

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
INSTITUTO DE CIENCIAS AGRÍCOLAS



**RENDIMIENTO DE LECHUGA (*LACTUCA SATIVA* L.) BAJO DIFERENTES
LÁMINAS DE RIEGO Y DOSIS DE NITRÓGENO EN EL VALLE IMPERIAL,
CALIFORNIA**

TESIS
**QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS EN AGROBIOTECNOLOGÍA EN ZONAS ÁRIDAS**

PRESENTA

ING. JUAN BUENROSTRO CURIEL

DIRECTOR

DR. ROBERTO SOTO ORTÍZ

EJIDO NUEVO LEÓN, MEXICALI, BAJA CALIFORNIA

JUNIO DE 2025

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

INSTITUTO DE CIENCIAS AGRÍCOLAS



**RENDIMIENTO DE LECHUGA (*LACTUCA SATIVA* L.) BAJO DIFERENTES
LÁMINAS DE RIEGO Y DOSIS DE NITRÓGENO EN EL VALLE IMPERIAL,
CALIFORNIA**

TESIS

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN AGROBIOTECNOLOGÍA EN ZONAS ÁRIDAS

PRESENTA

JUAN BUENROSTRO CURIEL

DIRECTOR

DR. ROBERTO SOTO ORTÍZ


MEXICALI, BAJA CALIFORNIA

JUNIO 2025

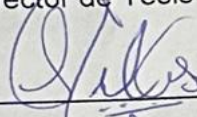
La presente tesis “(RENDIMIENTO DE LECHUGA (*LACTUCA SATIVA* L.) BAJO DIFERENTES LÁMINAS DE RIEGO Y DOSIS DE NITRÓGENO EN EL VALLE IMPERIAL, CALIFORNIA)” realizada por el C. Juan Buenrostro Curiel, dirigido por el Dr. Roberto Soto Ortiz, ha sido evaluada y aprobada por el Comité Particular abajo indicado, como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN AGROBIOTECNOLOGÍA EN ZONAS
ÁRIDAS

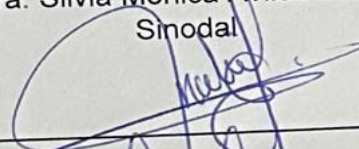
COMITÉ PARTICULAR




Dr. Roberto Soto Ortiz
Director de Tesis



Dra. Silvia Mónica Avilés Marín
Sinodal



Dra. María Isabel Escobosa García
Sinodal



Dr. Juan Gabriel Brígido Morales
Sinodal

AGRADECIMIENTO

Agradezco a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) quien a través del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnología (CONAHCYT) resulté beneficiado del estímulo económico para poder realizar y financiar mis estudios de posgrado.

A mi director de Tesis el Dr. Roberto Soto por su acompañamiento y su asesoría en mi proceso de aprendizaje y desarrollo dentro de este programa de posgrado, gracias por el tiempo que nos ha convertido en amigos.

Al Dr. Aliasghar Montazar, por su constante aliento durante el desarrollo experimental de este trabajo de investigación y por compartir conmigo la metodología de la mejora continua en la producción agrícola de la región.

A mi esposa por su tiempo y acompañamiento, por darme a mi primera hija y por construir esta bella familia a mi lado.

A mis compañeros de generación en este programa educativo Anabel, Naomi y a mi amigo estudiante de doctorado Ángel, por apoyarme en mis interrogantes y dedicar su tiempo para colaborar conmigo.

Sobre todo, agradezco a Dios por esta maravillosa oportunidad que me brinda para avanzar en mi superación profesional y personal.

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a mi padre Juan Manuel Buenrostro Medina y a mi madre Martha Patricia Curiel Tovar, quienes me han enseñado que jamás debo rendirme y a luchar por mis metas, a ser una persona responsable, comprometida y ávida de conocimiento; y sobre todo a compartir con los demás los frutos de mi esfuerzo y dedicación.

A mi esposa, Alondra Nataly Lugo Cázares, quien me acompaña día a día en el camino de la vida y con quien recientemente inicié mi familia, por el apoyo y paciencia incondicional y quien me dio a mi primera hija Joanie Buenrostro, quien llegó a mi vida como premio al término de mi obtención del grado de estudios de maestría.

RESUMEN

Entre la producción agroalimentaria, la lechuga es una de las hortalizas de mayor consumo a nivel mundial. China encabeza la producción global de este cultivo con 11 M toneladas de producción, seguido por Estados Unidos de América, cuya producción asciende a 4 M de toneladas por año, concentrándose el 90% de ésta en la región suroeste, particularmente en los estados de California y Arizona.

Diversas investigaciones señalan que la aplicación de fertilizantes nitrogenados en un rango de 363 a 470 kg·ha⁻¹ permite alcanzar los máximos rendimientos en los cultivos de lechuga de tipo hoja suelta e “iceberg”. No obstante, el cultivo únicamente absorbe aproximadamente el 40% del nitrógeno suministrado, mientras que el porcentaje restante se pierde, principalmente, por lixiviación. A esta problemática se suma la aplicación de excesivas láminas de riego, cuyos volúmenes varían según las condiciones climáticas; un ejemplo de ello es la aplicación 0.45 m·ha⁻¹ en países como Colombia, 0.80 m en el estado de Guanajuato y hasta 1 m·ha⁻¹ en el estado de California. La interacción de ambos factores favorece la contaminación de acuíferos y aumenta los costos de producción.

La presente investigación es resultado del trabajo en colaboración con el Dr. Aliasghar Montazar y fue desarrollado en las instalaciones del Centro de Investigación y Extensión del Desierto de la Universidad de California, con el objetivo de evaluar el efecto de dos láminas de riego (62 y 75 cm ha⁻¹) y tres niveles de fertilización nitrogenada (94,137.2 kg y 165.55 kg ha⁻¹ de UAN-32) sobre el rendimiento de la producción de lechuga, empleando un diseño experimental de parcelas divididas, organizado en bloques completos al azar con cuatro repeticiones. Las variables consideradas incluyeron el índice NDVI, contenido de clorofila, conductancia estomática, concentración de nitratos en savia, rendimiento y peso seco de la biomasa de lechuga.

Como producto académico de esta investigación se publicó el artículo científico: Buenrostro-Curiel, J., Montazar, A., Avilés-Marín, S. M., Escobosa-García, M. I., Brígido-Morales, J. G., & Soto-Ortiz, R. (2025). Rendimiento de Lechuga (*Lactuca sativa* L.) Bajo

Diferentes Láminas de Riego y Dosis de Nitrógeno en el Valle Imperial, California. *REVISTA TERRA LATINOAMERICANA*, 43. doi:<https://doi.org/10.28940/terra.v43i.2056> disponible en el apartado de anexos de esta tesis. En él se describen los resultados obtenidos indicando que no se observaron diferencias estadísticas significativas en el rendimiento asociadas a las distintas láminas de riego y dosis de fertilización nitrogenada. Por lo tanto, se plantea la viabilidad de modificar el paquete tecnológico actual del cultivo, sugiriendo la aplicación de la lámina de riego más baja ($0.62 \text{ m}\cdot\text{ha}^{-1}$) y una menor dosis de fertilización nitrogenada ($94 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$).

Palabras clave: *Estrés hídrico, fertilización nitrogenada, uso eficiente del nitrógeno.*

SUMMARY

Among agri-foods crops, lettuce is one of the most widely consumed vegetables worldwide. China leads global production of this crop with 11 M tons, followed by the United States of America, which produces 3.3 million tons per year, with 90% of this production concentrated in the southwestern region, particularly in the states of California and Arizona.

Various studies indicate that the application of nitrogen fertilizers within a range of 363 to 470 kg·ha⁻¹ allows for maximum yields in loose-leaf and iceberg lettuce crops. However, the crop absorbs only approximately 40% of the supplied nitrogen, while the remaining portion is primarily lost through leaching. This issue is further compounded by the excessive use of irrigation water, with application volumes varying according to climatic conditions, ranging from 0.45 m·ha⁻¹ in countries such as Colombia, in Guanajuato state in México up to 1 m·ha⁻¹, in the state of California. The combination of these two factors contributes to groundwater contamination and increases production costs.

This research is the result of a collaborative effort within Dr. Aliasghar Montazar's research program and was conducted at the Desert Research and Extension Center of the University of California. The study aimed to evaluate, in terms of yield, the effect of two irrigation levels (62 y 75 cm⁻¹) ha and three nitrogen fertilization rates using a split-plot experimental design, arranged in a randomized complete block design with four replications. The variables analyzed included the NDVI index, chlorophyll content, stomatal conductance, nitrate concentration in sap, yield, and dry biomass weight of lettuce.

As an academic outcome of this research, the following scientific article was published: Buenrostro-Curiel, J., Montazar, A., Avilés-Marín, S. M., Escobosa-García, M. I., Brígido-Morales, J. G., & Soto-Ortiz, R. (2025). Lettuce Yield (*Lactuca sativa* L.) Under Different Irrigation Regimes and Nitrogen Dose in the Imperial Valley, California. *Journal TERRA LATINOAMERICANA*, 43. doi: <https://doi.org/10.28940/terra.v43i.2056> Available in the annex section of this thesis, it describes the results obtained, indicating there were no

statistically significant differences in yield associated with the different irrigation levels and nitrogen fertilization rates. Therefore, it is feasible to propose modifications to the current technological package for this crop, suggesting the application of the lowest irrigation level ($0.62 \text{ m}\cdot\text{ha}^{-1}$) and a reduced nitrogen fertilization rate ($94 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$).

Key words: *Water stress, nitrogen fertilization, nitrogen use efficiency.*

ÍNDICE DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. REVISIÓN DE LITERATURA.....	5
2.1 Aspectos generales de la lechuga (<i>Lactuca sativa L.</i>).....	5
2.2 Taxonomía y descripción morfológica.....	6
2.3 Clasificación y tipos de morfología de <i>Lactuca sativa L.</i>	7
2.4 Aspectos nutricionales de la lechuga	8
2.5 Análisis del mercado mundial.....	9
2.6 Manejo del cultivo en California.....	10
2.7 Suelo	10
2.8 Requerimientos climatológicos	10
2.9 Técnica de siembra	11
2.10 Fertilización y Riego	11
3. HIPÓTESIS	12
4. OBJETIVO	13
5. ARTÍCULO PUBLICADO.....	14
6. CONCLUSIÓN	37
7. BIBLIOGRAFÍA.....	38

1. INTRODUCCIÓN

La lechuga (*Lactuca sativa* L.) es una de las hortalizas más reconocidas y consumidas diariamente en muchos hogares. Su cultivo se remonta a más de seis mil años atrás y su producción se centra en regiones de clima templado. En los Estados Unidos, la producción de lechuga se mantiene a lo largo de todo el año, situándose como el segundo mayor productor mundial (FAO, 2024). Más del 90% de esta producción se concentra en los estados de California y Arizona, con las variedades iceberg y romana como las más cultivadas (Pink & Keane, 1993a). Entre los principales estados productores, California ocupa la primera posición a nivel nacional, concentrando su producción entre los meses de abril y octubre, principalmente en el Valle de Salinas. En segundo lugar, se encuentra Arizona, cuya producción se lleva a cabo de noviembre a marzo en los valles bajos del Río Colorado y en Yuma, Arizona (Kerns et al., 1999).

