamientos -----	23
4.6.	Manejo del cultivo -----	23
4.6.1.	Riego -----	23
4.7.	Variables evaluadas -----	24
4.7.1.	Cosecha -----	24
4.7.2.	Peso seco de los órganos de la planta de lechuga -----	24
4.7.3.	Determinación de la concentración nutrimental en los tejidos de las plantas de lechuga -----	24
4.8.	Diseño experimental y análisis estadístico -----	30
V.	RESULTADOS -----	30
VI.	DISCUSIÓN -----	36

VII. CONCLUSIÓN	37
VIII. REVISIÓN CITADA	38

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Clasificación de los elementos.	7
Cuadro 2. Dosis de fertilización de lechuga (SAGARPA, 2011).	21
Cuadro 3. Fertilizantes simples usados para realizar soluciones nutritivas (Cadahia, 2005).	21
Cuadro 4. Fertilizantes y cantidad de fertilizantes agregados en las soluciones nutritivas evaluadas.	23
Cuadro 5. Efecto de la concentración HCO_3^- en la solución nutritiva sobre el contenido de potasio (K), Magnesio (Mg) Manganeso (Mn) y Cobre (Cu) en el tejido de las plantas de lechuga cv. Lulú.	31

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Repartición de las especies carbonatadas en función de pH (Lemeire et al. 1989; de Rijck y Schrevens, 1997).	16
Figura 2. Efecto de interacción HCO_3^- en la concentración de los nutrientes de hoja (P, Ca, Mg, k, Cu, Fe, Mn, Zn).	31
Figura 3. Efecto de interacción HCO_3^- en la concentración de los nutrientes de la raíz (P, Ca, Mg, k, Cu, Fe, Mn, Zn).	32
Figura 4. El contenido de P en los tejidos de las plantas de lechuga fue afectado significativamente por la concentración de HCO_3^- en la solución nutritiva.	33
Figura 5. Efecto del HCO_3^- sobre el Ca en la hoja.	34
Figura 6. El efecto de la interacción de HCO_3^- en Fe.	35
Figura 7. El efecto de la concentración de HCO_3^- sobre el contenido de Zn en la hoja.	35

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Determinación del peso de las muestras.-----	24
Ilustración 2. Proceso de calcinación de muestras.-----	25
Ilustración 3. Preparación de muestras.-----	26
Ilustración 4. Proceso de aforo de muestras en un matraz.-----	26
Ilustración 5. Proceso de mezclado de muestras.-----	27
Ilustración 6. Envasado y etiquetado de las muestras.-----	27
Ilustración 7. Lectura de muestras.-----	28
Ilustración 8. Determinación de fosforo por el método de colorimetría.-----	29
Ilustración 9. Lectura de muestras de fosforo.-----	29

I. RESUMEN

La presente investigación tiene como objetivo evaluar el efecto de diferentes concentraciones de HCO_3^- en la SN sobre la concentración mineral en los tejidos de las plantas de lechuga orejona cv. Lulú. Las plantas de lechugas fueron cultivadas bajo invernadero. Se empleó un sustrato obtenido de una mezcla de 30% de perlita (0.2-0.5 mm de diámetro) y 70% de peat moost (% v/v). Se evaluaron siete concentraciones de HCO_3^- (0.6, 1.6, 2.6, 3.6, 4.6, 5.6 y 6.6 meq L^{-1}). Los nutrientes evaluados en el tejido vegetal fueron P, K, Ca, Mg, Mn, Cu, Fe y Zn. El diseño fue completamente al azar con siete tratamientos y cuatro repeticiones. Con los datos obtenidos se realizaron análisis de varianza (ANOVA), comparación de medias con la prueba de Tukey ($\alpha \leq 0.05$) utilizando el programa SAS versión 9.0. Los resultados indicaron que la mayor concentración de P, Ca, Mg, Mn, Cu y Zn en la raíz se obtuvo cuando la concentración de HCO_3^- en la solución nutritiva fue de 3.6 meq L^{-1} ; mientras que el K y Fe presentaron una mayor concentración cuando la concentración de HCO_3^- fue de 4.6 meq L^{-1} . En la parte aérea de las plantas de lechuga la mayor concentración de P, Mg, Mn y Zn se encontró cuando la concentración de HCO_3^- fue de 4.6 meq L^{-1} ; mientras que el K, Ca, Fe presentaron mayor concentración con 5.6 meq L^{-1} de HCO_3^- y el Cu con 3.6 meq L^{-1} de HCO_3^- . El contenido de biomasa total de la planta fue mayor con una concentración de 3.6 meq L^{-1} de HCO_3^- .

II. INTRODUCCIÓN

El uso del agua para la agricultura protegida, está íntimamente relacionado con el concepto de fertirrigación, a través del parámetro de calidad, que engloba concentración de sales disueltas (CE), presencia relativa de sodio (ras), contenido de carbonatos y bicarbonatos (que condicionan el pH), concentración de cloro, boro, hierro y manganeso; y nutrimentos como calcio, magnesio y sulfatos que determinan el balance final en la aplicación de fertilizantes en la preparación de una solución nutritiva (Castellón, Bernal y Hernández, 2014). La alcalinidad afecta a las tierras cultivables, causando problemas nutricionales en las plantas hortícolas cultivadas. La alcalinidad del agua es causada principalmente por carbonatos (CO_3^{2-}) y bicarbonatos (HCO_3^-), que a altas concentraciones son perjudiciales para el crecimiento de las plantas (Gómez, 2013). El CO_3 y el HCO_3^- están asociados con el pH, son la causa de la reacción alcalina en el agua de riego. En las soluciones nutritivas originan un efecto tampón deseable, sin embargo, su presencia no es favorable por los inconvenientes que presentan al precipitar sales cálcicas en el sistema de riego, específicamente en las tuberías y emisores; por lo tanto, es necesario sustituir carbonatos y bicarbonatos por otros iones (Ríos, 2006). Aguas alcalinas pueden romper las moléculas de ciertos plaguicidas reduciendo su actividad química, mediante un proceso denominado hidrolisis alcalina, sobre todo si los productos permanecen en tanques de mezcla durante un tiempo prolongado y si la temperatura ambiental es elevada (Alarcón, 1995) se ha reportado que cuando algunas plantas se desarrollan en medios con altas concentraciones de bicarbonatos se obtiene una reducción del crecimiento y rendimiento. (Parra, Lara, y Villarreal, 2012). La respuesta anterior es atribuida a la baja absorción de nutrientes por las raíces de las plantas, lo cual ocurre como efecto indirecto del aumento del pH del medio de crecimiento por la presencia de un alto contenido de bicarbonatos (Barhoumi, 2007), ya que un pH alto puede provocar falta de protones, la inhibición del potencial electroquímico y la reducción del crecimiento radicular (Monte, 2016). Existe poca información respecto al efecto y concentración óptima de bicarbonatos para cultivos de hortalizas, como es el caso del cultivo de lechuga. Por esta razón este estudio tuvo como objetivo examinar los efectos de las

concentraciones de bicarbonatos en la solución nutritiva sobre la concentración nutrimental en el tejido y biomasa seca total de las plantas de lechuga.

2.1. Objetivo General

Evaluar el efecto de las concentraciones de bicarbonatos en la solución nutritiva sobre la concentración nutrimental en el tejido y biomasa seca total de las plantas de lechuga.

2.2. Objetivo Especifico

Determinar el efecto de las concentraciones de bicarbonatos sobre la concentración de macronutrientes en los tejidos de las plantas de lechuga.

Determinar el efecto de las concentraciones de bicarbonato sobre las concentraciones de micronutrientes en los tejidos de las plantas de lechuga.

Determinar el efecto de las concentraciones de bicarbonatos sobre la biomasa seca total de las plantas de lechuga.

2.3. Hipótesis

Al menos una de las concentraciones de bicarbonatos tendrá un efecto significativo sobre la concentración nutrimental y biomasa seca total de las plantas de lechugas.

III. REVISIÓN DE LITERATURA

3.1. Alcalinidad de agua

La alcalinidad es la capacidad del agua de neutralizar evitando que los niveles de pH del agua lleguen a ser demasiado básico o ácido, o también definido como la presencia de sustancias hidrolizables en agua y que como producto de hidrólisis genera el ion hidroxilo (OH^-), como son las bases fuertes, y los hidróxidos de los metales alcalinotérreos; contribuyen a la alcalinidad los carbonos y fosfatos. La presencia de boratos y silicatos en concentraciones altas también contribuyen a la alcalinidad del medio (Pérez y Valera, 2009).

La alcalinidad del agua es expresada por meq/L o concentración de ppm o mg/L de carbonatos. La alcalinidad del agua es causada típicamente por una alta presencia de carbonatos de Ca y Mg lo cual esto se debe que dichos elementos son usualmente correlacionados con altos niveles de carbonatos (CO_3^{2-}) como carbonato de calcio (CaCO_3), bicarbonatos (HCO_3^-). La alcalinidad del agua consiste previamente en un proceso donde se considerará y establecerá la capacidad de agua, con el único fin de neutralizar, optimizar y mitigar todo tipo de ácidos que perjudique a las aguas superficiales. La alcalinidad total es la capacidad del agua para neutralizar ácidos y representa la suma de las bases que pueden ser tituladas (Goyenola, 2007).

3.2. La alcalinidad del suelo

La alcalinidad o salinidad del suelo es una condición que resulta de la acumulación de sales solubles en el suelo. La mayoría de los suelos alcalinos se encuentran en los ambientes desérticos de todo el mundo. Aunque los suelos salinos se encuentran en regiones húmedas en áreas afectadas por el agua de mar, las ocurrencias más extensas se encuentran en regiones áridas, donde generalmente se encuentran en áreas bajas donde la evaporación concentra las sales recibidas de lugares más elevados en aguas superficiales, aguas subterráneas, o agua de riego. Dado que las zonas bajas se cultivan y se riegan más fácilmente, tienen el mayor valor agrícola. Los problemas relacionados con la salinidad del suelo en

estas zonas bajas son de gran importancia en la agricultura altamente desarrollada de las regiones desérticas. El grado de alcalinidad de un suelo se expresa convenientemente en términos de valores de pH. La escala de pH se divide en 14 divisiones o unidades de pH numeradas del 1 al 14. Los suelos con un pH de 7 son neutros. Los suelos con valores de pH inferiores a 7 son ácidos o "amargos" y los suelos con valores de pH superiores a 7 son alcalinos o "dulces". Un pH de 9 es diez veces más alcalino que un pH de 8 y un pH de 10 es diez veces más alcalino que un pH de 9. Por lo tanto, un suelo con un pH de 10 es 100 veces más alcalino que un suelo con un pH de 8 (Black 1957; (National Plant Food Institute, 1962).

