

ÍNDICE DE ESTRÉS HÍDRICO DEL CULTIVO DE LECHUGA (*Lactuca sativa*), MEDIANTE TERMOMETRÍA INFRARROJA A DIFERENTES LÁMINAS DE RIEGO

Index of water stress of lettuce crop (*Lactuca sativa*), through infrared thermometry to different irrigation sheets

Marcelo Tarqui Delgado¹; René Chipana Rivera²; Freddy Carlos Mena Herrera²; Juan Javier Quino Luna²; Rubén Tallacagua Terrazas²; Susana Gutiérrez Villalobos³

RESUMEN

La termometría infrarroja, es un método muy poco difundido y empleado en Bolivia, mide el IEHC que es una herramienta confiable en la programación de riegos, combinado con sistemas de riego eficiente para incrementar los rendimientos de la productividad de cultivos y mayor eficiencia del uso de recursos hídricos en base a las necesidades fisiológicas del cultivo. La investigación se realizó en la Estación Experimental de Cota Cota, con el objetivo de determinar el IEHC del cultivo de lechuga producido con riego por goteo, a una relación con láminas de riego para la programación del riego y predicción del rendimiento tanto de materia verde como seca. El diseño experimental fue unifactorial con tres niveles de lámina de riego: 50, 75 y 100% de la ETo. Los tratamientos fueron distribuidos en diseño completamente al azar con 20 muestras por cada tratamiento. El IEHC fue calculado a partir de temperatura del cultivo, aire, humedad relativa y déficit de presión de vapor. Cuando el cultivo transpira, esta relación es: $T_c - T_a = 1.2851 - 2.3915 \text{ DPV}$ ($r^2 = 0.68$, $P < 0.01$, $n = 42$) y el límite superior fue de 2.8 °C, cuando el cultivo no transpira. El rendimiento del cultivo se correlacionó directamente con valores promedios de IEHC y se obtuvo la ecuación lineal: $Y = 52.53 - 69.7 \text{ IEHC}$ ($r^2 = 0.5151$ y $n = 82$), que indica el límite donde la planta de lechuga no se encuentra en estrés presentan los valores de 0 a 0.23 del IEHC, los valores con estrés relativo y requerimiento de riego oportuno se encuentra en los rangos de 0.24 a 0.31 para obtener rendimientos de 3.17 a 3.44 kg m⁻², los valores en el cual la planta presenta un estrés de mayor magnitud se encuentra en los valores de 0.32 a 0.50 disminuyendo el rendimiento hasta 1.7 kg m⁻². Los valores del índice de estrés hídrico en los rangos 0.56 a 1.00 resultan en la muerte del cultivo.

Palabras clave: Lámina de riego, termometría infrarroja, rendimiento, programación de riego.

ABSTRACT

Infrared thermometry is a widely used method in Bolivia, it measures the IEHC which is a reliable tool in irrigation scheduling, combined with efficient irrigation systems for increasing yields of crop yields and greater efficiency of use of Water resources based on the physiological needs of the crop. The research was carried out at the Cota Cota Experimental Station, with the objective of determining the IEHC of lettuce crop produced with drip irrigation, to a relation with irrigation sheets for irrigation scheduling and prediction of the yield of both green and dried matter. The experimental design was unifactorial with three levels of irrigation: 50, 75 and 100% of the ETo. The treatments were distributed in a completely randomized design with 20 samples per treatment. The IEHC was calculated from the crop temperature, air, relative humidity and vapor pressure deficit. When the crop transpires, this relationship is: $T_c - T_a = 1.2851 - 2.3915 \text{ DPV}$ ($r^2 = 0.68$, $P < 0.01$, $n = 42$) and, the upper limit was 2.8 °C when the crop does not transpire. The yield of the crop was directly correlated with mean IEHC values and the linear equation was obtained: $Y = 52.53 - 69.7 \text{ IEHC}$ ($r^2 = 0.5151$ and $n = 82$), which indicates the limit where the lettuce plant is not in stress. Values from 0 to 0.23 of the IEHC, the values with relative stress and timely irrigation requirement are in the ranges of 0.24 to 0.31 to obtain yields of 3.17 to 3.44 kg m⁻², the values in which the plant presents a stress of greater magnitude is in the values of 0.32 to 0.50 decreasing the yield up to 1.7 kg m⁻². The values of the water stress index in the ranges 0.56 to 1.00 result in the death of the crop.

Keywords: Irrigation sheet, infrared thermometry, yield, irrigation scheduling.

¹ Docente Investigador, Facultad de Agronomía, Universidad Mayor de San Andrés, Bolivia. marcelotarquidelgado@gmail.com

² Docente, Facultad de Agronomía, Universidad Mayor de San Andrés, Bolivia.

³ Facultad de Agronomía, Universidad Mayor de San Andrés, Bolivia.