El cultivo de lechuga tipo iceberg o head lettuce abarca aproximadamente 625,000 hectáreas en California, generando ingresos brutos cercanos a los 728 millones de dólares anuales (USDA, 2023). En esta región, el sistema de riego predominante es el riego por surcos, aunque en los últimos años algunos productores han optado por la implementación del riego por goteo debido a la creciente escasez de agua (Shatilov et al., 2019).

En cuanto a la fertilización nitrogenada, algunas investigaciones señalan que el mayor rendimiento en lechugas de hojas sueltas se alcanza con la aplicación de $411.63 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de nitrógeno, mientras que en la variedad iceberg el rendimiento óptimo se ha registrado

con una dosis de $533 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ (Resende et al., 2010; Thompson & Doerge, 1996). No obstante, la investigación de Aquino et al., (2007) indicó que con una dosis de $370 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de nitrógeno, la planta solo absorbe el 40% ($145 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), quedando el 60% restante en el suelo, lo que incrementa el riesgo de lixiviación. Este fenómeno representa una de las principales fuentes de contaminación de ríos y acuíferos cercanos a las zonas agrícolas, como es el caso del Golfo de California (Antonio Ferreira Gomes & Barizon, 2014; Páez-Osuna, Bergés-Tiznado, et al., 2019).

Además del impacto ambiental derivado de la lixiviación, las altas tasas de fertilización nitrogenada generan pérdidas económicas significativas. Este problema se ha acentuado debido a la aplicación excesiva de agua de riego, fertilizantes y la disposición superficial del sistema radicular del cultivo (Jackson & Stivers, 1993). Una estrategia clave para reducir la lixiviación de nitrógeno es el desarrollo de paquetes tecnológicos adaptados a cada variedad de lechuga, junto con estudios de optimización de dosis de fertilización y láminas de riego en función de los sistemas de irrigación empleados en cada región agrícola.

El uso excesivo de nitrógeno no solo afecta el medio ambiente, sino que también puede representar un riesgo para la salud humana, dado que los consumidores finales están expuestos a la acumulación de nitratos en los vegetales (Santamaria, 2006). Factores como la dosis, la fuente y la distribución del fertilizante en relación con el crecimiento del cultivo influyen en la concentración de NO_3^- en los vegetales. Asimismo, la disponibilidad de molibdeno, la humedad del suelo y la luminosidad impactan significativamente en la

acumulación de este anión (Kovács et al., 2015). En este contexto, la Comisión Europea establece como criterio de calidad un contenido de nitratos inferior a $4.5 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ en hortalizas, mientras que la Organización Mundial de la Salud recomienda una ingesta diaria de nitratos que no supere los 3.65 mg por kg de peso corporal para evitar riesgos a la salud (Santamaria et al., 1999).

En la región de California, se ha estimado que la absorción de nitrógeno en la lechuga iceberg es de $170 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ y de $136 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ en la lechuga romana (Breschini & Hartz, 2002). Diversos estudios sugieren que el problema de la fertilización nitrogenada radica en una mayor capacidad de absorción del cultivo con respecto a su capacidad de asimilación. Este proceso está condicionado por factores biológicos, ambientales y agronómicos. Asimismo, en condiciones de baja intensidad lumínica, la actividad de la enzima nitrato reductasa se reduce, lo que provoca una acumulación de nitratos en la planta (El-Ghany et al., 2022).

En la formulación de paquetes tecnológicos para la producción de lechuga, se han determinado los volúmenes de agua necesarios para optimizar el rendimiento del cultivo. Los primeros estudios en este ámbito fueron realizados por Gutiérrez, (1978), quien estableció una lámina de riego de $45 \text{ cm}\cdot\text{ha}^{-1}$ mediante riego por goteo, alcanzando un rendimiento de $56 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$. Posteriormente, Erazo et al., (1993), reportaron rendimientos de 18.43, 19.05 y $36.06 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ en las variedades blanca lisa, Batavia y banca de Boston, respectivamente; en zonas agrícolas nacionales, el estado que lidera la producción de lechuga es Guanajuato, región en donde la lámina de riego oscila entre los 60 y 80 cm

ha⁻¹ (Díaz Espino et al., 2011), valores similares a los utilizados en la investigación realizada por Smith et al., (2011), quienes evaluaron láminas de riego de hasta 91.4 cm·ha⁻¹ y obtuvieron un rendimiento de 28.75 t·ha⁻¹. Sin embargo, debido al cambio climático y a la creciente preocupación por la disponibilidad de recursos hídricos, es prioritario actualizar los paquetes tecnológicos de producción para adecuarlos a las condiciones climáticas actuales y desarrollar estrategias que optimicen el uso del riego por goteo en las distintas etapas fenológicas del cultivo.

Las prácticas de manejo agronómico desempeñan un papel fundamental en la reducción de pérdidas de agua y fertilizantes nitrogenados, lo que contribuye a mejorar el rendimiento y la calidad de la lechuga, además de minimizar la lixiviación de nitratos. Para ello, es esencial ajustar la aplicación de fertilizantes y las láminas de riego en función de los requerimientos nutricionales del cultivo a lo largo de su ciclo de crecimiento (Hartz et al., 2007).

En este contexto, el presente estudio tiene como objetivo evaluar el efecto de diferentes láminas de riego y niveles de fertilización nitrogenada sobre el rendimiento del cultivo de lechuga.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Aspectos generales de la lechuga (*Lactuca sativa L.*)

La lechuga (*Lactuca sativa L.*) es una hortaliza de hoja que crece en climas templados, con sólo un 5% de polinización cruzada entre variedades, este cultivo se ubica en la clasificación del género *Lactuca* de la familia *Asteraceae* y fisiológicamente cuenta con un sistema de raíz fibroso, lateral profundo, con una gran densidad cerca de la capa superficial de los suelos que le sirve para la obtención de agua y nutrientes, sus hojas tienen un arreglo en forma de roseta y pueden ser lisas o de textura arrugada, su coloración puede ser amarillenta – verdosa hasta con pequeños esbozos de oscurecimiento o púrpura lo que indica la presencia de antocianinas, su tallo es corto y su elongación es el proceso que indica el final de su fase vegetativa y el inicio de la fase reproductiva, esta última fase se compone de múltiples hojas que se denominan “capitula” de las cuales cada uno produce un gran número de flores (12 a 20), por lo que cuenta con una gran diversidad de morfología según la variedad (Hassan et al., 2021). Evidencia en las tumbas egipcias indican que se ha cultivado desde hace más de seis mil años y se ha esparcido por todo el mundo iniciando por la región del Mediterráneo hasta llegar a América alrededor del año 1494 de nuestra era (Pink & Keane, 1993).

La lechuga es uno de los cultivos agrícolas, de mayor consumo y del cual se posee más conocimiento en el mundo, en la década de los 90’s los mayores consumidores y productores fueron los Estados Unidos de América, país que en 1993, cultivaba alrededor de 91 000 ha y que debido a su creciente demanda, esta cifra actualmente asciende a 110 mil ha cultivadas con un rendimiento de 34.2 t ha⁻¹ (Pink & Keane, 1993; Shatilov et al., 2019); actualmente a nivel mundial, Estados Unidos ocupa la segunda posición en la producción de este cultivo, sólo precedido por China (FAOSTAT, 2024) y concentra más del 50% de su producción en el estado de California, en la zonas desérticas; además su producción también se concentra cerca de las fronteras de México y California, en las ciudades de Mexicali y Calexico, respectivamente, en estas zonas, el cultivo de lechuga

se produce principalmente a cielo abierto de manera estacional, es decir, que existe una rotación de cultivos en los suelos donde se produce (Pink & Keane, 1993).

Actualmente, este cultivo tiene diferentes aplicaciones comerciales: el consumo alimentario, la producción de cigarrillos libre de nicotina, extracción de aceite comestible (semillas) por su efecto sedante encontrado en sus tallos y otros tejidos (DuPont et al., 2000).

Los paquetes tecnológicos para este cultivo son variados y adaptados a cada región particular, pues este cultivo puede llevarse a cabo en temporal y por irrigación; constantemente se trabaja el mejoramiento genético de este cultivo para obtener variedades con adaptaciones a condiciones climáticas, con ciclos cortos y con mejores valores de producción y calidad, así como resistencia a estrés biótico y abiótico (Hassan et al., 2021).

2.2 Taxonomía y descripción morfológica

El nombre común del cultivo *Lactuca spp* es “lechuga”, el cual se deriva del latín “*lactus*” que significa leche, haciendo referencia a la savia lechosa de la planta (Lebeda et al., 2004), los distintos tipos de lechuga se clasifican en el género *Lactuca L.* perteneciente a la familia de las Asteraceae (Compositae), siendo la familia de las plantas dicotiledóneas más grande, clasificada en la tribu Lactuceae de la subfamilia Cichorioideae, siendo la subfamilia más estudiada (Křístková et al., 2008) con más de 150 especies distribuidas en climas cálidos y templados, comúnmente en el hemisferio norte del planeta (Feráková, 1977; Meena et al., 1983). La mayoría de las especies de lechuga son xerófitas, ecológicamente presentan amplia diversidad y se pueden adaptar a diferentes ambientes; en ese sentido, las variedades europeas se pueden encontrar comúnmente como malezas, y son comercializadas, mientras que en el mercado americano *Lactuca sativa L.* ha sido adaptada para soportar condiciones de sequía y es la variedad más consumida conocida como “lechuga para ensalada” (Ali et al., 2016; Feráková, 1977; Lebeda et al., 2004; Meena et al., 1983).