El pH del suelo es importante porque afecta la disponibilidad de nutrientes en el suelo. Muchos nutrientes vegetales no están fácilmente disponibles para las plantas en suelos altamente alcalinos o ácidos. Estos nutrientes esenciales están más disponibles para la mayoría de las plantas a un pH entre 6 y 7,5. En consecuencia, la mayoría de las plantas hortícolas crecen mejor en suelos con un pH entre 6 (ligeramente ácidos) y 7,5 (ligeramente alcalino) (Everhart, 1994).

3.3. Efecto de alcalinidad en las plantas

El aumento del contenido de sales en los suelos puede inhibir el crecimiento vegetal por el balance de agua, como mediante la reducción de la turgencia, así como mediante el agotamiento de la energía requerida para el metabolismo. Estas perturbaciones pueden estar generadas tanto por dificultad en la captación o transporte de agua dentro de la planta, como por efectos tóxicos ocasionados por un exceso de iones minerales en los tejidos, también se ve afectado los enzimas de las cadenas respiratorias, y dependiendo de la especie vegetal, puede aumentar o disminuir el consumo de oxígeno por parte de la planta. El contenido de compuestos fosforados desciende debido a la salinidad, la fosforilación puede verse afectada a nivel de la actividad ATP o en cualquier punto de la ruta metabólica. En conclusión, el daño causado al vegetal puede ser osmótico y nutricional (Poljakoff et al., 1994).

El ion bicarbonato es el principal anión presente en la solución del suelo de suelos calcáreos y su concentración está íntimamente asociada con las variables interrelacionadas pH, concentración de ion calcio y presión parcial de dióxido de carbono en la atmósfera del suelo. Se ha demostrado que los iones de bicarbonato inhiben el crecimiento de muchas plantas de cultivo (Harley y Lindner, 1945).

Los estudios sobre la posible función de los iones bicarbonato en la clorosis inducida por la cal han permitido reconocer los efectos sobre la absorción de iones (Wallihan, 1961); (Woolhouse, 1966) y el transporte de hierro dentro de la planta (Lindsay y Thorne, 1954), (Smith y Wiebe 1960). Se ha demostrado que los iones de bicarbonato inhiben la respiración (Miller y Evans, 1956) y la síntesis de proteínas (Steward y Preston, 1941). (Miller y Thorne, 1956) demostraron que las especies susceptibles a la clorosis inducida por la cal tenían una tasa de respiración más baja en presencia de iones bicarbonato, mientras que las especies resistentes a la clorosis no se veían afectadas.

3.4. Manejo de alcalinidad en el agua

El pH del agua para el riego y del sustrato dependen del tipo de planta y la tolerancia de ellas, pero en general, los valores deben estar entre 5,2 y 6,5. Porque en estos valores es donde se encuentran disponibles la mayoría de los nutrientes. Si el pH y la alcalinidad son mayores, requiere un tratamiento con ácido, si el pH es menor requiere el uso de bicarbonatos para neutralizarla. Las aguas que contienen mayor cantidad de bicarbonatos de calcio y de magnesio, representa la principal forma de alcalinidad, y en algunos casos, es equivalente a la dureza carbonatada o total, que es igual a la temporal, o que produce incrustaciones o almacenamientos leves que se pueden remover mediante inyecciones de aire o agua a presión (Gomella, 1999).

Para bajar el pH del agua de riego se puede agregar ácidos como el nítrico, fosfórico y el sulfúrico, también se puede bajar el pH usando fertilizantes como fosfato mono potásico y la urea fosfato que son de reacción ácida tanto en el agua de riego como en el sustrato (http://www.agro-tecnologia-tropical.com/el_ph.html).

En ocasiones, la inversión en sistemas de purificación de agua, como ósmosis inversa, puede ser económicamente justificable para producir un volumen suficiente de agua de buena calidad que permita diluir el agua de mala calidad y generar la calidad química mínima de agua que requiere la producción exitosa del cultivo de interés (Reed, 1996).

3.5. Elementos Esenciales

Los elementos esenciales para las plantas son 17 incluyendo O, H y C provenientes de H₂O, CO₂ y aire, los demás corresponden a los nutrientes minerales, los cuales, según la cantidad absorbida por la planta, se clasifican en macronutrientes y micronutrientes (Arnon y Stout, 1939).

- ✓ Un elemento es esencial si una planta no puede completar su ciclo de vida en ausencia de tal elemento.
- ✓ Un elemento es esencial si la función de este elemento no puede ser reemplazado por otro elemento mineral.
- ✓ Un elemento es esencial si forma parte de cualquier molécula o constituyente de la planta, que es en sí mismo esencial para ésta, como por ejemplo el nitrógeno en las proteínas o el magnesio en la clorofila.

Cuadro 1. Clasificación de los elementos.

Elemento	Símbolo químico	Forma de absorción
Macronutrientes		
Carbono	C	CO ₂
Hidrogeno oxígeno	O	H ₂ O
Nitrógeno	N	NH ₄ ⁺ , NO ₃ ⁻
Fosforo	P	H ₂ PO ₄ ⁻ , HPO ₄ ⁻
Potasio	K	K ⁺
calcio	Ca	Ca ²⁺
Magnesio	Mg	Mg ²⁺
Azufre	S	SO ₄ ⁻
Micronutrientes		
Hierro	Fe	Fe ²⁺ , Fe ³⁺
Zinc	Zn	Zn ²⁺ , Zn(OH) ₂
Manganeso	Mn	Mn ²⁺
Cobre	Cu	Cu ²⁺

Boro	B	$B(OH)_3$
Molibdeno	Mo	MoO_4^{2-}
Cloro	Cl	Cl^-
Silicio	Si	$S(OH)_4$
Sodio	Na	Na^+
Cobalto	Co	Co^{2+}

Los macronutrientes son nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio, azufre, los cuales se encuentran en el tejido de las plantas en concentraciones superiores a 0,1%, con base en la masa seca. Los micronutrientes son requeridos en los tejidos de las plantas en concentraciones menores a 100 µg/g de masa seca. Con estos elementos y la luz del sol, las plantas son capaces de sintetizar todos los compuestos que necesitan (Rodríguez y Flórez, 2004).

3.6. Nitrógeno

El nitrógeno es absorbido por las raíces de las plantas, en forma de nitrato (NO_3^-) o de amonio (NH_4^+). Los factores que influyen en la absorción de este elemento por parte de la planta son: la especie y el tipo de la planta, la intensidad lumínica, la presencia de nitrógeno en el medio y la cantidad de nitrógeno almacenado en las vacuolas (Sierra, 2008). En fertirriego, el nitrógeno se suministra en mayor cantidad en forma (NO_3^-), ya que permite mantener el pH (SIAR, 2005). Favorece el desarrollo del tallo, el crecimiento del follaje y contribuye en la formación de frutos y granos. Sin embargo, un exceso de este elemento provoca un crecimiento excesivo del follaje, un escaso desarrollo en el sistema radical y un retardo en la formación de flores y frutos. En hortalizas como lechuga la deficiencia de este elemento se manifiesta en hojas pequeñas y de color verde amarillento.

3.7. Fósforo

El fósforo es absorbido predominante como anión monovalente fosfato ($H_2PO_4^-$) en menor cantidad como anión divalente HPO_4^{2-} (Ananías, 2015).

En un pH alcalino la disponibilidad del fósforo está limitada por la formación de fosfatos de calcio, lo cual no es aprovechable para las plantas y en pH bajo la alta

solubilidad de aluminio y del hierro precipitan el fósforo. El fósforo participa en el metabolismo energético de la planta, porque hace parte de las moléculas AMP, ADP Y ATP. Forma parte de los ácidos nucleicos ADN Y ARN además participa en la fotosíntesis, la respiración y la síntesis de almidón.

El fósforo también forma parte de ácido fitico, importante en el desarrollo de la raíz. La deficiencia de fósforo afecta el desarrollo debido a que la producción de proteínas es muy baja y la síntesis de almidón, celulosa y sacarosa se reducen. Un efecto notorio de la deficiencia de fósforo es la reducción en la expansión celular, razón por la cual, las plantas pueden presentar enanismo. El fósforo se encuentra en mayor proporción en las hojas jóvenes, flores y semillas en desarrollo (Medina, 1999; Molina, 2002; Rodríguez, 1992).

3.8. Potasio

El potasio es un catión univalente (K^+) son absorbidos en grandes cantidades por las plantas. El potasio (K) juega un papel importante en la fotosíntesis, pues acelera el flujo y translocación de los productos asimilados, tales como los azúcares y almidones que son formados durante la fotosíntesis y luego transportados desde las hojas hasta los órganos de reserva (frutos, semillas, tubérculos, etc.). Asimismo, el potasio incrementa el rendimiento y calidad de la cosecha, mejorando el sabor, el contenido de azúcares y el color de los frutos. Favorece la resistencia a enfermedades al fortalecer los tejidos vegetativos; el potasio también mejora las propiedades de almacenamiento post cosecha de frutas y hortalizas, al promover mayor firmeza y resistencia de los tejidos (Medina *et al.*, 1999; Molina, 2002; Rodríguez, 1992).

La deficiencia de este nutriente produce un estancamiento en el desarrollo de la planta: los entrenudos de los tallos son cortos y los tallos resultan débiles, así mismo, la producción de granos y frutos se ve afectada. En el fruto, la presencia de potasio asegura un buen contenido de azúcares, ácidos y aroma. Y una deficiencia de calcio, este desbalance está asociado a un exceso de absorción de nitratos. Con

esta información se realza la importancia de mantener un suministro balanceado tanto de potasio como de calcio.

