

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-Ortiz¹

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 m·ha⁻¹ en Colombia, hasta 2.0 m 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 m ha⁻¹) y menor fertilización (94 kg 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 kg 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 m ha⁻¹ in Colombia to 2.0 m ha⁻¹ in California. These two factors contribute to groundwater



Cita recomendada:

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. *Terra Latinoamericana*, 43, 1-10. e2056. <https://doi.org/10.28940/terra.v43i.2056>

Recibido: 15 de agosto de 2024.

Aceptado: 9 de enero de 2025.

Artículo. Volumen 43.

Febrero de 2025.

Editor de Sección:

Dr. Fidel Núñez-Ramírez



Copyright: © 2025 by the authors.

Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC ND) License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

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 analysed 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 y 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 $411.63 \text{ kg ha}^{-1}$ 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 (Gutierrez, 1978¹) 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 Mg ha⁻¹, sin embargo, derivado del calentamiento global y la creciente toma de conciencia 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 los 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 al 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.

¹ Gutierrez, J. H. (1978). *Determinación de la lámina de riego por goteo en la lechuga (Lactuca sativa L.)*. Tesis para obtener el grado de Ingeniero Agronomo. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Disponible en <http://hdl.handle.net/20.500.12324/29046>



Figura 1. Detalle de sistema de aplicación de riego de lechuga al utilizar un ando 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 ($\text{LR1} = 62$ y $\text{LR2} = 75 \text{ cm ha}^{-1}$) 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 ($\text{N1} = 94 \text{ kg ha}^{-1}$, $\text{N2} = 137.2 \text{ kg ha}^{-1}$ y $\text{N3} = 165.55 \text{ kg ha}^{-1}$ 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 con tuvo 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 = lámina de riego ($\text{LR1} = 62.5 \text{ cm ha}^{-1}$ y $\text{LR2} = 75 \text{ cm ha}^{-1}$); N = dosis de nitrógeno ($\text{N1} = 94 \text{ kg ha}^{-1}$, $\text{N2} = 137.2 \text{ kg ha}^{-1}$ y $\text{N3} = 165.55 \text{ kg ha}^{-1}$ de UAN-32).

LR = Irrigation regime ($\text{LR1} = 62.5 \text{ cm ha}^{-1}$ y $\text{LR2} = 75 \text{ cm ha}^{-1}$); N = Nitrogen doses ($\text{N1} = 94 \text{ kg ha}^{-1}$, $\text{N2} = 137.2 \text{ kg ha}^{-1}$ y $\text{N3} = 165.55 \text{ kg ha}^{-1}$ 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® NO_3^{-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 muestro, 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 muestro 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 muestro (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 (mmol m 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 (mg L ⁻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 ni 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 PUBLICACIÓN

No aplicable.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

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

CONFLICTO DE INTERESES

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 acupónica. *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. *Zemdirbystė=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 Netherlands: 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>