Lactuca sativa es una hierba anual, glabra y de raíces primarias delgadas, su tallo es erecto y alcanza entre los 30 a 100 cm de altura con ramificaciones en la parte superior. Sus hojas forman un arreglo espiral lo que da su forma de “roseta” o “cabeza” antes de su floración, su forma es oblonga elíptica transversal, orbicular a triangular, indivisa a pinnatisecta; su margen es entero a dentado y frecuentemente rizado. Las hojas del tallo son oblongas- elípticas con una base acorazonada. La inflorescencia está compuesta de siete a 15 lígulas amarillas, las cabezuelas forman una panícula densamente bráctea. Las antocianinas pueden estar distribuidas en los cotiledones y hojas verdaderas, tallos y lígulas, son de color verde claro, de hojas anchas a estrechas lanceoladas, márgenes blancos y erectas en la etapa de madurez del fruto. El fruto tiene en promedio de cinco a siete costillas en cada lado, con una longitud promedio de 7 mm con un color blanco, gris, crema, negro o marrón. Es un diploide con un número cromosómico básico de $n = 9$, con un total de 18 cromosomas (Doležalová et al., 2002; Křístková et al., 2008).

2.3 Clasificación y tipos de morfología de *Lactuca sativa* L

Las variedades de *Lactuca sativa* se caracterizan por tener un alto nivel de diversidad genética debido a su origen polifilético y un complejo proceso de domesticación; este cultivo comprende siete grupos principales de cultivares que difieren fenotípicamente, conocidos comúnmente como morfotipos los cuales se describen a continuación (Lebeda et al., 2006):

- 1. Lechuga mantecosa:** Lechuga de cabeza con hojas suaves y tiernas, que se come cruda, popular en Inglaterra, Francia, Países bajos, entre otros países europeos y con la reciente introducción en Estados Unidos en el año 2007 (Mikel, 2007).
- 2. Lechuga iceberg:** Cabeza de lechuga con hojas anchas y crujientes y nervadura foliar flabelada, es consumida en crudo y es principalmente cultivada en Estados Unidos de América y en los países del norte y centro de Europa (Lebeda et al., 2006).
- 3. Lechuga romana:** Plantas con cogollos altos y sueltos, en ocasiones atados, de hojas rígidas oblongas con una prominente nervadura central que corre casi hasta el ápice y se

come tanto en crudo como cocida, su nombre proviene de la isla griega Kos, donde este tipo ha sido cultivado desde hace mucho tiempo, diversas investigaciones han permitido tener colecciones de genomas en genebank que determinan que se originaron en Egipto, Irán, Turquía y Siria (Basset, 1986; Boukema et al., 1990).

4. Lechuga lollo rosso: Tipo sin espigas, cosechado entero, en rosetas abiertas, ocasionalmente como hojas separadas, consumido crudo, populares en los Estados Unidos de América, Italia, Francia, República Checa y Eslovaquia, este genotipo es heterogéneo, cultivares perteneciente a esta clasificación poseen hojas enteras, rizadas o pueden tener flecos, con márgenes no lobulados e inclusive profundamente inciso, las variedades de este tipo provienen principalmente de Turquía y Grecia (Boukema et al., 1990).

5. Lechuga de tallo: Plantas con tallos hinchados, que se comen crudas o cocidas como los espárragos, las hojas se pueden comer crudas en una etapa muy temprana o cocidas como las espinacas (Křístková et al., 2008).

6. Lechuga latina: Las plantas tienen cabezuelas sueltas con hojas gruesas y coriáceas, de color verde oscuro y se comen crudas. Se cultiva principalmente en los países mediterráneos, incluido el norte de África y en América del Sur (Rodenburg & Basse, 1960).

7. Lechuga oleaginosa: Debido al sabor amargo de sus hojas, esta variedad no se consume como verdura. La lechuga oleaginosa se caracteriza por un alto porcentaje (35%) de aceite en las semillas, que se utiliza para cocinar. El aceite contiene vitamina E, un nutriente esencial (Boukema et al., 1990).

2.4 Aspectos nutricionales de la lechuga

La lechuga es considerada dentro de los alimentos “sanos” debido a sus características: alto contenido de fibra, antioxidantes (antocianinas y clorofilas), vitamina C (en su mayoría en las lechugas jóvenes), vitamina E, polifenoles y carotenoides (Chu et al., 2002; Li et al., 2010; Llorach et al., 2008), estos mismos autores mencionan que aquellas

variedades con coloraciones oscuras son las que concentran mayores niveles de antocianinas, además este cultivo también es rico en minerales como calcio, magnesio, potasio, sodio y hierro, sin embargo; alguno de estos compuestos orgánicos se ven afectados si las hojas de lechuga son cocinadas. Usualmente sus hojas y tallos son ingeridos en crudo, en forma de ensaladas con sal y vinagre.

La presencia de estos compuestos bioactivos ha tenido efectos en la disminución de la inflamación y de los niveles de colesterol, además de efectos positivos para la diabetes, además contienen ácido fólico y es considerada un analgésico, diurético y expectorante (Hassan et al., 2021).

El contenido nutricional varía en función de los distintos tipos de lechuga, que anteriormente se mencionan; en el caso de las variedades de lechuga iceberg, éstas se encuentran muy disminuidas en nutrientes, en comparación a las lechugas de corte (romana, mantecosa, lollo rosso), las cuales tienen hasta 15 veces más la concentración de ácido ascórbico, vitamina K, A, B, C y carotenoides ab (Abdel Bar et al., 2023; Still, 2007).

2.5 Análisis del mercado mundial

La lechuga (*Lactuca sativa L.*) es una de las hortalizas de consumo de hoja de mayor importancia económica en el mundo (Soldatenko et al., 2018). Sin embargo, este cultivo es producido en 106 países; China, Estados Unidos de América y la India, encabezan la lista con mayor producción de este cultivo (Con 51.4, 14 y 3.6% de la superficie cultivada), seguidos de España, Italia, Turquía, Japón, México, Irán y Alemania (Shatilov et al., 2019). En el periodo del año 2015 al 2018, China registró un incremento anual de 1 a 2% y su rendimiento bruto es mayor que el de todos los países juntos, aunque tiene el valor mínimo de venta (0.52 a 0.90 USD / kg) contrastante con Italia, quien cuenta con los productos más caros a un valor de venta de (1.93 a 2.28 USD / kg).

En materia de consumo, la lista de países con mayor importación de este cultivo la encabeza: Canadá, Alemania, Estados Unidos de América, Reino Unido, Francia, Países

bajos, Italia, Polonia, Suecia, Bélgica y Austria, los cuales el menor precio de venta al consumidor lo tiene Italia y el mayor Austria y Bélgica (Shatilov et al., 2019).

2.6 Manejo del cultivo en California

A continuación, se presenta la información relacionada con la producción del cultivo de lechuga, donde se incluyen los apartados de las necesidades de suelo, requerimientos climatológicos, técnica de siembra, fertilización y riego, basado en la publicación de Turini et al. (2011):

La producción del cultivo de lechuga en el estado de California se lleva a cabo principalmente en los siguientes condados: Monterrey, San Benito, Santa Cruz, Santa Clara, San Luis Obispo, Santa Barbara, Ventura, Fresno, Kings, Kern, Imperial y Riverside; en México se realiza en el Valle de Mexicali del estado de Baja California, el cual, también se caracteriza por su producción compartiendo los paquetes tecnológicos. Desde su establecimiento hasta la cosecha, este cultivo toma de 65 a 80 días para las siembras en verano y hasta 130 días en las siembras de otoño – invierno.

2.7 Suelo

El cultivo de lechuga crece mejor en suelos arcillo-limosos, las texturas ligeras de los suelos permiten un drenaje adecuado y un buen crecimiento radicular durante climas fríos, lo que ayuda a incrementar las temperaturas más rápidamente. Además, posee una alta sensibilidad a la salinidad, niveles superiores a 2.5 dS/m pueden disminuir la tasa de germinación, los niveles recomendados para evitar la acumulación de sales en los suelos es utilizar agua de riego con valores de conductividad eléctrica < 1 dS/m.

2.8 Requerimientos climatológicos

Las temperaturas óptimas para su crecimiento durante el día y la noche son de 23 y 7°C, respectivamente, cuando las temperaturas diurnas sobrepasan los 28°C podría producirse un efecto de espigamiento, un sabor amargo de las lechugas y por ende pérdidas en el rendimiento, en caso contrario, los efectos en las plantas cuando se

presentan temperaturas cercanas a la congelación, aunque si bien las plantas jóvenes no se ven perjudicadas, si se ve perjudicada la velocidad de crecimiento.

2.9 Técnica de siembra

En su mayoría, las variedades de lechuga se siembran utilizando semillas recubiertas, se utilizan sembradoras de precisión, sólo unas cuantas variedades se siembran por trasplante. La siembra se realiza en cama con una distancia entre semillas de 4.4 a 7.5 cm de ancho con 5 o 6 líneas de siembra, teniendo un total aproximado de 388,000 semillas por hectárea. Se realiza un raleo a 25 – 30 cm entre planta después de la emergencia es recomendado iniciar el riego por la tarde o noche para que la germinación ocurra en temperaturas más frescas.

2.10 Fertilización y riego

Los suelos arenosos del Valle Imperial y del Valle de Mexicali, suelen tener bajos niveles de fósforo, la recomendación para esto es fertilizar con hasta 280 kg ha⁻¹ de ácido fosfórico (P₂O₅) antes de la siembra, en el caso de nitrógeno se aplican 56 kg ha⁻¹ en pre siembra y aplicaciones laterales después del raleo durante el crecimiento, hasta tener un total de 224 – 280 kg ha⁻¹, evitando la toxicidad por amonio que ocurre cuando la transformación a nitrato es lenta.

La aplicación de riego es por aspersión durante los primeros 5 a 7 días hasta asegurar la emergencia de las plántulas del suelo con un consumo total de 7,400 m³ de agua ha⁻¹, la cual en su mayoría es aplicada los últimos 30 días antes de la cosecha, debe evitarse los excesos de humedad al inicio del ciclo por la posibilidad de generar las condiciones para evitar sólo la producción basal.

De acuerdo a lo anterior, se realizó un experimento en el que se puso a prueba la hipótesis de este proyecto de investigación. A continuación, se presenta el artículo donde se incluye la metodología, resultados y discusión, conclusiones y bibliografía, secciones publicadas por la revista Terra Latinoamericana. En dicho artículo se encuentra la información relacionada con la metodología, resultados y discusión.

3. HIPÓTESIS

Es posible reducir la lámina de riego y la fertilización nitrogenada sin afectar significativamente el rendimiento de lechuga (*Lactuca Sativa L*) bajo las condiciones edafoclimáticas del Valle Imperial, California.







4. OBJETIVO

Evaluar el efecto de la reducción en la lámina de riego y fertilización nitrogenada sobre el rendimiento de lechuga (*Lactuca sativa* L.) en las condiciones edafoclimáticas del Valle Imperial, California.