3.9. Azufre

Las raíces de las plantas absorben el azufre en forma de aniones de sulfato (SO_4^{2-}) y su contenido en los tejidos vegetales es variable, siendo las Crucíferas las que tienen un contenido mayor, la absorción de SO_4^{2-} por la raíz es un proceso activo, mediante el cotransporte con $\text{H}^+/\text{SO}_4^{2-}$. La reducción del SO_4^{2-} al igual que la del NO_3^- en la raíz es muy pequeña y casi todo se transporta, vía xilema, a las hojas, donde se transforman (Benavides y preciado, 2006).

3.10. Calcio

El calcio (Ca^{2+}) es un elemento esencial porque interviene en la estabilidad de la membrana plasmática y en la integridad de la célula, ya que es componente básico de la lámina media de la pared celular, en forma de pectatos de calcio. La presencia de pectatos de calcio en las paredes celulares protege los tejidos contra el ataque de hongos. Por otra parte, es un elemento importante en el crecimiento del tubo polínico. La deficiencia de este elemento impide el desarrollo de la planta, ya que los tejidos meristemáticos de la parte aérea y de la raíz se afectan por división celular incompleta. Como consecuencia, las hojas y las raíces nuevas se desarrollan con deformaciones (Rodríguez y flores, 2004).

Es importante destacar que el calcio en la planta se moviliza por la xilema, por lo tanto, su deficiencia puede ser inducida por condiciones climáticas que no favorecen la corriente transpiratoria en la planta, lo cual está relacionado con los mecanismos de absorción de éste nutriente, que se realiza por intercepción radical y flujo de masas. Otro factor a considerar es el antagonismo entre el calcio y el magnesio. Una deficiencia de calcio puede provocar mayor absorción del magnesio, provocando síntomas de fitotoxicidad. En el caso contrario, altos contenidos de calcio regulan la absorción del potasio, evitando el consumo de lujo de éste elemento. La deficiencia en lechugas se presenta mayor sensibilidad a daños por

hongo y factores abióticos, hay quemadura en borde y deformaciones en hojas jóvenes (INTAGRI, 2018).

3.11. Magnesio

El magnesio es absorbido por las plantas como un catión divalente (Mg^{2+}). Es muy móvil en la planta e importante para los diferentes procesos del metabolismo de la planta, su absorción puede ser afectada por relaciones altas de Ca/Mg, en cuyo caso las plantas absorben menos magnesio. La deficiencia de magnesio puede acentuarse con dosis altas de potasio. El magnesio tiene funciones importantes dentro de la planta: es el átomo central de la molécula de la clorofila, interviene en la síntesis de proteínas, en el metabolismo del fósforo, en la respiración y en la activación de varios sistemas enzimáticos en las plantas. La deficiencia de magnesio se presenta según el factor, en las hojas viejas se presentan manchas cloróticas entre las nervaduras de las hojas, en caso de deficiencia prolongada aparecen necrosis y coloración rojiza en el tallo, en el caso de radiación solar se ve marchitada y flácida (Suttner, 2019).

3.12. Boro

El boro es absorbido por la planta en forma de anión $H_2BO_3^-$, este elemento es básicamente transportado por la xilema, lo que implica que su distribución en las plantas está determinada principalmente por la transpiración ya que es un elemento poco móvil. El papel de boro en la nutrición de las plantas es de los menos comprendidos. Sin embargo, es conocido que la deficiencia de boro inhibe la elongación de la raíz y la síntesis de ADN. Igualmente, la deficiencia de boro induce la acumulación de fenoles que al ser activados por la luz producen radicales superóxidos que pueden dañar las membranas. Su deficiencia se observa en las yemas más jóvenes, las cuales se decoloran y pueden morir. Esto promueve la proliferación de brotes con entrenudos cortos, dando la apariencia de una roseta. También, puede ocurrir clorosis intervenal en las hojas maduras. Así mismo, se puede registrar un incremento en el diámetro de los pecíolos y tallos de las

hortalizas, y caída de yemas, flores y frutos en desarrollo. En lechuga, el exceso de boro produce necrosis marginal en las hojas más viejas (Alarcón, 2019).

3.13. Cloro

El cloro es fácilmente tomado por las plantas en su forma de ión inorgánico (Cl^-) y es altamente móvil dentro de la misma. Este elemento está involucrado en la fotosíntesis, ya que es requerido para la fotólisis del agua en el sitio de oxidación del fotosistema II, además en la regulación estomática, sirviendo de anión acompañante al potasio en su entrada y salida de las células guardas. También, está implicado en el balance de las cargas y en el ajuste osmótico dentro de las células. En muchas plantas, la ausencia de cloro se manifiesta en una reducción del área foliar y, por tanto, en la masa seca de la planta, resultado de la disminución en las tasas de división y de extensión celular. Sin embargo, es difícil que se presente la deficiencia de este elemento en las plantas cultivadas, porque, generalmente, el agua de riego tiene suficiente cantidad de cloro para suplir las necesidades del cultivo (Adder Retamozo, 2012).

3.14. Cobre

El cobre es un catión divalente (Cu^{2+}) que junto con el hierro y el manganeso interviene en la síntesis de la clorofila. Se suministra en forma de quelatos en la solución fertilizante. En el sustrato, el rango normal es de 3-10 ppm, la deficiencia o la toxicidad del cobre rara vez se presentan, lo mejor es evitar los extremos. En las plantas, el cobre activa ciertas enzimas implicadas en la síntesis de lignina, es necesario en el proceso de fotosíntesis y coadyuvante de estas en el metabolismo de carbohidratos y proteínas, y ayuda a intensificar el sabor, el color en las hortalizas y en las flores. El cobre es inmóvil; los síntomas de su deficiencia se presentan en las hojas nuevas, dichos síntomas varían dependiendo el cultivo normalmente comienzan por enrollamiento y una leve clorosis, ya sea en toda la hoja o bien entre las venas de las nuevas, dentro de las hojas puede formarse pequeños puntos necróticos, particularmente en los bordes de estas a medida que los síntomas progresan. El pH del suelo ácidos aumenta la absorción de Cu y de suelos con un

alto pH inhibe la absorción (Universidad de los Andes Bolivia, Viveros de Occidente 2018).

3.15. Hierro

Las formas de hierro más comunes en el suelo y en las soluciones nutritivas son los quelatos de Fe^{3+} y de Fe^{2+} . Es un elemento asociado con el desarrollo de los cloroplastos, la síntesis de ferredoxina y la de clorofila. En condiciones de crecimiento controladas, aproximadamente el 80% del hierro está localizado en los cloroplastos de hojas de rápido desarrollo, lo cual evidencia la importancia del hierro en la fotosíntesis. La deficiencia de hierro puede tener varias causas: 1) Por un desbalance con otros elementos, como el exceso de fósforo y los altos niveles de bicarbonato; 2) En pH básico, porque el hierro forma compuestos insolubles no disponibles para las plantas y 3) En suelos ácidos, el aluminio soluble es más abundante y restringe la absorción del hierro (Benavides, 1999).

3.16. Manganeso

El manganeso se absorbe como catión manganeso (Mn^{2+}) es un nutriente inmóvil y, por lo tanto, los síntomas de deficiencia de manganeso aparecen primero en las hojas más jóvenes, un nivel de Mn de 20 a 40 ppm en el tejido vegetal, el manganeso es soluble a pH ácidos inferior a 5,5 y en suelos encharcados. Su solubilidad se reduce en suelos alcalinos o ácidos con alto contenido de materia orgánica. El manganeso es importante en el proceso fotosintético, ya que, junto con el cloro, participa en la fotólisis del agua. Por otra parte, la presencia de este elemento en el fotosistema II favorece la fotofosforilación, la reducción del CO_2 , y la reducción del nitrito y del sulfato. Al respecto, se ha identificado una sintomatología foliar para monocotiledóneas y dicotiledóneas. En monocotiledóneas, las deficiencias aparecen en forma de puntos de color gris verdoso. Mientras que, en dicotiledóneas, se manifiesta por la presencia de puntos amarillos en las hojas jóvenes. La presencia de carbonatos y altos contenidos de fósforo disminuyen la disponibilidad de este micronutriente. Así mismo, un desbalance a favor del Fe, Cu y Zn disminuyen la toma de este elemento por parte de la planta (Guy, 2019).

3.17. Molibdeno

Este micronutriente es absorbido bajo la forma de oxianión molibdato (MoO_4^{2-}). Su absorción por las raíces puede ser afectada por la presencia del ión SO_4^{2-} , porque los mecanismos que controlan la absorción de SO_4^{2-} , también pueden afectar la remoción de MoO_4^{2-} . La importancia del molibdeno radica en que es un constituyente esencial de las enzimas que tienen que ver con la fijación biológica de nitrógeno y con la reducción de nitrato a amonio; las deficiencias de molibdeno puede reducir la fijación de nitrógeno en las plantas noduladas en las hortalizas como coliflor y el brócoli, se presenta la cola de látigo, los síntomas se caracterizan por una clorosis entre las venas, esto ocurre primero en las hojas viejas y luego progresa hacia las hojas jóvenes, en algunos casos la cola de látigo no se tornan cloróticas, sino que las hojas jóvenes crecen de forma enrollada, muriendo posteriormente. Normalmente se encuentra 0.01 a 505 ppm mientras que los aceptables se encuentran por encima de 0.6 ppm en hojas (Hernández, 2002).

3.18. Zinc

El zinc es absorbido por la planta como catión divalente (Zn^{2+}) ligeramente móvil en la planta es constituyente estructural y funcional de muchas enzimas. Esta enzima está localizada tanto en los cloroplastos como en el citoplasma, se requiere para la síntesis de carbohidratos durante la fotosíntesis y en la transformación de los azúcares en almidón (una deficiencia de zinc reduce en un 50-70% la fotosíntesis dependiendo del cultivo). Juega un papel importante en la maduración y producción de semillas, a través de la formación fertilidad del polen, por ello la deficiencia de zinc tiene mayor efecto en el rendimiento del grano que en el desarrollo vegetativo (Castellanos y Rodríguez, 2014). La disponibilidad de este nutriente aumenta con la disminución del pH y la presencia de sulfato. Mientras que su disponibilidad disminuye a pH básico.

El zinc en los cultivos es muy variado dependiendo de la especie, incluso de las variedades en lechugas tiene un rango de suficiencia en tejido vegetal 25-100 ppm, (Barker y Pilberan, 2006).

3.19. Níquel

El níquel es un elemento esencial para las plantas, el rango normal de níquel en la mayoría de los tejidos esta entre 0.05 y 5 ppm. Su importancia radica que hace parte de la enzima ureasa que disocia la urea en CO_2 y NH_4^+ . En plantas con deficiencia mayor se presenta en las hojas viejas ya que es un elemento móvil. La esencialidad de este elemento fue demostrada en cebada, donde se encontró que después de tres generaciones sin níquel, las semillas eran incapaces de germinar y presentaban deformaciones anatómicas. Ayuda en la absorción del hierro, en la viabilidad de las semillas, en la fijación del nitrógeno y en el desarrollo reproductivo (Troy, 2018).

3.20. Disponibilidad de cationes por efecto de alcalinidad

La Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) es una medida de cantidad de cargas negativas presentes en las superficies de los minerales y componentes orgánicos del suelo (arcilla, materia orgánica o sustancias húmicas) y representa la cantidad de cationes que las superficies pueden retener (Ca, Mg, Na, K, NH_4 etc.). Estos serán intercambiados por otros cationes o iones de hidrogeno presentes en la solución del suelo y liberados por las raíces. El nivel de CIC indica la habilidad de suelos a retener cationes, disponibilidad y cantidad de nutrientes a la planta, (FAO, 2021). La alcalinidad puede ser expresada en miliequivalente por litro (meq/L) o concentración de partes por millón (ppm o mg/L) de carbonatos expresados en: (alcalinidad meq/L) (carbonatos totales (como CaCO_3) ppm = mg/L) (Bicarbonatos (HCO_3^-) ppm = mg/L). Cuando se utilizan aguas con alta alcalinidad se produce un alto pH del sustrato, y este a su vez, hace poco disponibles a ciertos nutrientes, aun cuando estos se encuentran presentes en el sustrato. Uno de los más afectados es el hierro, manifestándose rápidamente síntomas de clorosis intervenal de las hojas jóvenes. Cuando la deficiencia de hierro se torna severa puede incluso aparecer como amarillamiento o blanqueamiento general de todas las hojas jóvenes. El zinc y manganeso son otros de los micronutrientes que también pueden verse afectados por una alta alcalinidad del agua; al ser micronutrientes no móviles dentro de las plantas, sus síntomas también se ponen de manifiesto en las hojas más jóvenes (INTAGRI, 2018). En el suelo se encuentran los cationes ácidos (hidrógeno y

aluminio) y los cationes básicos (calcio, magnesio, potasio y sodio). La fracción de los cationes básicos que ocupan posiciones en los coloides del suelo se refiere al porcentaje de saturación de bases.

El pH de un agua de riego está definido principalmente por el contenido relativo de bicarbonatos y carbonatos. El pasó de carbonato a bicarbonato, de éste a ácido carbónico y que éste pase a CO_2 está gobernado por el pH. Este último paso diferencia frente al de las especies fosfatadas. En una solución con altos contenidos de bicarbonatos, el pH de la solución puede cambiar con el tiempo debido a ese CO_2 disuelto en agua. Suele ser frecuente que el pH suba hasta una unidad desde la adición de ácido en los cabezales hasta que llega la solución a los emisores (figura 1).

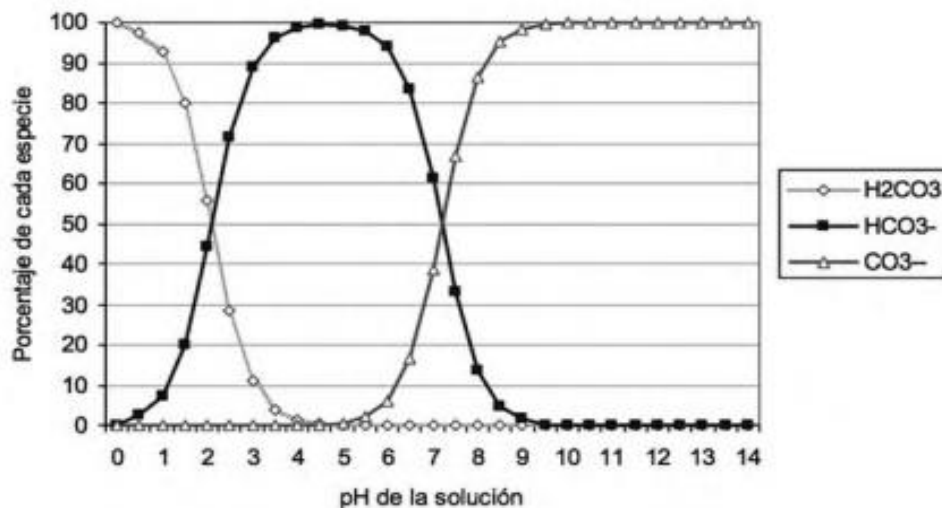


Figura 1. Repartición de las especies carbonatadas en función de pH (Lemeire et al. 1989; de Rijck y Schrevens, 1997).

A efectos prácticos se considera que cuando la concentración de bicarbonatos es de aproximadamente 0.5 mmol/L, el pH de la solución nutritiva está entre 5.5 y 6. En aguas con mayor contenido de carbonatos y bicarbonatos que el deseado, se baja el pH mediante la adición de compuestos ácidos. Para conseguir el pH deseado se añaden tantos meq/L de ácido como meq/L de bicarbonatos haya que destruir. Si el agua tiene una alta cantidad de bicarbonatos (y en algunos casos de carbonatos), la acidificación puede llegar a ser antieconómica o tener problemas de

manejo importantes por la adición de los aniones nitrato, fosfato, sulfato o cloruro (Santos Y Ríos, 2016). Señalan que las aguas con más de 8 meq/L de bicarbonatos son bastante difíciles de manejar a la hora de bajar el pH a valores de 5.5 – 6.0. (Raviv y Lieth, 2008).

3.21. Conductividad eléctrica

La conductividad electrolítica es la medida de la capacidad de una solución para conducir una corriente eléctrica y es a veces denominado "conductancia específica". Conductividad electrolítica se define como la inversa o recíproca de resistencia eléctrica y utiliza la unidad microsiemens (como es conocido comercialmente, μS). Resistividad es inversa a la conductividad se define como la medida de la capacidad de una solución para resistir el flujo de una corriente eléctrica. En el cultivo de lechuga el óptimo es de 1.3 a 2.0 es donde nos da el 100% rendimiento ya que llegando al 2.1 baja en rendimiento (Méndez, 1999).

3.22. Cultivo de lechuga

Antes de la domesticación por los humanos la lechuga crecía de manera silvestre. Aún no está claro que especies participaron en la evolución que condujo a la lechuga moderna. Pero hay certera evidencia de que *Lactuca serriola* es uno de los ancestros directos, dado que los cromosomas entre *L. sativa* y *L. serriola* son muy similares morfológicamente y no tienen problemas en cruzarse libremente (Vries, 1997; Kesseli, 1991).

La lechuga es un cultivo que la humanidad domesticó desde hace mucho tiempo. La cuestión es que el centro de origen de la lechuga sigue siendo discutido. Hay autores que afirman que procede de la India, mientras que otros se decantan por regiones templadas de Europa, Asia y América del Norte, no parece estar muy claro, aunque algunos autores afirman que procede de la India, aunque hoy día los botánicos no se ponen de acuerdo, por existir un seguro antecesor de la lechuga, *Lactuca scariola*, que se encuentra en estado silvestre en la mayor parte de las zonas templadas (Mallar, 1978).

Describió los tres tipos de lechuga modernos: lechuga de cabeza, lechuga de hojas sueltas y lechuga romana. Fue gracias al trabajo de horticultores alemanes y holandeses que en el siglo XVIII se comenzaron a obtener numerosas variedades de lechuga. Lo que se sabe hasta ahora es que las primeras lechugas fueron de hojas sueltas. Al parecer las variedades acogolladas se conocieron en Europa hasta el siglo XVI, cuando la lechuga romana fue introducida a Francia, de donde pasó a Inglaterra y luego al resto del continente. Actualmente hay 578 especies de lechuga descritas que abarcan unas 20,000 variedades distintas, de las cuales muy pocas se cultivan comercialmente. De todas esas especies hoy en día solo 113 están aceptadas botánicamente (Joachim Camerarius, 1586).

3.23. Solución nutritiva (SN)

La SN consiste en agua con oxígeno y los nutrimentos esenciales en forma iónica. Algunos compuestos orgánicos como los quelatos de fierro forman parte de la SN, (Steiner, 1968). Para que la SN tenga disponibles los nutrimentos que contiene, debe ser una solución verdadera, todos los iones se deben encontrar disueltos. La pérdida por precipitación de una o varias formas iónicas de los nutrimentos puede ocasionar su deficiencia en la planta. Además, de este problema se genera un desbalance en la relación mutua entre los iones (Steiner, 1961).

3.24. Producción mundial de lechuga

China, EE. UU., India, España e Italia, por este orden, generan 8 de cada 10 lechugas que se producen en el mundo. La producción mundial de lechuga ha sido de 24.976'32 millones de kilos, sobre una superficie de 1.16 millones de hectáreas, China produce el 54.64 por ciento del total mundial, EE. UU. El 15.17, India el 4.4, España el 3.6 e Italia el 2.84 por ciento y el 19.35 % lo produce el resto de los países (FAO, 2017).

Estados Unidos de América (EE. UU.) y España son los países que mejor rendimiento por metro obtienen en la producción de lechuga, teniendo en cuenta los cinco mayores productores mundiales.

De los 24.97632 millones de kilos de lechuga que se han producido en el mundo, más de la mitad, corresponde a china, primer productor mundial, con 13.65457 millones de kilos, el 54.64 % de total, 584.459 ha y un rendimiento de 2.34 kg/m². El segundo en el ranking es EE. UU. Con 3.79114 millones de kilos (15.17 %), 107.240 hectáreas y 3.54 kg/m², seguida por india con 1.0971 millones de kilos (4.4%), 172.432 hectáreas y 0.64 kg/m² después le sigue España ocupando el cuarto lugar en la producción mundial de lechugas, con 902,94 millones de kilos (3.6%), 33.868 hectáreas y 2.67 kg/m². En la quinta posición está ocupada por Italia, que ha producido 70937 millones de kilos sobre 32.991 hectáreas, obteniendo un rendimiento medio de 2.15 kg/m² (FAO, 2014).