5. ARTÍCULO PUBLICADO

Rendimiento de Lechuga (*Lactuca sativa* L.) Bajo Diferentes Láminas de Riego y Dosis de Nitrógeno en el Valle Imperial, California

Lettuce Yield (*Lactuca sativa* L.) Under Different Irrigation Regimes and Nitrogen Dose in the Imperial Valley, California

**Juan Buenrostro-Curiel¹, Aliasghar Montazar², Silvia Mónica Avilés-Marín¹
María Isabel Escobosa-García¹, Juan Gabriel Brígido-Morales¹ y Roberto Soto-Ortiz^{1‡}**

¹ Universidad Autónoma de Baja California, Instituto de Ciencias Agrícolas. Carretera delta s/n, Ejido Nuevo León. 21705 Mexicali, Baja California, México; (J.B.C.), (S.M.A.M.), (M.I.E.G.), (J.G.B.M.), (R.S.O.).

‡ Autor para correspondencia: roberto_soto@uabc.edu.mx

² University of California Cooperative Extension Center Imperial County. 1050 East Holton Road. 92250-9615 Holtville, CA, USA; (A.M.).

RESUMEN

La lechuga es una de las hortalizas de mayor consumo en el mundo. China es el país con mayor producción de este cultivo, seguido de Estados Unidos de América el cual produce 3.3 millones de Mg año⁻¹ con el 90% ubicado en el suroeste principalmente en los estados de California y Arizona. Diversos estudios muestran que la dosis de aplicación de 363 a 470 kg ha⁻¹ de fertilizantes nitrogenados permite obtener los mayores rendimientos en el cultivo de lechuga de consumo de hoja suelta y “iceberg”, sin embargo, de esta dosis, el cultivo sólo absorbe el 40% del

nitrógeno, mientras que el resto se pierde por el proceso de lixiviación. Aunado a esta situación el uso indiscriminado de láminas de riego con rangos de aplicación que varían en función del clima desde $0.45 \text{ m}\cdot\text{ha}^{-1}$ en Colombia, hasta $1 \text{ m}\cdot\text{ha}^{-1}$ en el estado de California. Estos dos factores promueven la contaminación de mantos acuíferos e incrementa los costos de producción. El objetivo de este trabajo consistió en evaluar en términos de rendimiento dos distintas láminas de riego y tres niveles de fertilización nitrogenada, bajo un diseño de parcelas divididas distribuidos en bloques completos al azar con cuatro repeticiones. Las variables analizadas fueron el índice NDVI, contenido de clorofila, conductancia estomática, concentración de nitratos en savia, rendimiento y peso seco de biomasa de lechuga. Los resultados muestran que no existen diferencias estadísticas en el rendimiento en función de las diferentes láminas de riego y dosis de fertilización nitrogenada, por lo cual, es posible proponer un cambio en el paquete tecnológico actual de este cultivo, permitiendo aplicar el tratamiento con menor lámina de riego ($0.62 \text{ m}\cdot\text{ha}^{-1}$) y menor fertilización ($94 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$).

Palabras clave: *estrés hídrico, fertilización nitrogenada, uso eficiente del nitrógeno.*

SUMMARY

Lettuce is one of the most widely consumed vegetables globally. China is the leading producer of this crop, followed by the United States, which produces 3.3 million tons per year, with 90% of production concentrated in the south-western region, primarily in the states of California and Arizona. Various studies indicate that nitrogen fertilizer application rates between 363 and $470 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ achieve the highest yields in loose-leaf and 'iceberg' lettuce cultivation. However, of this application rate, only 40% of the nitrogen is absorbed by the crop, while the remainder is lost through leaching processes. This issue is compounded by the indiscriminate use of irrigation rates, which vary according to climatic conditions, ranging from $0.45 \text{ m}\cdot\text{ha}^{-1}$ in

Colombia to 2.0 m ha⁻¹ in California. These two factors contribute to groundwater contamination and increase production costs. The objective of this study was to evaluate, in terms of yield, two different irrigation rates and three nitrogen fertilization levels using a split-plot design arranged in a randomized complete block with four replicates. The variables analyzed included NDVI index, chlorophyll content, stomatal conductance, sap nitrate concentration, yield, and dry biomass weight of lettuce. The results show no statistically significant differences in yield based on the different irrigation rates and nitrogen fertilization levels, suggesting that a change in the current technological package for this crop is feasible, allowing for the application of the treatment with the lowest irrigation rate (0.62 m ha⁻¹) and lower fertilization (94 kg ha⁻¹).

Index words: *water stress, nitrogen fertilization, nitrogen use efficiency.*

INTRODUCCIÓN

La lechuga (*Lactuca sativa* L.) es uno de los vegetales más conocidos y consumidos a diario en numerosos hogares; esta hortaliza se cultiva desde hace más de seis mil años. En la actualidad se cultiva en la mayoría de los países de clima templado, ya que resiste bien a altas temperaturas. La producción de lechuga ocurre durante todo el año en los Estados Unidos siendo el segundo lugar de producción mundial con 3.3 millones de toneladas al año (FAO, 2024), y más del 90 por ciento de su producción de lechuga se encuentra en los estados de California y Arizona, las principales variedades incluyen iceberg y romana (Pink y Keane, 1993). Cuando se habla de los estados productores de lechuga, California se encuentra en el primer lugar a nivel nacional ya que la mayor parte de la producción se lleva a cabo durante los meses de abril a octubre, principalmente en el Valle de Salinas. Por otra parte, el estado de Arizona se ubica en segundo lugar con una producción desarrollada desde el mes de noviembre a marzo en los valles inferiores del Río Colorado en Yuma, Arizona (Kerns et al., 1999).

La lechuga (iceberg) comprende un área de 625 000 hectáreas con ventas brutas de casi \$728 millones de dólares año⁻¹ en el estado de California (USDA, 2023). Donde, el riego por surcos corresponde al principal sistema de riego en la lechuga del desierto, no obstante, existen productores que están adoptando el riego por goteo debido a la baja disponibilidad de agua en los últimos años (Shatilov, Razin e Ivanov, 2019).

Por otra parte, El máximo rendimiento obtenido hasta ahora en el cultivo de lechugas en las que se consumen sus hojas sueltas es resultado la aplicación de 411.63 kg ha⁻¹ de nitrógeno (N), mientras que en el caso de la variedad iceberg el máximo rendimiento registrado hasta ahora se obtiene con la aplicación de 533 kg ha⁻¹ de N (Resende, Alvarenga, Yuri y Souza, 2010). Sin embargo, el cultivo de lechuga solamente extrae el 40% (145 kg ha⁻¹) del N cuando a este se le aplicaron 370 kg ha⁻¹ de N, por lo cual el 60% restante permanece en el suelo y corre el riesgo de perderse por el proceso de lixiviación (Aquino et al., 2007). Lo anterior corresponde a una de las principales causas de contaminación en ríos y acuíferos cercanos a las zonas agrícolas, un ejemplo de esto es la contaminación del golfo de California (Ferreira-Gomes y Barizon, 2014; Páez-Osuna et al., 2019).

Además de los impactos negativos por el proceso de lixiviación, se tienen grandes pérdidas económicas derivadas de la aplicación de altas dosis de fertilizantes nitrogenados y los efectos de este proceso se han intensificado debido a las altas láminas de riego y dosis de fertilización, así como a la conformación superficial del sistema radicular del cultivo (Jackson y Stivers, 1993). Por lo cual, una estrategia para disminuir la pérdida de nitrógeno por el proceso de lixiviación es producir paquetes tecnológicos adecuados para producir cada variedad de lechuga que se desee establecer, así como la elaboración de estudios de investigación sobre las dosis óptimas de aplicación en conjunto con las láminas de riego, con base en los sistemas de riego utilizados en el área agrícola.

Las altas dosis de N no sólo deben considerarse por sus efectos ambientales ocasionados en los suelos o cuerpos de agua, sino también por los efectos en la salud del ser humano, quién es el consumidor último de los cultivos (Santamaria, 2006). La dosis, la fuente y la distribución del fertilizante en función del desarrollo del cultivo, son factores que determinan la concentración de nitratos en vegetales, así también, la luminosidad, la humedad del suelo, y la disponibilidad de molibdeno son otros factores que impactan en la concentración de este anión (Kovács, Puskás, Huzsvai, Lévai y Bodi, 2015). Por lo tanto, la Comisión Europea, recomienda como indicador de calidad, de las hortalizas que su contenido de NO_3 sea menor a 4.5 g kg^{-1} y la Organización Mundial de la Salud, recomienda una ingesta diaria admisible sin riesgo para la salud humana de 3.65 mg de nitratos por kg de peso corporal (Santamaria, Elia, Serio y Todaro, 1999).

En la región de California, se reporta que la absorción de N del cultivo de lechuga es de 170 kg ha^{-1} para la variedad iceberg y 136 kg ha^{-1} para lechuga de variedad romana (Breschini y Hartz, 2002). En consecuencia, diversos investigadores afirman que la problemática de la fertilización con nitrógeno se debe a que la capacidad de absorción de las plantas es superior a la capacidad de asimilación, ya que esta primera es afectada por factores biológicos, ambientales y agronómicos; además, cuando las plantas se encuentran en baja intensidad de luz, se reduce la actividad de la enzima nitrato reductasa, por lo cual, se incrementa la reducción de los nitratos (El-Ghany, El-Kherbawy, Abdel-Aal y Abbas, 2022).

En el desarrollo de paquetes tecnológicos para la producción de lechuga se han determinado los volúmenes de agua que se necesitan para llevar cabo la producción de este cultivo, siendo las primeras determinaciones realizadas por (Gutiérrez, 1978) quien estableció la aplicación de la lámina de riego en 45 cm ha^{-1} mediante riego por goteo para la obtención de un rendimiento de 56 Mg ha^{-1} . Por otro lado, Erazo-Rivadeneira, Charry, Legarda y Benavides (1993) obtuvieron

rendimientos de 18.43, 19.05 y 36.06 Mg ha⁻¹ en las variedades Blanca lisa, Batavia y Blanca de Boston, respectivamente utilizando esa misma lámina de riego. Investigaciones más recientes como la de Smith et al. (2011) han ido incrementando estos niveles de la lámina de riego hasta 2.29 m ha⁻¹, con un rendimiento de 41 t ha⁻¹, sin embargo, derivado del calentamiento global y la creciente toma de consciencia por los recursos hídricos, es prioritario modificar los paquetes tecnológicos de producción adaptándolos a las situaciones climáticas actuales y establecer nuevas estrategias para la optimización de la aplicación del riego por goteo, en las distintas etapas fenológicas del cultivo.

Las prácticas de manejo son un factor importante que contribuye a reducir las pérdidas de agua y fertilizantes de nitrógeno, para la optimización del rendimiento y la calidad de la lechuga, así como minimizar el proceso de lixiviación de nitratos; lo cual es posible mediante la combinación de aplicación fertilizantes y láminas de riego de acuerdo con las necesidades de nitrógeno durante toda la temporada de crecimiento (Hartz, Johnstone, Williams y Smith, 2007). Este estudio tuvo como objetivo evaluar en términos de rendimiento diferentes láminas de riego y dosis de fertilización nitrogenada en lechuga.