3.25. Tipos y variedades de lechuga que se producen en México (*Lactuca sativa* L):

La producción nacional de lechuga en 2017 fue de 466.8 mil toneladas, 6.1%. En los últimos años, se cosecharon cuatro variedades de lechuga en el país.

- **Baby leaf:** son brotes tiernos que se recolectan cuando su tamaño aun es bastante pequeño, entre ocho y 12 centímetros. Es una hortaliza considerada especial por estar orientada al segmento del mercado gourmet, por su diversidad de texturas y colores, se produce en el estado de Baja California.
- **Escarola:** principalmente la de hojas rizadas, tiene un sabor ligeramente amargo que da ese toque especial. Esta variedad se produce con en la ciudad de México.
- **Orejona:** tiene hojas largas que abrazan el tallo, de textura crujiente y hermoso color verde oscuro, y como otras lechugas, alrededor del 17% es proteína los principales estados productores son Guanajuato y puebla.
- **Romana:** es la variedad de lechuga más común, con forma de ovillo compacto, similar al de una col; sus hojas son largas y redondas, crujientes y de sabor suave y acuosa y son producidas en los estados de Guanajuato, zacatecas y Aguascalientes (SIAP, 2017).

El cultivo de lechuga se da en 22 estados de la República mexicana, siendo Guanajuato, Zacatecas y Puebla los principales productores de esta planta herbácea, y gracias al trabajo de las y los productores mexicanos, el país se coloca como noveno productor a nivel mundial (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, 2017).

3.26. Nutrición

La nutrición de lechuga es de suma importancia porque los requerimientos de dosis de fertilización y época de aplicación demanda las diferentes etapas fenológicas, el cual el cuidado y tiempo en forma más adecuado de estos pasos del cultivo nos define la calidad y rendimiento de los cultivos.

La dinámica en la disponibilidad de nutrientes es diferente al incorporar compuestos orgánicos en el manejo de los suelos hortícolas, respecto a los sistemas que reciben una fuente mineral. La calidad de la materia orgánica aportada depende de los materiales de origen y del grado de estabilización; materiales con alto contenido de materia orgánica lábil inducen mayor actividad biológica y liberación de nutrientes en el suelo, mientras que la materia orgánica de lenta descomposición con alta relación C/N contribuye a mejorar la capacidad de almacenamiento de agua y nutrientes y a controlar la erosión (Cooperband, 2000).

3.27. Fertilización

La cantidad de nutrientes que absorben la lechuga van a depender de la cantidad de biomasa producida por los distintos órganos de la planta (hojas, tallo, raíz) por lo que las extracciones van a variar dependiendo del tipo de lechuga, variedad, ciclo del cultivo (Pomares y Ramos, 2010). Con la finalidad de obtener un buen rendimiento y calidad de producto, es importante que la planta a los treinta días ya haya formado un esqueleto robusto, lo cual se logra realizando una buena fertilización; en caso contrario se afectará drásticamente el potencial de rendimiento de las variedades. Dosis de fertilización y época de aplicación de acuerdo con la demanda fisiológica de cultivo de lechuga (Cuadro 2).

Cuadro 2. Dosis de fertilización de lechuga (SAGARPA, 2011).

Días de cultivo	Kg (Kg/ha)		
	Nitrógeno	fosforo	Potasio
0	10	5	10
5	15	5	10
15	25	10	40
25	50	15	40
35	25	10	
45	20	5	
50	20	5	

Cuadro 3. Fertilizantes simples usados para realizar soluciones nutritivas (Cadahia, 2005).

Fertilizantes	formula	Riqueza (%)	Efecto sobre la acidez	solubilidad
Nitrato de calcio	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	15.5 N, 19 Ca	Básico	1020
Nitrato de potasio	KNO_3	13 N, 38 K	básico	130
Nitrato de amonio	NH_4NO_3	35 N	acido	1180
Nitrato de magnesio	$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	11 N, 9 Mg	neutro	420
Fosfato Monopotásico	KH_2PO_4	23 P, 28 K	básico	330
Fosfato monoamónico	$\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$	27 P, 12 N	Acido	230
Sulfato de potasio	K_2SO_4	45 K, 18 S	Neutro	70
Cloruro de potasio	KCl	52 K, 48 Cl	Neutro	35
Sulfato de magnesio	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	10 Mg, 13 S	neutro	710
Sulfato de amonio	$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	20 N, 24 S	Muy acido	710
Sulfato de manganeso	$\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	32 Mn		
Sulfato de Zinc	$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	23 Zn		
Bórax	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	11 B		
Sulfato de cobre	$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	25 Cu		
Molibdato amónico	$(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}$	58 Mo		
Molibdato sódico	$\text{NaMoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	40 Mo		

Quelato de hierro	Fe-EDTA	13 Fe	
Quelato de hierro	Fe-DTPA	9 Fe	
Quelato de hierro	Fe-DTPA	7 Fe	
Quelato de hierro	Fe-DTPA	6 Fe	
Quelato de hierro	Fe-EDDHA	5 Fe	
Quelato de hierro	Fe-EDDHA	6 Fe	
Bicarbonato potásico	KHCO ₃	39 K	
Hidróxido de calcio	Ca(OH) ₂	54 Ca	Básico

IV. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Localización del experimento

El trabajo de investigación se realizó en un invernadero de tipo casa en el departamento de horticultura de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, en saltillo, Coahuila, México, cuyas coordenadas geográficas son; latitud norte 25°21'23.19" y latitud sur 101°02'12.34.

4.2. Material vegetativo

El material vegetativo que se utilizó en el experimento fue las plantas de lechuga (*Lactuca sativa L.*) de tipo orejona cv Lulú de un mes de siembra. Las plántulas cumplieron las características favorables como vigor, numero de hojas, color y longitud de raíz.

4.3. Instalación de experimento

Se utilizó macetas de plástico negro de 2 kilogramos de capacidad. Los contenedores, se llenaron del sustrato obtenido de la mezcla de 30% de perlita (0.2-0.5 mm de diámetro) y 70% de peat moost. Antes de trasplantar se rego a capacidad de campo con pura agua.

4.4. Trasplante

El trasplante se realizó el 15 de mayo de 2018. Se plantó una planta por maceta cubriendo bien la raíz. La distancia entre maceta se fue aumentando conforme fue creciendo la cabeza de la lechuga.

4.5. Tratamientos

Las soluciones nutritivas (SN) se prepararon con agua potable teniendo en cuenta el análisis de agua de ésta. Los tratamientos consistieron en diferentes concentraciones de bicarbonatos HCO_3^- (0.6, 1.6, 2.6, 3.6, 4.6, 5.6 y 6.6 me L^{-1}), (cuadro 4).

Cuadro 4. Fertilizantes y cantidad de fertilizantes agregados en las soluciones nutritivas evaluadas.

HCO_3^-	$\text{K}^+\text{H}_2\text{PO}_4$	K^+SO_4	KCl	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$	$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$	NH_4 NO_3	$(\text{NH}_4)_2$ SO_4
me L^{-1}							
0.66	2.069	4.402	2.835	6.081	2.605	8.406	2.094
1.66	2.069	4.402	2.835	6.081	2.605	6.886	2.094
2.66	2.069	4.402	2.835	6.081	2.605	5.366	2.094
3.66	2.069	4.402	2.835	6.081	2.605	3.846	2.094
4.66	2.069	4.402	2.835	6.081	2.605	2.307	2.094
5.66	2.069	4.402	2.835	6.081	2.605	0.806	2.094
6.66	2.069	4.402	2.835	6.081	2.605	0.806	0.840

4.6. Manejo del cultivo

4.6.1. Riego

Los riegos se realizaron de manera manual. Los tres primeros días se regó con pura agua, al tercer día después del trasplante se regó con SN correspondiente a cada tratamiento, los cuales se aplicaron dos veces al día, el primer riego se aplicó entre 9:00-10:00 am y el segundo riego entre 3:00-4:00 pm. Dependiendo de la etapa fenológica.

4.7. Variables evaluadas

4.7.1. Cosecha

El experimento concluyó a los 70 días después del trasplante. Se evaluaron tres plantas por tratamiento.

4.7.2. Peso seco de los órganos de la planta de lechuga

Las plantas fueron lavadas con agua potable para quitar las impurezas y después se separó por órganos, posteriormente, estos se dejaron secando al aire libre por un día, luego se secaron por completo en una estufa de secado a 70°C durante 72 horas. Posteriormente se determinó el peso seco de cada órgano y el peso seco total por planta.

4.7.3. Determinación de la concentración nutrimental en los tejidos de las plantas de lechuga

La biomasa seca se trituró y se tomó una muestra de 1 gramo del órgano a evaluar para llevar a cabo el análisis de los nutrientes, este análisis fue por método de (calcinación) excepto el fosforo, para el cual se siguieron los siguientes pasos:

1.- Se pesó 1 gramo de la muestra que son hoja y tallo en una balanza granataria que se ocupa en el laboratorio una vez pesado completo el 1 gramo se puso en un crisol, que también el crisol se número para no confundir las muestras (ilustración 1).



Ilustración 1. Determinación del peso de las muestras.

2.- El caso de raíz se usó el molino para que quede más fino, es un molino eléctrico, antes de que se molió este se limpió muy bien para que no altere la muestra por los residuos que puedan contener este molino.

3.- El horno se calienta 30 minutos antes de meter las muestras para tener una temperatura cerca de 600 °C y así mantener durante 2 horas las muestra adentro del horno (ilustración 2).



Ilustración 2. Proceso de calcinación de muestras.

4.- Pasando las 2 horas se sacan para que la muestra se enfríe también se tuvo mucho cuidado por sacar las muestras, con la ayuda de pinzas metálica y guantes gruesa de algodón ya que esta extremadamente caliente, en este análisis que se realizó se dejó por un día y una noche.

5.- El siguiente paso una vez fría se agrega 1 ml de ácido clorhídrico adentro del crisol se menea por 1 minuto ahí dentro de crisol (ilustración 3).



Ilustración 3. Preparación de muestras.

6.- se diluyo con agua destilada con una aproximación de 3 ml. (ilustración 4).



Ilustración 4. Proceso de aforo de muestras en un matraz.

7.- De ahí se pasó en un matraz de 100 ml luego se aforo con agua destilada a 100 ml se agito bien por 1 minuto (ilustración 5).



Ilustración 5. Proceso de mezclado de muestras.

8.- finalmente se embazo con un frasco de plástico transparente limpia con tapa de rosca también con etiqueta para no confundir de las muestras (ilustración 6).



Ilustración 6. Envasado y etiquetado de las muestras.

9.- Una vez que se terminó de preparar las muestras se tomó la lectura de absorción atómica (ilustración 7).



Ilustración 7. Lectura de muestras.

Análisis de fósforo por colorimetría

Materiales y reactivos

- 1.- espectrofotometría UV- visible para uso a 400-490 nm
- 2.- material de vidrio de laboratorio
- 3.- aparato de filtración y papel de filtro
- 4.- solución acuosa de indicador de fenolftaleína
- 5.- ácido clorhídrico, se recomienda una concentración final de la muestra de 0,5 N.
- 6.- reactivo vanadato-molibdato

Procedimiento

Desarrollo de color en la muestra: en un matraz aforado de 50 ml. Añade 10 ml. de reactivo vanadato-molibdato y diluye hasta la señal con agua destilada (Ilustración 8).



Ilustración 8. Determinación de fósforo por el método de colorimetría.

Debes preparar un blanco con 35 ml. de agua destilada en lugar de la muestra. Al cabo de 10 minutos o más, mide la absorbancia de la muestra frente a un blanco a longitud de onda de 400 a 490 nm en función de la sensibilidad deseada (Ilustración 9).



Ilustración 9. Lectura de muestras de fósforo.

4.8. Diseño experimental y análisis estadístico

El diseño experimental fue completamente al azar con siete tratamientos y cuatro repeticiones los cuales se tomó la muestra de ellas se tomaron tres muestras por tratamiento y los datos obtenidos se sometieron a un análisis de varianza (ANOVA) utilizando el programa SAS (Statistical Analysis Systems) versión 9.0, la comparación de medias fue a prueba de Tukey ($\alpha \leq 0.05$) también se sacó el error.

V. RESULTADOS

La concentración de bicarbonatos (HCO_3^-) en la solución nutritiva (SN) afectó significativamente el contenido de potasio (K), magnesio (Mg), manganeso (Mn), cobre (Cu) en las plantas de lechuga y el peso seco de raíz y hoja de estas (tabla 4). El contenido de K en el tejido de las plantas se incrementó con el aumento de la concentración de HCO_3^- en la SN, ya que, con 0.6 meq L^{-1} de HCO_3^- fue menor el contenido de K, mientras que, con 4.6 meq L^{-1} se presenta la mayor concentración de este nutriente, pero superior a este disminuye (cuadro 4). El contenido de Mg en la planta se incrementó significativamente con el aumento de la concentración de HCO_3^- en la SN, independientemente se nota en las diferentes concentraciones del experimento, en especial el Mg tenemos el valor más alto en la concentración de 5.6 meq L^{-1} de HCO_3^- porque llegando a 6.6 meq L^{-1} de HCO_3^- tiende a bajar la concentración de este nutriente en el tejido (cuadro 4). El contenido de Mn en el tejido de la planta de lechuga la concentración fue aumentando cuando aumento el HCO_3^- en la solución nutritiva llegando a 4.6 meq L^{-1} HCO_3^- fue el más alto de todos porque llegando en 5.6 y 6.6 baja el contenido de este micronutriente (cuadro 4). En el caso de Cu la concentración fue mayor en 4.6 meq L^{-1} de HCO_3^- lo cual es evidente que los aniones le favorecen aun tal concentración el cual es 4.6 meq L^{-1} de HCO_3^- , tanto como en características físicas fueron las más vigorosas conforme fue subiendo la concentración de HCO_3^- fue bajando en contenido de este nutriente en las plantas (cuadro 5).

Cuadro 5. Efecto de la concentración HCO_3^- en la solución nutritiva sobre el contenido de potasio (K), Magnesio (Mg) Manganeseo (Mn) y Cobre (Cu) en el tejido de las plantas de lechuga cv. Lulú.

HCO_3^-	K	Mg	Mn	Cu
mg/ Planta				
0.6	832.87 d	142.47 E	2511.83 de	127.84 e
1.6	931.72 c	122.28 F	2624.55 d	145.03 d
2.6	982.54 c	158.27 D	2956.75 c	165.13 c
3.6	1092.87 b	187.7 C	3404.05 b	186.94 b
4.6	1190.72 a	230.9 B	3776.5 a	206.79 a
5.6	1125.36 ab	245.97 a	3151.58 c	180.43 b
6.6	910.51 cd	147.17 de	2327.61 e	138.81 de
ANOVA $P \leq$	0.01	0.001	0.01	0.001
CV (%)	3.72	3.43	3.41	3.4

Anova= análisis de varianza, CV= coeficiente de variación. Las letras a, b y c son las categorías obtenidas de la comparación de medias con Tukey al 0.05.

La concentración en hojas de 4.6 y 5.6 meq de HCO_3^- para las plantas es el ideal para el crecimiento por que alcanzan el punto máximo de absorción de los nutrientes ya que debajo de esto valores la concentración en el tejido son inferiores tanto en la absorción y el peso foliar de la planta (figura 2).

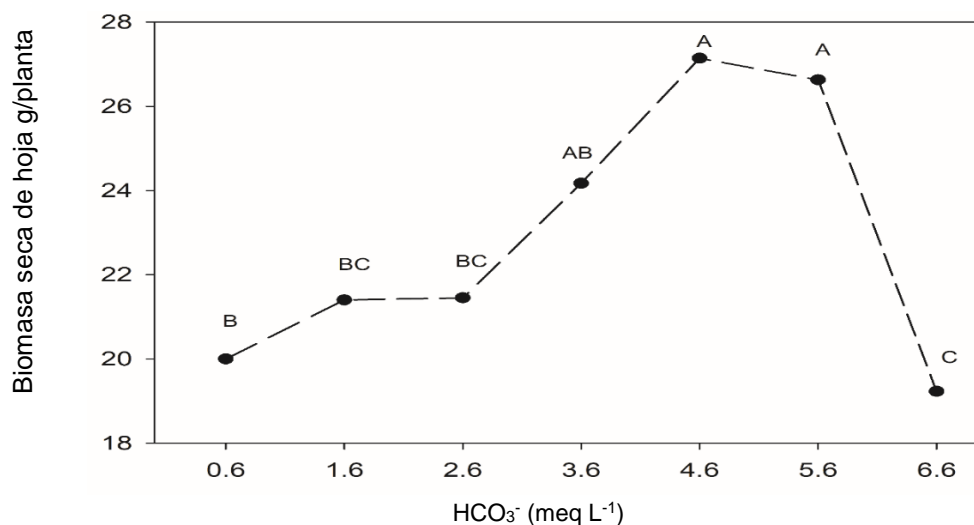


Figura 2. Efecto de interacción HCO_3^- en la concentración de los nutrientes de hoja (P, Ca, Mg, k, Cu, Fe, Mn, Zn).

La concentración de HCO_3^- que se irrigo con 3.6 y 4.6 meq L^{-1} en la raíz de las plantas fue donde se encontró mayor concentración de nutrientes, pero a una concentración superior a estas no son aprovechables para las mismas (figura 3).

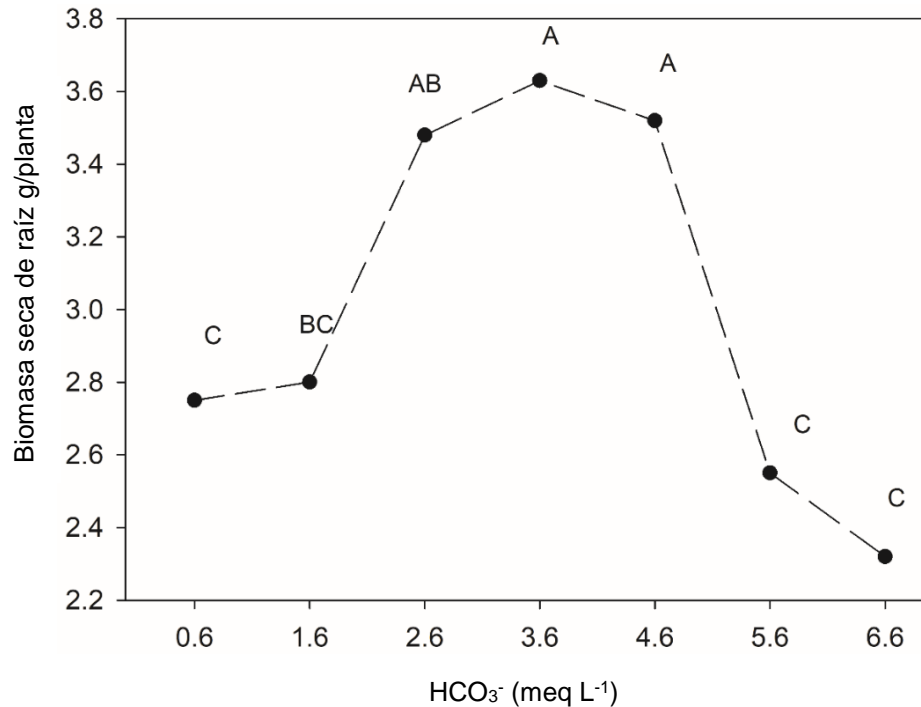


Figura 3. Efecto de interacción HCO_3^- en la concentración de los nutrientes de la raíz (P, Ca, Mg, K, Cu, Fe, Mn, Zn).

En general el P se incrementó con el aumento de la concentración de HCO_3^- en las soluciones, alcanzando el máximo contenido de este nutriente con 1.66 meq L^{-1} de HCO_3^- , sin embargo, con 6.66 meq L^{-1} de HCO_3^- se redujo el contenido de P en la planta, comparando con las de más concentraciones aplicadas en las plantas (figura 4).