MATERIALES Y MÉTODOS

Unidad experimental

Se estableció un experimento en el Campo experimental del “Desert Research and Extension Center” (DREC, por sus siglas en inglés) de la Universidad de California y ubicado en el poblado de Holtville California (32.80522° N, 115.44735° O). Se utilizó el material vegetal de lechuga que se utilizó fue la variedad iceberg (*Lactuca sativa* L.).

Manejo del cultivo

La siembra del experimento se llevó a cabo el 1 de noviembre de 2022 y se cosechó el 25 de enero de 2023, en camas de dos metros de ancho y con una densidad de población fue de 9.0 plantas m². Para controlar plagas y malezas, fueron aplicados los ingredientes activos: teflutrin (0.5% p/p) y glifosato (486 g L⁻¹) a una dosis de 10 kg ha⁻¹ y 3.0 L ha⁻¹, respectivamente.

Aplicación de los tratamientos

Los tratamientos evaluados fueron dos láminas de riego y tres dosis de nitrógeno, para ello se utilizó un sistema de riego por goteo de la marca NETAFIM® modelo Typhoon 875-0135F con emisores separados por 31 cm con un caudal de 0.68 L h⁻¹, a una presión de 70 kPa proporcionada por las bombas eléctricas de la marca G&L Pumps® instaladas dentro de las instalaciones de la Universidad de California. Para la fertilización, se utilizó el fertilizante UAN32 (nitrato de amonio + urea), el cual se aplicó a través del sistema de riego mediante un método de inyección manual. Este consistió en utilizar una bomba eléctrica que inyectaba hacia la línea principal del agua, mezclando agua con fertilizante en su interior. Las camas con tratamientos diferentes tenían unas válvulas que eran cerradas de acuerdo con el tratamiento aplicado durante el tiempo que el fertilizante fue aplicado según sus dosis, (Figura 1), posterior a eso se dejó fluir el agua por 25 minutos hasta asegurar que no había presencia de fertilizante y se volvió a reabrir el flujo de agua para todas las camas.



Figura 1. Detalle de sistema de aplicación de riego de lechuga al utilizar medidores de flujo y líneas principales (color azul y tres cintas de goteo), incluyendo su válvula individual para cada una de las camas de los tratamientos que puede ser apreciado en la imagen.

Figure 1. Details of the lettuce irrigation system using flow meters and main lines (blue in color and three drip tapes), including individual valves for each treatment bed, as shown in the image.

Diseño y manejo del cultivo

Previo a la siembra, se aplicaron 178 kg ha^{-1} de UAN32. A partir del día 29 de noviembre, el fertilizante se comenzó a aplicar a través del riego por goteo con un total de 305 kg ha^{-1} en todos los tratamientos del experimento. Posteriormente, a partir del 20 de diciembre se comenzó a aplicar las diferentes dosis de cada tratamiento hasta obtener el total de nitrógeno requerido por los diferentes tratamientos. El estudio se estableció bajo un arreglo de tratamientos en parcelas divididas bajo un diseño de bloques completos al azar. La parcela grande consistió en el factor lámina de riego (LR1 = 62 y LR2 = 75 cm ha^{-1}) aplicada a través de dos líneas principales, una para cada lámina de riego con la misma presión, hasta alcanzar el riego programado para cada unidad experimental. La parcela chica consistió en tres dosis de nitrógeno (N1= 94 kg ha^{-1} , N2= 137.2 kg ha^{-1} y N3 = $165.55 \text{ kg ha}^{-1}$ de UAN-32). Cada dosis de nitrógeno se aplicó a través de válvulas

individuales. Cada unidad experimental consistió en cinco camas de siembra, de 2.0 m de ancho y 7.6 m de largo. Cada cama contuvo seis hileras de lechugas sembradas. La distribución de los tratamientos se muestra en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Distribución de los tratamientos de láminas de riego y dosis de fertilización en campo.

Table 1. Distribution of treatment, irrigation regimes and nitrogen doses.

Bloque 1	Bloque 2	Bloque 3	Bloque 4
LR1N1	LR1N3	LR2N1	LR2N1
LR1N3	LR1N2	LR2N3	LR2N2
LR1N2	LR1N1	LR2N2	LR2N3
LR2N2	LR2N1	LR1N1	LR1N3
LR2N1	LR2N3	LR1N3	LR1N1
LR2N3	LR2N2	LR1N2	LR1N2

LR = lamina de riego (LR1 = 62.5 cm ha⁻¹ y LR2= 75 cm ha⁻¹); N = dosis de nitrógeno (N1=94 kg ha⁻¹, N2= 137.2 kg ha⁻¹ y N3 165.55 kg ha⁻¹ de UAN-32).

LR = Irrigation regime (LR1 = 62.5 cm ha⁻¹ y LR2= 75 cm ha⁻¹); N = Nitrogen doses (N1=94 kg ha⁻¹, N2= 137.2 kg ha⁻¹ y N3 165.55 kg ha⁻¹ of UAN-32).

Descripción de las variables

A continuación, se describe la metodología de medición de las variables planteadas en esta investigación y los materiales y métodos utilizados; a excepción del rendimiento y peso seco cuyas mediciones fueron realizadas a los 41, 60, 80 y 87 días después de la siembra; que se corresponden a las etapas fenológicas de: Tercer hoja verdadera (THV), Roseta (R), 25% formación de cabeza (25FC), 50% formación de cabeza (50FC) y Cosecha (C), respectivamente. El resto de las variables se evaluaron a los 67, 80 y 87 días.

Variables evaluadas

Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI). Se utilizó un dispositivo manual marca Greenseeker®. Al momento de la medición, el sensor se colocó a 30 cm de altura de las plantas y se recorrió la unidad experimental. Se inició por el tratamiento N3, el cual está sobre fertilizado y se utilizó como referencia, posteriormente se recorrió las parcelas experimentales de los tratamientos N1 y N2. El resultado se expresó por medio del índice de NDVI.

Contenido de clorofila en la hoja (Unidades SPAD). Se midió el contenido de clorofila con el dispositivo SPAD 502®, las mediciones se hicieron, seleccionando al azar 10 hojas de diferentes lechugas por unidad experimental. El resultado de esta variable se reportó como el promedio de las 10 mediciones por unidad experimental expresado en unidades SPAD.

Conductancia estomática. Se utilizó el dispositivo SC-1 LeafPorometer® sobre las hojas verdes de 10 plantas seleccionadas al azar por unidad experimental, las mediciones se hicieron a la hora de mayor temperatura (2 a 3 de la tarde) y el resultado se expresó como conductancia estomática en milimoles por metro cuadrado por segundo.

Rendimiento. Se determinó cómo el valor promedio del peso de 10 cabezas de lechuga cosechadas por unidad experimental. Se utilizó una báscula digital marca Torrey con

rango de pesaje 0 a 40 kg. El resultado se expresó como rendimiento en megagramo por hectárea.

Peso seco. Se colectaron 10 cabezas de lechuga por unidad experimental. El material colectado se trasladó a un horno de convección para su secado a una temperatura de 65 °C durante 48 horas. El material fue pesado en una báscula digital marca Torrey con rango de pesaje 0 a 40 kg. El peso seco se expresó como el promedio del material colectado por unidad experimental en kilogramo por hectárea.

Concentración de nitratos en savia. Se determinó a partir del macerado de 10 plantas completas de lechuga seleccionadas al azar por unidad experimental y se realizó una dilución 10^{-1} a partir de la cual se realizó la medición de la concentración de nitratos en mg L^{-1} con la ayuda de un equipo portátil (Laquatwin® NO3–11).

Análisis estadístico

Los datos obtenidos de las variables fueron analizados mediante un análisis de varianza bajo un diseño de parcelas divididas, siendo la parcela grande la lámina de riego y la parcela chica las dosis de nitrógeno. Además, cuando hubo significancia estadística ($P \leq 0.05$) se realizó una comparación de medias Tukey mediante el software estadístico SAS® versión 9.4. (SAS Institute Inc, 2018). Además, se realizó un análisis de correlación de las variables de respuesta vs los tratamientos (láminas de riego y dosis de fertilización nitrogenada), el rendimiento y peso seco.

Resultados y Discusión

Al realizar los análisis de varianza correspondientes a cada variable en cada fecha de muestreo, se observó que en lo general no existió diferencia estadísticamente significativa para la interacción entre lámina de riego y la dosis de nitrógeno; en consecuencia, se presenta el análisis de los valores medios para efectos principales (lámina de riego y dosis de fertilizante nitrogenado).

Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

Los valores promedio de NDVI en las diferentes fechas de muestreo para las dos láminas de riego y los tres niveles de nitrógeno; se muestran en el Cuadro 2. En general, estos valores se reducen de manera significativa como resultado de una disminución de la lámina de riego, si bien esta reducción solo es significativa en la primera fecha de muestreo (67 DDS), en relación con las dosis de nitrógeno, los valores de NDVI no mostraron diferencias significativas. Esto concuerda con los resultados mostrados por Kızıl, Genç, İnalpulat, Şapolyo y Mirik (2012), quienes encontraron que el índice NDVI es un buen predictor del estrés hídrico en lechuga.

Cuadro 2. Comparación de medias para efectos principales del NDVI en la evaluación de lechuga en el Valle Imperial, California, E.U.

Table 2. Mean comparison for main effects of NDVI in the evaluation of lettuce in the Imperial Valley, California, U.S.

Tratamiento/Fecha	NDVI		
	67 dds	80 dds	87 dds
	25FC	50FC	C
LR1	0.81 b	0.84 a	0.82 a
LR2	0.82 a	0.85 a	0.82 a
N1	0.82 a	0.84 a	0.83 a
N2	0.82 a	0.85 a	0.82 a
N3	0.80 a	0.85 a	0.82 a

Valores con letras iguales dentro de cada columna de muestreo no son significativamente diferentes según la prueba de Duncan ($\alpha = 0.05$). Values with the same letters within each sampling column are not significantly different according to Duncan's test ($\alpha = 0.05$).

Contenido de clorofila

En el análisis de los valores medios del contenido de clorofila en unidades SPAD (Cuadro 3); se observa un comportamiento homogéneo entre láminas de riego y dosis de nitrógeno a través de todas las fechas de muestreo. Bajo las condiciones del presente estudio, el índice SPAD no resultó una variable sensible para detectar diferencias por estrés hídrico o dosis de nitrógeno.

Conductancia Estomática

La conductancia estomática medida a través del ciclo fenológico del cultivo presentó un comportamiento similar al de la variable de contenido de clorofila (Cuadro 4). Se observó un comportamiento homogéneo entre láminas de riego y dosis de nitrógeno. El rango de valores observado a los 67 DDS se clasifica como indicadores de estrés hídrico moderado; mientras que los obtenidos a los 80 y 87 DDS se clasifican dentro del rango estrés leve de acuerdo con Kim, Goin, Wheeler y Sager (2004). Considerando que los valores de conductancia estomática decrecen como resultado de la imposición de estrés hídrico en los cultivos, los resultados para esta variable sugieren que, para las condiciones de este estudio, la reducción en la lámina de riego no indujo una condición de estrés hídrico en las plantas de lechuga. Además, este hecho se ve reforzado por el hecho de que tampoco hubo cambios en la coloración de las hojas medido por los índices NDVI y SPAD.

Cuadro 3. Comparación de medias para efectos principales del contenido de clorofila en unidades SPAD; en la evaluación de lechuga en el Valle Imperial, California.

Table 3. Comparison of means to main effects (Irrigation regimes and nitrogen doses) from the chlorophyll content in SPAD units in the assessment of lettuce in Imperial Valley, California.

Tratamiento/Fecha	Contenido de clorofila		
	67 dds	80 dds	87 dds
	25FC	50FC	C
LR1	42.1 a	41.07 a	43.19 a
LR2	42.36 a	40.38 a	42.30 a
N1	41.38 a	40.24 a	42.71 a
N2	43.67 a	41.64 a	41.91 a
N3	41.64 a	40.30 a	43.61 a

Valores con letras iguales dentro de cada columna de muestreo no son significativamente diferentes según la prueba de Duncan ($\alpha = 0.05$). Values with the same letters within each sampling column are not significantly different according to Duncan's test ($\alpha = 0.05$).

Cuadro 4. Comparación de medias para efectos principales de la conductancia estomática en la evaluación de lechuga en el Valle Imperial, California.

Table 4. Comparison of means to main effects from the Stomatal conductance in the assessment of lettuce in Imperial Valley, California.

Tratamiento/Fecha	Conductancia estomática (mmolm ² s ⁻¹)		
	67 dds	80 dds	87 dds
	25FC	50FC	C
LR1	73.22 a	158.32 a	181.20 a
LR2	72.96 a	149.30 a	126.75 a
N1	74.51 a	166.60 a	170.85 a
N2	75.79 a	157.18 a	140.45 a
N3	68.97 a	137.65 a	150.63 a

Valores con letras iguales dentro de cada columna de muestreo no son significativamente diferentes según la prueba de Duncan ($\alpha = 0.05$). Values with the same letters within each sampling column are not significantly different according to Duncan's test ($\alpha = 0.05$).

Rendimiento

En relación con el rendimiento del cultivo de lechuga en función de la lámina de riego y dosis de nitrógeno (Cuadro 5), los valores fueron incrementando a través de las diferentes etapas fenológicas del cultivo. Sin embargo, a excepción del muestreo a los 41 DDS, un incremento en la lámina de riego aumentó significativamente el rendimiento del cultivo. En el resto de las etapas fenológicas no se observaron diferencias significativas en rendimiento por efecto de la lámina de riego o la dosis de nitrógeno. Al final del ciclo, los valores de rendimiento oscilaron de 29 a 33 Mg ha⁻¹, valores correspondientes a la producción de lechuga usualmente obtenidos en el Valle Imperial (29.8 Mg ha⁻¹) (Imperial County California, 2022). El rendimiento en este cultivo se mantuvo debido a que este se ve afectado cuando se reduce la lámina de riego de un 60 a 80% a pesar de la reducción

de la aplicación de nitrógeno de hasta un 7% (Karam, Mounzer, Sarkis y Lahoud, 2002). La reducción de la lámina de riego en esta investigación fue de 16 por ciento.

Peso seco

La acumulación de peso seco es una variable que permite estimar el crecimiento de un cultivo en función de la acumulación de biomasa. El patrón de acumulación de peso seco se corresponde con lo reportado por diferentes estudios (Rincón-Sánchez, Crespo, Pellicer, Sironi y Abadia, 2002), esto es, una acumulación de materia seca lenta en la etapa de roseta que se incrementa exponencialmente a partir del inicio de formación de cabeza. Para el presente estudio, los valores medios de acumulación de materia seca en función de lámina de riego y dosis de nitrógeno (Cuadro 6) presentan cierta homogeneidad a lo largo del ciclo fenológico de cultivo.

Cuadro 5. Comparación de medias para los efectos principales del rendimiento en la evaluación de lechuga en el Valle Imperial, California.

Table 5. Comparison of means to main of yield in the assessment of lettuce in Imperial Valley, California.

Tratamiento/Fecha	Rendimiento (Mg ha ⁻¹)			
	41 dds	67 dds	80 dds	87 dds
	R	25FC	50FC	C
LR1	0.2 b	6 a	17 a	30 a
LR2	0.3 a	6 a	20 a	30 a
N1	0.3 a	6 a	18 a	32 a
N2	0.3 a	6 a	18 a	29 a
N3	0.3 a	6 a	18 a	33 a

Valores con letras iguales dentro de cada columna de muestreo no son significativamente diferentes según la prueba de Duncan ($\alpha = 0.05$). Values with the same letters within each sampling column are not significantly different according to Duncan's test ($\alpha = 0.05$).

Cuadro 6. Comparación de medias para los efectos principales del peso seco en la evaluación de lechuga bajo diferentes láminas de riego y dosis de nitrógeno en el Valle Imperial, California.

Table 6. Comparison of means to main effects of dry weight in the assessment of lettuce in Imperial Valley, California.

Tratamiento/Fecha	Peso seco (kg ha ⁻¹)			
	41 dds	67 dds	80 dds	87 dds
	R	25FC	50FC	C
LR1	39 b	368 a	890 a	1271 a
LR2	48 a	345 a	1076 a	968 b
N1	42 a	344 a	908 a	1571 a
N2	41 a	346 a	922 a	1151 a
N3	48 a	380 a	1120 a	636 b

Valores con letras iguales dentro de cada columna de muestreo no son significativamente diferentes según la prueba de Duncan ($\alpha = 0.05$). Values with the same letters within each sampling column are not significantly different according to Duncan's test ($\alpha = 0.05$).

Al momento de la cosecha se obtuvo una mayor acumulación de peso seco con la menor lámina de riego y con la dosis baja e intermedia de nitrógeno. Estos datos sugieren que es posible reducir la cantidad de agua y de fertilizante al cultivo sin afectar el crecimiento del cultivo expresado como su habilidad para fijar biomasa en su estructura.

Contenido de Nitratos en Savia

La medición de la concentración de nitratos en savia es una técnica que ha demostrado su utilidad para evaluar el estatus nutricional de un cultivo y permiten determinar si existen condiciones que limitan la absorción de nitrógeno, uno de los nutrientes con mayor influencia en el rendimiento del cultivo de lechuga. Si consideramos que valores superiores a los 500 mg L⁻¹ pudieran adecuados a lo largo del ciclo del cultivo de lechuga (Gallardo, Snyder, Schulbach y Jackson, 1996; García-Zertuche *et al.*, 2021). Los valores medios reportados en el Cuadro 7, indican que el cultivo se desarrolló satisfactoriamente

en términos de la disponibilidad y absorción de nitrógeno. Asimismo, no se observaron diferencias significativas en los valores de esta variable para la dosis menor de nitrógeno en comparación con la dosis alta. Adicionalmente, en relación con el comportamiento entre lámina de riego y concentración de nitratos en savia, se observa un valor mayor de esta variable a medida que se redujo la aplicación de agua, esto debido a la menor concentración de agua en los tejidos de la planta.

Matriz de correlaciones

El Cuadro 8 muestra los coeficientes de correlación entre las determinaciones realizadas por los diferentes sensores utilizados en el presente estudio y lámina de riego, fertilización nitrogenada, rendimiento y acumulación de peso seco, así como la significancia estadística de dichos coeficientes. Se observa que la determinación de la concentración de nitratos en savia resultó ser un buen predictor tanto de las variaciones en la lámina de riego.

Cuadro 7. Comparación de medias para los efectos principales del contenido de nitratos en savia en la evaluación de lechuga en el Valle Imperial, California.

Table 7. Comparison of means to main effects of nitrate content in the assessment of lettuce in Imperial Valley, California.

Tratamiento/Fecha	Nitratos en savia		
	(mgL ⁻¹)		
	67 dds	80 dds	87 dds
	25FC	50FC	C
LR1	3150.0 a	3066.7 a	3291.7 a
LR2	2891.7 a	2925.0 b	3133.3 b
N1	2650.0 b	2937.5 ab	3350.0 a
N2	3050.0 ab	2900.0 b	2887.5 b
N3	3362.5 a	3150.0 a	3400.0 a

Valores con letras iguales dentro de cada columna de muestreo no son significativamente diferentes según la prueba de Duncan ($\alpha = 0.05$). Values with the same letters within each sampling column are not significantly different according to Duncan's test ($\alpha = 0.05$).

Cuadro 8. Análisis de correlación de los factores principales, de rendimiento y peso seco vs las variables de respuesta a los tratamientos: lámina de riego y niveles de fertilización nitrogenada.

Table 8. Correlation analysis of main effects, yield and dry weight vs treatments response variables: regimes and nitrogen doses of nitrate

	Índice de vegetación de diferencia normalizada	Contenido de clorofila	Conductancia estomática	Nitratos en savia
	NDVI	SPAD	mmol m ² s ⁻¹	mg L ⁻¹
LR	0.13	-0.092	-0.19	-0.22*
N	-0.11	0.08	-0.14	0.29**
Rendimiento (Mg ha ⁻¹)	0.18	0.09	0.55**	0.20
Peso seco (kg ha ⁻¹)	0.35*	-0.11	0.53**	0.17

* Significante a probabilidad del 0.05; ** Significante a probabilidad del 0.01. * Significant at probability of 0.05; ** Significant at probability of 0.01.

($y = -0.00519x + 125.97$), así como de la dosis de nitrógeno ($y = 0.01945x + 70.51$). En relación con el rendimiento y acumulación de peso seco, la medición de la conductancia estomática presentó los mayores coeficientes de correlación resultando en ambos casos altamente significativos. Las ecuaciones de regresión son: $y = 27.27x + 1001.5$; $y = 1.15x + 47.88$ respectivamente para estas dos variables.