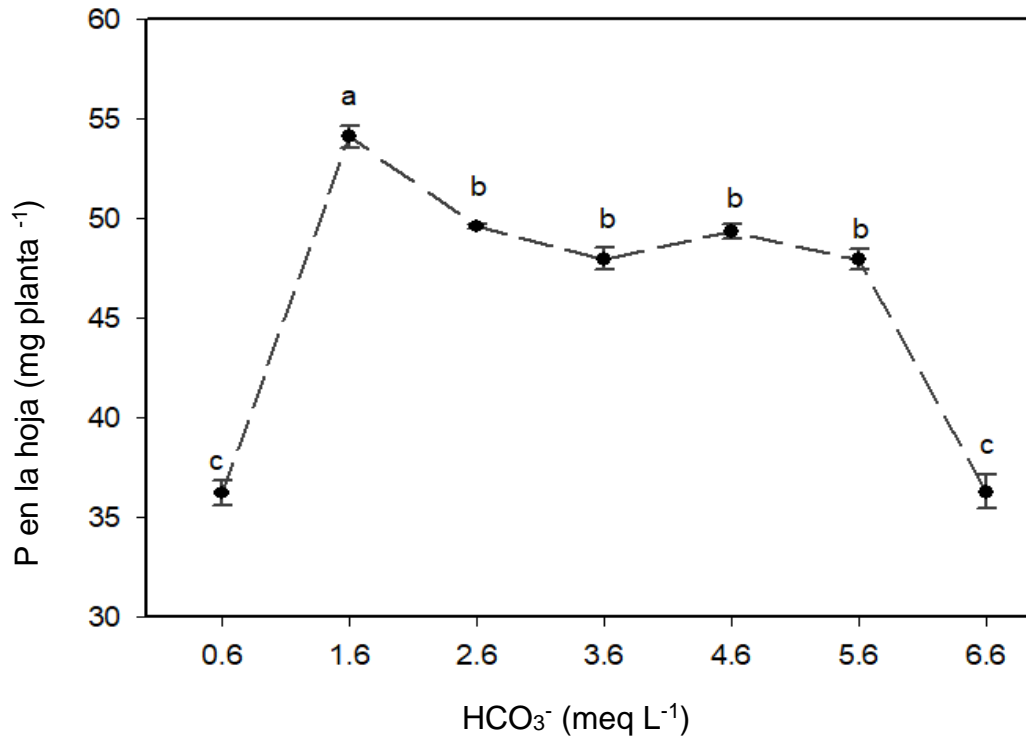


Figura 4. El contenido de P en los tejidos de las plantas de lechuga fue afectado significativamente por la concentración de HCO₃⁻ en la solución nutritiva.

El contenido de calcio en el tejido de lechugas aumento significativamente conforme se concentró más cantidad de HCO₃⁻ en planta lo cual el punto pico de este aumento fue en 5.66 meq L⁻¹ de HCO₃⁻ ya que en 6.66 meq L⁻¹ de HCO₃⁻ baja el contenido de macronutriente en la planta (figura 5).

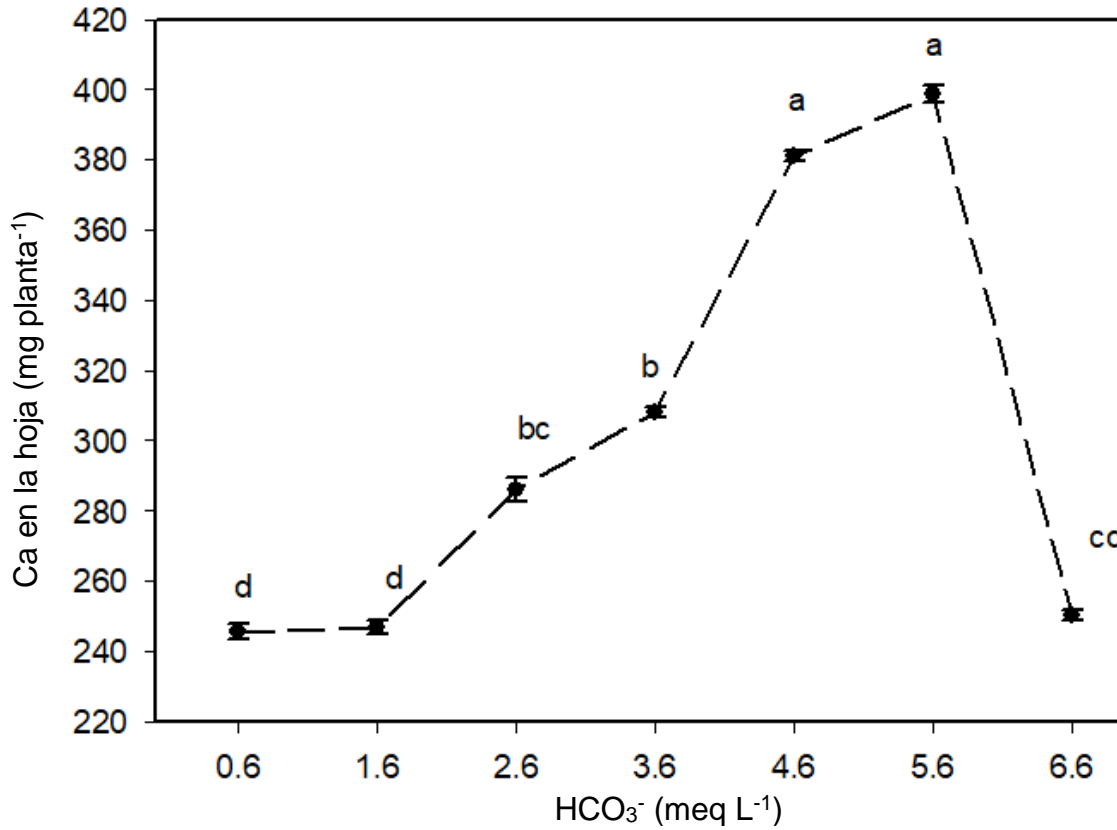


Figura 5. Efecto del HCO₃⁻ sobre el Ca en la hoja.

Al aumentar la concentración de HCO₃⁻ a 0.66 - 4.66 meq L⁻¹, el contenido de Fe en el tejido de la planta aumentó considerablemente, pero al tener una concentración de 5.66 a 6.66 meq L⁻¹ HCO₃⁻ el contenido de Fe tiende a disminuir notablemente (figura 6).

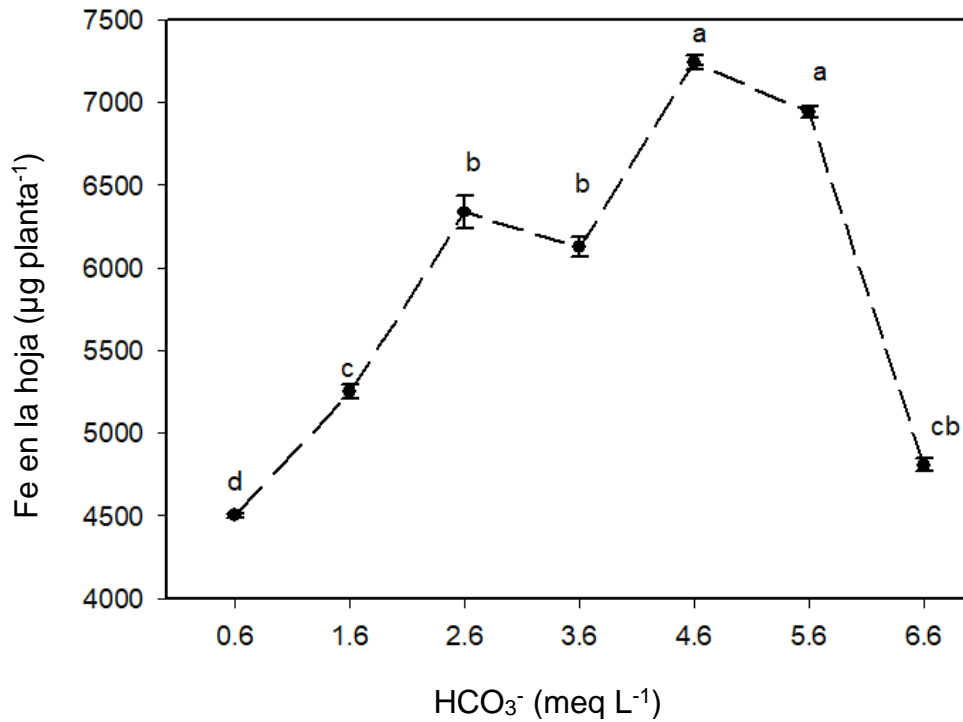


Figura 6. El efecto de la interacción de HCO₃⁻ en Fe.

Al aumentar la concentración de HCO₃⁻ de 2.6 a 4.6 meq L⁻¹ la interacción en la cantidad de Zn alcanza su máxima cantidad en las plantas, pero al llegar de 5.6 meq L⁻¹ tiende a bajar (figura 7).

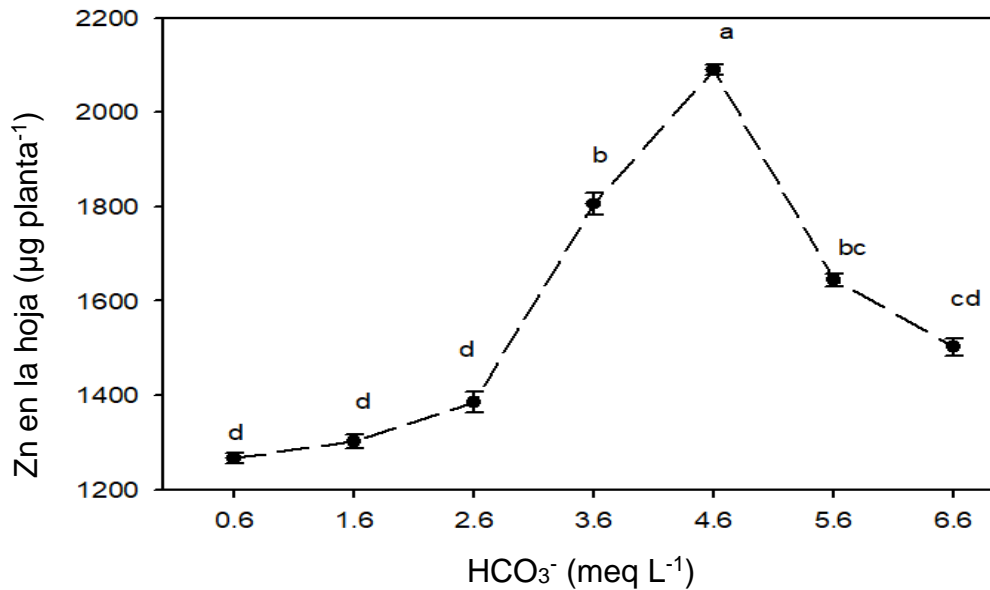


Figura 7. El efecto de la concentración de HCO₃⁻ sobre el contenido de Zn en la hoja.