Conclusiones

La aplicación de la lámina de riego de 62.5 cm ha⁻¹ y la dosis de fertilización nitrogenada de 94 kg ha⁻¹ no afectó estadísticamente el rendimiento y la acumulación de peso seco del cultivo de lechuga en comparación con la lámina de riego de 75 cm ha⁻¹ y las dosis de fertilización de 137.2 y 165.55 kg ha⁻¹. Por lo tanto, es posible la obtención de la reducción del volumen de agua y fertilizante nitrogenado en el orden del 17 y 31%,

respectivamente. Además, con el manejo convencional de agua y nitrógeno en las condiciones de siembra del cultivo es posible proponer una disminución en estos dos factores de producción sin afectar al rendimiento. De los sensores utilizados, la medición de la concentración de nitratos en savia resultó un buen indicador de los cambios en lámina de riego y dosis de nitrógeno, mientras que la conductancia estomática detectó de manera significativa las variaciones en rendimiento y acumulación de materia seca.

Declaración de ética

No aplicable.

Consentimiento para la publicación

No aplicable.

Disponibilidad de los datos

Los conjuntos de datos utilizados o analizados durante el estudio actual están disponibles por el autor correspondiente a solicitud razonable.

Conflicto de interés

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

Financiación

Esta investigación se llevó a cabo con el apoyo financiero del Dr. Aliasghar Montazar.

Contribución de los autores

Escritura, preparación del borrador original: J.B.C. Conceptualización y Adquisición de fondos: A. M. Análisis de la información: S.M.A.M., M.I.E.G. y J.G.B.M. Escritura, revisión y edición: R.S.O.

Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento a la Universidad de California, en particular al Desert Research and Extension Center y al Instituto de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma de Baja California.

Literatura citada

Ferreira-Gomes, A. M., & Barizon, R. R. M. (2014). *Panorama da contaminação ambiental por agrotóxicos e nitrato de origem agrícola no Brasil: Cenário 1992/2011*. Brasil: Embrapa Meio Ambiente.

Aquino, L. A., Puiatti, M., Abaurre, M. E., Cecon, P. R., Pereira, P. R., Pereira, F. H., & Castro, M. R. (2007). Produção de biomassa, acúmulo de nitrato, teores e exportação de macronutrientes da alface sob sombreamento. *Horticultura Brasileira*, 25, 381-386. <https://doi.org/10.1590/S0102-05362007000300012>

Breschini, S. J., & Hartz, T. K. (2002). Presidedress soil nitrate testing reduces nitrogen fertilizer use and nitrate leaching hazard in lettuce production. *HortScience*, 37(7), 1061-1064. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.37.7.1061>

El-Ghany, M. F. A., El-Kherbawy, M. I., Abdel-Aal, Y. A., & Abbas, M. H. (2022). Effect of growth seasons and nitrogen fertilization on the growth, yield and nitrate accumulation of lettuce (*Lactuca sativa* L.) plants. *International Journal of Health Sciences*, 6, 7053-7066. <https://doi.org/10.53730/ijhs.v6nS4.10399>

Erazo-Rivadeneira, Y., Charry-Muñoz, E., Legarda-Burbano, L., & Benavides, O. (1993). Evaluación de seis láminas de riego por goteo en cultivos de repollo (*Brassica oleracea var. capitata*) y lechuga (*Lactuca sativa*) en la Granja de Botana, Pasto, Nariño. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 12, 66-78.

FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). (2024). *Agricultura de conservación*. Rome, Italy: FAO.

Gallardo, M., Snyder, R. L., Schulbach, K., & Jackson, L. E. (1996). Crop Growth and Water Use Model for Lettuce. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 122(6), 354-359. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1996\)122:6\(354\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1996)122:6(354))

García-Zertuche, M. F., Sandoval-Rangel, A., Robledo-Torres, V., Benavides-Mendoza, A., Robledo-Olivo, A., & Cabrera-de la Fuente, M. (2021). Rentabilidad y rendimiento agronómico de lechuga acuapónica. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 26, 119-130.

<https://doi.org/10.29312/remexca.v0i26.2942>

Hartz, T. K., Johnstone, P. R., Williams, E., & Smith, R. F. (2007). Establishing Lettuce Leaf Nutrient Optimum Ranges Through DRIS Analysis. *HortScience*, 42(1), 143–146. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.42.1.143>

Imperial County California. (2022). *Imperial County Agricultural Crop and livestock report*. El Centro, CA, USA: Imperial County. <https://agcom.imperialcounty.org/wp-content/uploads/2023/10/2022-Crop-Report-Updated.pdf>

Jackson, L. E., & Stivers, L. J. (1993). Root distribution of lettuce under commercial production: Implications for crop uptake of nitrogen. *Biological Agriculture and Horticulture*, 9(3), 273-293. <https://doi.org/10.1080/01448765.1993.9754639>

Karam, F., Mounzer, O., Sarkis, F., & Lahoud, R. (2002). Yield and nitrogen recovery of lettuce under different irrigation regimes. *Journal of Applied Horticulture*, 4(2), 70-76.

Kerns, D. L., Matheron, M. E., Palumbo, J. C., Sanchez, C. A., Still, D. W., Tickes, B. R., ... & Wilcox, M. A. (1999). *Guidelines for head lettuce production in Arizona*. Tucson, Arizona, USA: University of Arizona.

Kim, H., Goins, G., Wheeler, R., & Sager, J. (2004). Stomatal Conductance of Lettuce Grown Under or Exposed to Different Light Qualities. *Annals of Botany*, 94(5), 691-697. <https://doi.org/10.1093/aob/mch192>

Kızıl, Ü., Genç, L., İnalpulat, M., Şapolyo, D., & Mirik, M. (2012). Lettuce (*Lactuca sativa* L.) yield prediction under water stress using artificial neural network (ANN) model and vegetation indices. *Žemdirbystė=Agriculture*, 99(4), 409-418.

Kovács, B., Puskás-Preszner, A., Huzsvai, L., Lévai, L., & Bódi, É. (2015). Effect of molybdenum treatment on molybdenum concentration and nitrate reduction in maize seedlings. *Plant Physiology and Biochemistry*, 96, 38-44. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2015.07.013>

Páez-Osuna, F., Álvarez-Borrego, S., Ruiz-Fernández, A. C., García-Hernández, J., Jara-Marini, M. E., Bergés-Tiznado, M. E., ... & Sánchez-Cabeza, J. A. (2019). Estatus ambiental de la contaminación en el golfo de California: una síntesis actualizada. En *Costas y Mares Mexicanos. Contaminación, impactos, vulnerabilidad y cambio climático*, (pp. 71-93.). México: PAPIME-DGAPA-UNAM. ISBN: 978-607-30-2331-3

Pink, D. A. C., & Keane, E. M. (1993). Lettuce. En G. Kalloo and B. O. Bergh (Eds.). *Genetic Improvement of Vegetable Crops* (pp. 543-571). Amsterdam, The Netherland: Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-040826-2.50044-8>

Resende, G. M., Alvarenga, M. A. R., Yuri, J. E., & Souza, R. J. de. (2010). Yield and postharvest quality of winter growing crisphead lettuce as affected by doses of nitrogen and molybdenum. *Horticultura Brasileira*, 28(4), 441-445. <https://doi.org/10.1590/S0102-05362010000400011>

Rincón-Sánchez, L., Pérez-Crespo., Pellicer-Botía, C., Saéz-Sironi, J. S., & Abadía-Sánchez, A. (2002). Influencia de la fertilización nitrogenada en la absorción de nitrógeno y acumulación de nitratos en la lechuga iceberg. *Investigación agraria. Producción y Protección Vegetales*, 17(2), 303-318.

Santamaria, P. (2006). Nitrate in vegetables: toxicity, content, intake and EC regulation. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 86(1), 10-17. <https://doi.org/10.1002/jsfa.2351>

Santamaria, P., Elia, A., Serio, F., & Todaro, E. (1999). A survey of nitrate and oxalate content in fresh vegetables. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 79(13), 1882-1888. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0010\(199910\)79:13%3C1882::AID-JSFA450%3E3.0.CO;2-D](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0010(199910)79:13%3C1882::AID-JSFA450%3E3.0.CO;2-D) SAS Institute (2018). *Statistical Analysis System SAS/STAT User's Guide*. version 9.4. Cary, NC, USA: SAS Institute Inc.

Shatilov, M. V., Razin, A. F., & Ivanova, M. I. (2019). Analysis of the world lettuce market. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 395(1), 1-6. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/395/1/012053>

Smith, R., Cahn, M., Daugovish, O., Koike, S., Natwick, E., Smith, H., ... & Turini, T. (2011). *Leaf Lettuce Production in California*. Richmond, CA, USA: UCANR Publications. ISBN: 978-1-60107-767-7

USDA (United States Department of Agriculture). (2023). U.S. Lettuce production shifts regionally by season. Consultado el 15 de julio, 2023, desde <https://www.ers.usda.gov/data-products/chart-gallery/gallery/chart-detail/?chartId=106516>

6. CONCLUSIÓN

La aplicación de una lámina de riego de $62.5 \text{ cm}\cdot\text{ha}^{-1}$ y una fertilización nitrogenada de $94 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ no mostró diferencias estadísticas en el rendimiento ni en la acumulación de biomasa seca del cultivo de lechuga en comparación con la lámina de riego de $75 \text{ cm}\cdot\text{ha}^{-1}$ y las dosis de fertilización de 137.2 y $165.55 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$. En consecuencia, es factible reducir el consumo de agua de riego y la aplicación de fertilizantes nitrogenados en un 17% y 31%, respectivamente. Asimismo, bajo el manejo convencional de agua y nitrógeno en las condiciones de cultivo evaluadas, se sugiere la posibilidad de disminuir ambos insumos sin comprometer el rendimiento del cultivo. Entre los sensores utilizados, la medición de la concentración de nitratos en savia se destacó como un indicador eficiente para detectar variaciones en la lámina de riego y la dosis de nitrógeno, mientras que la conductancia estomática permitió identificar de manera significativa los cambios en el rendimiento y la acumulación de biomasa seca. En consecuencia, no se obtuvieron resultados adicionales relevantes distintos a los presentados en el artículo científico publicado y adjunto como capítulo de tesis, el cual concentra los principales hallazgos del estudio.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Abdel Bar, F. M., Abdel Fatah, N. H., Amen, Y., Halim, A. F., & Saad, H.-E. A. (2023). Genus *Lactuca* (Asteraceae): A Comprehensive Review. *Records of Natural Products*, 2, 201–231. <https://doi.org/10.25135/rnp.350.2205-2474>
- Ali, W., Hamiduddin, Ahmad, A., Aslam, M., & Nasir, A. (2016). Tikh e-kahu (*Lactuca sativa* Linn) Pharmacological and Phytochemical profile and uses in unani medicine. *Journal of Pharmaceutical & Scientific Innovation*, 5(1), 1–4. <https://doi.org/10.7897/2277-4572.0511>
- Antonio Ferreira Gomes, M., & Barizon, R. R. M. (2014). Panorama da Contaminação Ambiental por Agrotóxicos e Nitrato de origem Agrícola no Brasil: Cenário 1992/2011. *Embrapa Meio Ambiente*, 35.
- Aquino, L. A. de, Puiatti, M., Abaurre, M. E., Cecon, P. R., Pereira, P. R., Pereira, F. H., & Castro, M. R. (2007). Produção de biomassa, acúmulo de nitrato, teores e exportação de macronutrientes da alface sob sombreamento. *Horticultura Brasileira*, 25(3), 381–386. <https://doi.org/10.1590/S0102-05362007000300012>
- Basset, M. (1986). *Breeding vegetable crops*. Westport, AVI Publishing Co.
- Boukema, I., Hazekamp, T., & Van Hintum, T. (1990). *The CGN lettuce collection*. Wageningen: Centre for Genetic Resources.
- Breschini, S. J., & Hartz, T. K. (2002). Presidedress Soil Nitrate Testing Reduces Nitrogen Fertilizer Use and Nitrate Leaching Hazard in Lettuce Production. *HortScience*, 37(7), 1061–1064. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.37.7.1061>