VI. DISCUSIÓN

Cartmill *et al.*, (2007), quienes al estudiar la respuesta de la concentración de nutrientes en hojas de *rosa multiflora* a diferentes niveles de alcalinidad (0, 2.5, 5 y 10 mmol de HCO_3^-) en la solución nutritiva, observaron que, en general, la concentración de N, P, Ca, Fe, Cu y B se redujo significativamente al aumentar la concentración de HCO_3^- ; mientras que, la concentración de K, Na, Mn, Mg, S, Zn y Al no se vieron afectados o no tuvieron una respuesta constante; por el contrario, los niveles de Mo aumentaron con concentraciones más altas de HCO_3^- . En este trabajo se observó que la concentración de nutrientes presentó un máximo cuando se dejó concentraciones de HCO_3^- entre 4.6 y 5.6 meq.

El aumento en la concentración de HCO_3^- en la SN para irrigar las plantas de lechugas tuvo un efecto de crecimiento variados por efecto de la disponibilidad y por la movilidad de cada nutrimento, aunque la lechuga se ha demostrado ser tolerante a la salinidad, el análisis de nutrientes muestra diferentes concentraciones de cada órgano (hojas y raíz), en 4.6 meq L^{-1} de HCO_3^- se concentró la mayoría de micronutrientes (Mg, Zn y Mn). En el contenido de fósforo en la planta tiende a aumentar cuando la concentración de HCO_3^- es de 1.6 meq L^{-1} el Cu de 3.6 meq L^{-1} y a 5.6 meq L^{-1} Ca, K y Fe. Se muestra que con 5 mol HCO_3^- el contenido de Mg en tallos fue de 1.39 %, valor mayor ($P \leq 0.05$) que el obtenido con esta misma relación y 0 mol HCO_3^- (0.84 %). Por lo tanto, un aumento en la concentración de Mg en hojas y tallos sugiere que hay un sinergismo del bicarbonato con el magnesio. (Roosta y Schjoerring, 2008). La concentración de nutrientes en raíz demostró diferencia en 3.6 meq HCO_3^- se concentran la mayoría de nutrientes como: P, Ca, Mg, Zn, Mn, Cu, y el K, Fe fue de 4.6 meq de HCO_3^- . En plantas la adición de HCO_3^- a soluciones nutritivas ha incrementado la absorción de nitratos al suministrar esqueletos carbonados para los iones amonio generados en la reducción de nitratos (Gao, 1997). En la biomasa total de la planta expresado por Mg/planta en 1.6 me de HCO_3^- el P se concentra la mayor parte, un pH alcalino la disponibilidad del fósforo está limitada por la formación de fosfatos de calcio, lo cual no es aprovechable para las plantas y en pH bajo la alta solubilidad de aluminio y del hierro precipitan el fósforo, (Molina, 2002). La asimilación de fósforo en el tejido en este experimento

muestra resultado similar con (Parra-Terraza et al. 2012) quienes señalan que la adición de 5 meq L⁻¹ de HCO₃⁻ a la solución nutritiva redujo la concentración de fósforo en hojas y tallos de plantas jóvenes, y en tallos y frutos de plantas adultas. Por lo tanto, el K y Ca fue mayor su concentración en 5.6 meq de HCO₃⁻ debido a que el potasio es un elemento muy móvil y el calcio en la planta se moviliza por la xilema, por lo tanto, su deficiencia puede ser inducida por condiciones climáticas que no favorecen la corriente transpiratoria en la planta. Mg, Fe, Zn, Mn, se comportan similares y se ven favorecidos por 4.6 meq HCO₃⁻. Al igual que el cobre que se concentró en 3.6 meq de HCO₃⁻.

VII. CONCLUSIÓN

Las diferentes concentraciones de carbonatos HCO₃⁻ dentro de la SN que fueron irrigadas las plantas se comprueban los diferentes efectos de los nutrimentos del cultivo de lechuga orejona variedad lulú, tuvo un gran impacto sobre cada dosis influyendo de manera atípico dependiendo de cada nutrimento, en la producción de biomasa y cada órgano de la planta que fueron determinados, son: tejido y raíz. En la raíz de 3.6 meq de HCO₃⁻ se obtuvo la mayor concentración de minerales en P, Ca, Mg, Zn, Mn y Cu. En la concentración nutriente en los tejidos de las lechugas, con 4.6 meq de HCO₃⁻ favoreció los siguientes nutrimentos: Mn, Cu, K, Zn, Fe. El Mg y Ca alcanzo su máxima concentración en 5.6 meq de HCO₃⁻ y el P en 1.6 meq de HCO₃⁻. Por lo tanto, de esta investigación muestra que depende del órgano es diferente la asimilación de los nutrientes, aunque es claro que influyen varios factores como por ejemplo la movilidad de nutrientes.

VIII. REVISIÓN CITADA

Gelber R. P., Yina Jazbleidi P. P., Juan Carlos M. F. 2017. pH relationship and nutrient availability for cacao in an Entisol from the Colombian Amazon

Castellón Gómez, Juan José; Bernal Muñoz, Roberto; Hernández Rodríguez, María de Lourdes 2015. Calidad del agua para riego en la agricultura protegida en Tlaxcala Ingeniería, vol. 19, núm. 1, pp. 39-50.

Saúl, p. t., Práxedes I.m., Manuel, v. r. y Sergio, h. v.2012. Crecimiento de plantas y rendimiento de tomate en diversas relaciones nitrato/amonio y concentraciones de bicarbonato.

D. Granados Sánchez; G. F. López Ríos; M. Á. Hernández García 2010. La lluvia acida y los ecosistemas forestales

Esteban F. C., Pablo. P.R., Adalberto B. M. 2016. Manual para la preparación de soluciones nutritivas

J. Espinoza, E Molina, (1999) acidez y encalado de los suelos primera edición

INTAGRI. 2017, suelos, la capacidad de intercambio catiónico del suelo

Ibáñez. 2007, el complejo de cambio o complejo adsorbente de los suelos

Burgueño. 2008, Fertilización de lechuga

Lucina G. P.2013. Respuesta a la alcalinidad en agua de riego con aplicaciones suplementarias de calcio en lisianthus

Jorge Aimir R. E.2006. El uso de los ácidos en la fertirrigacion

Inés Monte Pérez 2016. Agua, pH y equilibrio químico: entendimiento el efecto de dióxido de carbono en la acidificación.

Lee J. A.1969. A comparative study of bicarbonate inhibition of root growth in calcicole and calcifuge grasses.

Day AD, Ludeke KL (1993) Alcalinidad del suelo. En: Nutrientes vegetales en ambientes desérticos. Adaptaciones de organismos del desierto. Springer, Berlín, Heidelberg.

Jiménez. 2017, necesidades nutricionales y riego de la lechuga. [Archivo PDF] disponible en: <file:///C:/Users/Administrador.DESKTOP-BMBLVB3/Downloads/9945-Texto%20del%20art%C3%ADculo-11489-1-10-20170329.pdf>

SAAVEDRA DEL R. manual de producción de lechugas. [Archivo PDF] disponible en: <http://www.inia.cl/wpcontent/uploads/ManualesdeProduccion/09%20Manual%20Lechuga.pdf> (2017)

HORTOINFO, <http://www.hortoinfo.es/index.php/5370-prod-mund-lech-060317>

SAGARPA Guanajuato, 2011 fertirrigacion en el cultivo de lechuga. [Archivo PDF] Disponible en: <file:///C:/Users/Administrador.DESKTOP-BMBLVB3/Downloads/Lechuga.pdf>

UAAAN, por Favela, Preciado y Benavides 2006 manual para la preparación de soluciones nutritivas. [Archivo PFD] file:///C:/Users/Administrador.DESKTOPBMBLVB3/Downloads/Manual_Soln_Nutritivas.pdf

ZARATE, primera edición 2004 manual de hidroponía. [Archivo PDF] disponible en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/232367/Manual_de_hidroponia.pdf

SANTOS, Ríos, 2016 cálculo de soluciones nutritivas en suelo y sin suelo. [Archivo PDF] disponible en: http://www.agrocabildo.org/publica/Publicaciones/otro_622_soluciones_nutritivas.pdf

FAO 2013. El manejo del suelo en la producción de hortalizas con buenas prácticas agrícolas. [Archivo PDF] disponible en: <http://www.fao.org/3/a-i3361s.pdf>

CYTED 2004, ferti-riego: tecnologías y programación en agroplasticultura. [Archivo PDF] disponible en: <http://repositorio.ual.es/bitstream/handle/10835/3129/FERTIRRIEGO2004.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

NUTRITERRA 2007. Control de la alcalinidad de aguas de riego. [Archivo PDF] disponible en: http://www.nutriterra.com/doc/control_alcalinidad.pdf

APLICACIÓN DE SUSTANCIAS HÚMICAS COMERCIALES COMO PRODUCTOS DE ACCIÓN BIOESTIMULANTES, EFECTOS FRENTE AL ESTRÉS SALINO. [Archivo PDF] disponible en: https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/10018/4/Ramos-Ruiz-Roberto_3.pdf

Purdue extensión, producción comercial de cultivos bajo invernadero y viveros. [Archivo PDF] disponible en: <https://www.extension.purdue.edu/extmedia/HO/HO-242-SW.pdf>

Fertilab. Manejo de suelos salinos. [Archivo PDF] disponible en: https://www.fertilab.com.mx/Sitio/notas/el_manejo_de_suelos_alcalinos.pdf

SAGARPA 2016. Calculo de soluciones nutritivas en suelo y sin suelo. [Archivo PDF] disponible en: http://www.agrocabildo.org/publica/Publicaciones/otro_622_soluciones_nutritivas.pdf

Snoeyink, Jenkins, Chemistry y Sons 1980. Alcalinidad [PDF] disponible en: https://www.whitman.edu/chemistry/edusolns_software/Alcalinidad.pdf