- Chu, Y.-F., Sun, J., Wu, X., & Liu, R. H. (2002). Antioxidant and Antiproliferative Activities of Common Vegetables. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *50*(23), 6910–6916.
<https://doi.org/10.1021/jf020665f>
- Díaz Espino, L. F., Arévalo Valenzuela, A., Garia Leños, L., & Bujanos Muñiz, R. (2011). Fertirrigación en el cultivo de la lechuga en Guanajuato. *Intituto Nacional de investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias*, *3*, 32. file:///C:/Users/hp touch/Desktop/Lechuga.pdf
- Doležalová, I., Lebeda, A., Janeček, J., Číhalíková, J., Křístková, E., & Vránová, O. (2002). Variation in chromosome numbers and nuclear DNA contents in genetic resources of *Lactuca L. species (Asteraceae)*. *Genetic Resources and Crop Evolution*, *49*(4), 385–397.
<https://doi.org/10.1023/A:1020610129424>
- DuPont, M. S., Mondin, Z., Williamson, G., & Price, K. R. (2000). Effect of Variety, Processing, and Storage on the Flavonoid Glycoside Content and Composition of Lettuce and Endive. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, *48*(9), 3957–3964.
<https://doi.org/10.1021/jf0002387>
- El-Ghany, M. F. A., El-Kherbawy, M. I., Abdel-Aal, Y. A., & Abbas, M. H. (2022). Effect of growth seasons and nitrogen fertilization on the growth, yield and nitrate accumulation of lettuce (*Lactuca sativa L.*) plants. *International journal of health sciences*, 7053–7066.
<https://doi.org/10.53730/ijhs.v6nS4.10399>
- Erazo, Y., Charry, E., Legarda, L., & Benavides, O. (1993). Evaluación de seis láminas de riego por goteo en cultivos de repollo *Brassica oleracea* var. capitana y lechuga *Lactuca sativa* en la granja de botana, pasto nariño. *Revista de ciencias agrícolas*, *12*, 66–78.

FAO. (2024). *Agricultura de conservación*. <https://www.fao.org/conservation-agriculture/es/>

Feráková, V. (1977). *The genus Lactuca L. in Europe*.

<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:83346664>

Gutiérrez, J. H. (1978). *Determinación de la lámina de riego por goteo en la lechuga (Lactuca sativa L.)* [Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia]. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://repository.agrosavia.co/bitstream/handle/20.500.12324/29046/26445_12941.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Hartz, T. K., Johnstone, P. R., Williams, E., & Smith, R. F. (2007). Establishing Lettuce Leaf Nutrient Optimum Ranges Through DRIS Analysis. *HortScience*, *42*(1), 143–146.

<https://doi.org/10.21273/HORTSCI.42.1.143>

Hassan, M. N., Mekkawy, S. A., Mahdy, M., Salem, K. F. M., & Tawfik, E. (2021). Recent molecular and breeding strategies in lettuce (*Lactuca* spp.). *Genetic Resources and Crop Evolution*, *68*(8), 3055–3079. <https://doi.org/10.1007/s10722-021-01246-w>

Jackson, L. E., & Stivers, L. J. (1993). Root distribution of lettuce under commercial production: Implications for crop uptake of nitrogen. *Biological Agriculture and Horticulture*, *9*(3), 273–293. <https://doi.org/10.1080/01448765.1993.9754639>

Kerns, D. L., Matheron, M. E., Palumbo, J. C., Sánchez, C. A., Still, D. W., Tickes, B. R., Umeda, K., & Wilcos, M. A. (1999). *Guidelines for head lettuce production in Arizona* [University of Arizona]. <https://ag.arizona.edu/crops/vegetables/cropmgt/az1099.html>

Kovács, B., Puskás-Preszner, A., Huzsvai, L., Lévai, L., & Bódi, É. (2015). Effect of molybdenum treatment on molybdenum concentration and nitrate reduction in maize seedlings. *Plant Physiology and Biochemistry*, *96*, 38–44. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2015.07.013>

- Křístková, E., Doležalová, I., Lebeda, A., Vinter, V., & Novotná, A. (2008). Description of morphological characters of lettuce (*Lactuca sativa* L.) genetic resources. *Horticultural Science*, 35(3), 113–129. <https://doi.org/10.17221/4/2008-HORTSCI>
- Lebeda, A., Dolezalova, I., Ferakova, V., & Astley, D. (2004). Geographical Distribution of Wild *Lactuca* Species (Asteraceae, Lactuceae). *The Botanical Review*, 70(3), 328–356.
- Lebeda, A., Ryder, E., Grube, R., Dole_alová, I., & K_ístková, E. (2006). *Lettuce* (Asteraceae; *Lactuca* spp.) (pp. 377–472). <https://doi.org/10.1201/9781420009569.ch9>
- Li, Z., Zhao, X., Sandhu, A. K., & Gu, L. (2010). Effects of Exogenous Abscisic Acid on Yield, Antioxidant Capacities, and Phytochemical Contents of Greenhouse Grown Lettuces. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 58(10), 6503–6509. <https://doi.org/10.1021/jf1006962>
- Llorach, R., Martínez-Sánchez, A., Tomás-Barberán, F. A., Gil, M. I., & Ferreres, F. (2008). Characterisation of polyphenols and antioxidant properties of five lettuce varieties and escarole. *Food Chemistry*, 108(3), 1028–1038. <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2007.11.032>
- Meena, K. L., Himalayas, W., Pradesh, H., Pradesh, U., & Pradesh Mamgain, A. (1983). *Lactuca serriola* L. (Asteraceae): an extended distribution to the states of Rajasthan. En *Fl. Brit. India* (Vol. 3).
- Mikel, M. A. (2007). Genealogy of Contemporary North American Lettuce. *HortScience*, 42(3), 489–493. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.42.3.489>
- Páez-Osuna, F., Bergés-Tiznado, M., Alvarez-Borrego, S., Ruiz-Fernández, A., García-Hernández, J., Jara-Marini, M., Piñón-Gimate, A., Alonso, R., Soto-Jiménez, M., Frías-

- Espericueta, M., Ruelas-Inzunza, J., Green Ruiz, C., Sanchez-Cabeza, J.-A., & Osuna-Martínez, C. (2019). *Estatus ambiental de la contaminación en el golfo de California: una síntesis actualizada* (pp. 71–94).
- Pink, D. A. C., & Keane, E. M. (1993a). Lettuce. En *Genetic Improvement of Vegetable Crops* (pp. 543–571). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-040826-2.50044-8>
- Pink, D. A. C., & Keane, E. M. (1993b). Lettuce. En *Genetic Improvement of Vegetable Crops* (pp. 543–571). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-040826-2.50044-8>
- Resende, G. M. de, Alvarenga, M. A. R., Yuri, J. E., & Souza, R. J. de. (2010). Yield and postharvest quality of winter growing crisphead lettuce as affected by doses of nitrogen and molybdenum. *Horticultura Brasileira*, 28(4), 441–445. <https://doi.org/10.1590/S0102-05362010000400011>
- Rodenburg, C. M., & Basse, H. (1960). *Varieties of lettuce: an international monograph* (Número 3). Instituut voor de Veredeling van Tuinbouwgewassen.
- Santamaria, P. (2006). Nitrate in vegetables: toxicity, content, intake and EC regulation. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 86(1), 10–17.
- Santamaria, P., Elia, A., Serio, F., & Todaro, E. (1999). A survey of nitrate and oxalate content in fresh vegetables. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 79(13), 1882–1888.
- Shatilov, M. V., Razin, A. F., & Ivanova, M. I. (2019a). Analysis of the world lettuce market. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 395(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/395/1/012053>

- Shatilov, M. V, Razin, A. F., & Ivanova, M. I. (2019b). Analysis of the world lettuce market. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 395(1), 012053.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/395/1/012053>
- Smith, R., Cahn, M., Daugovish, O., Koike, S., Natwick, E., Smith, H., Subbarao, K., Takele, E., & Turini, T. (2011). Leaf Lettuce Production in California. *Leaf Lettuce Production in California, 2010*. <https://doi.org/10.3733/ucanr.7216>
- Soldatenko, A. V., Razin, A. F., Shatilov, M. V., Ivanova, M. I., Taktarova, S. V., Kuzyakin, M. V., Sokolova, E. S., & Bukanov, V. S. (2018). Problems of lettuce production in open ground and peculiarities of its growing in conditions of small manufacture production (On the example of LLC “Vesely Agronom” Dmitrovskiy district of Moscow region). *Vegetable crops of Russia*, 2, 55–60. <https://doi.org/10.18619/2072-9146-2018-2-55-60>
- Still, D. W. (2007). Lettuce. En *Vegetables* (pp. 127–140). Springer Berlin Heidelberg.
https://doi.org/10.1007/978-3-540-34536-7_2
- Thompson, T. L., & Doerge, T. A. (1996). Nitrogen and Water Interactions in Subsurface Trickle-Irrigated Leaf Lettuce II. Agronomic, Economic, and Environmental Outcomes. *Soil Science Society of America Journal*, 60(1), 168–173.
<https://doi.org/10.2136/sssaj1996.03615995006000010027x>
- Turini, T., Cahn, M., Cantwell, M., Jackson, L., Koike, S., Natwick, E., Smith, R., Subbarao, K., & Takele, E. (2011). Iceberg lettuce production in California. *University of California*, 7215.
- USDA. (2023). *U.S. lettuce production shifts regionally by season*.
<https://www.ers.usda.gov/data-products/chart-gallery/gallery/chart-detail/?chartId=106516>