INTRODUCCIÓN

El índice de estrés hídrico del cultivo (IEHC), se basa en la determinación de la tasa de transpiración actual de un cultivo mediante la medición de la temperatura del cultivo y el déficit de presión de vapor, el cual en base a estos distintos métodos de identificación de índices se realiza la programación del riego con el propósito de determinar las láminas y frecuencias apropiadas durante el ciclo fenológico de un cultivo. Para la determinación del riego, se debe considerar diversos factores, como los requerimientos hídricos del cultivo, demanda evaporante de la atmósfera, condiciones fisicoquímicas y biológicas del suelo que determinan su capacidad de retención de agua por el suelo, y los datos de profundidad efectiva del cultivo, que determinan la cantidad de agua posible de ser utilizada en el proceso evapotranspirativo del cultivo (López et al., 2009).

Se han usado diversos enfoques y métodos para la programación del riego en cultivos en diferentes países; medición directa e indirecta de la humedad del suelo, del estado energético del agua en el suelo, estimaciones de la demanda atmosférica y, en condiciones experimentales, determinaciones del potencial hídrico de las plantas o termometría infrarroja (Giuliani et al., 2001).

Idso y Clawson (1986) desarrollaron el método empírico del índice de estrés hídrico para la cuantificación de la tensión de humedad en los cultivos en regiones áridas, el cual depende de la determinación de las líneas base sin y con estrés hídrico. Las líneas base son específicas del cultivo y están influenciadas por el clima (Bucks et al., 1985). Jackson et al. (1981) modificaron el IEHC incluyendo: el déficit de presión del vapor (DPV), la radiación neta (R) y la resistencia aerodinámica (r) para obtener una mejor predicción teórica de los efectos del clima sobre la temperatura del cultivo. Esta aproximación es mejor que el método empírico, especialmente en climas húmedos.

El método del IEHC tiene uso práctico dentro de la programación del riego de cultivos en sectores que presentan características áridas y semiáridas. Esto se debe principalmente a que los sensores requeridos son de fácil manejo.

En la agricultura de riego, el costo económico y ecológico del agua es alto si se considera la incertidumbre en su disponibilidad acrecentada por el cambio climático, de ahí que el costo de los sensores para cuantificar las variables climáticas y el estrés hídrico puede justificar la inversión (Feldhake et al., 1997).

Cuando un cultivo presenta estrés hídrico, los estomas se cierran y la transpiración decrece por lo que la temperatura de la hoja se incrementa. Cuando una planta transpira completamente, no hay estrés hídrico y la temperatura de la hoja oscila de 1 a 4 °C menos que la temperatura ambiental, en este caso el IEHC es cero. Cuando la transpiración decrece, la temperatura de la hoja asciende y puede alcanzar de 4 a 6 °C más que la temperatura del aire, el déficit hídrico es alto, y la transpiración de las hojas se ve drásticamente reducida con el incremento de la temperatura foliar, cuando la planta está muerta o no transpira en mucho tiempo, el IEHC es uno (Jackson et al., 1981).

Es por ello que la esencia del trabajo es la determinación del IEHC de lechuga para la programación de riego, introduciendo el método para identificar el momento preciso de riego en base a la temperatura del cultivo, temperatura ambiente, déficit de presión de vapor, plasmando la investigación con los siguientes objetivos: a) determinar el límite inferior y superior del IEHC del cultivo de la lechuga a través de modelos lineales en base a la diferencia de temperaturas de la hoja y aire circundante, b) conocer el efecto de la lámina de riego en las variables agronómicas a diferentes etapas fenológicas del cultivo y c) realizar la programación de riego para los IEHC, identificado en el ciclo vegetativo.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en la Estación Experimental de Cota Cota de la Universidad Mayor de San Andrés, situado geográficamente entre las coordenadas 16° 32' 04" latitud sur y 68° 03' 44" longitud oeste y una altitud de 3445 m s.n.m. Se implementó el cultivo en todo su ciclo con un sistema de riego por goteo durante el periodo comprendido entre los meses de mayo a julio del año 2015. La región se caracteriza por ser templada con una temperatura media anual de 9°C, máxima anual de 21°C y mínima anual de -0.6°C, el periodo de lluvias es de diciembre a marzo, el resto del año es seco, y la precipitación media anual es de 400 mm.

Se utilizó semilla de lechuga de la variedad "Grand Rapid" marca SEMINIS, se realizó el almacigo de las semillas para la producción de plántulas el 29 de abril, las plántulas para el trasplante se obtuvieron el 20 de mayo de 2015, esta se realizó en platabandas de maderas con drenaje y sustrato preparado y esterilizado en base a materia orgánica de estiércol de ovino, tierra de lugar y arena homogenizada, el trasplante fue realizado el 21 de mayo y la cosecha fue el 21 de julio del mismo año. El marco de plantación fue rectangular con dimensiones de 0.25 m entre hileras y 0.30 m entre plantas, obteniéndose una densidad de 13 plantas m⁻².

Las características físicas del suelo determinadas en campo fueron: textura franco arenosa, densidad aparente de 1.10 y 1.20 g cm⁻³ a las profundidades de 10 y 30 cm. El porcentaje de humedad a capacidad de campo fue de 20.43% y el punto de marchitez permanente de 10.90%, el tiempo de infiltración de agua en el suelo fue de 45.09 mm h⁻¹, con un pH de suelo que oscila de 7.23 a 7.25 siendo suelos neutros y no salinos con 0.73 a 0.78 de conductividad eléctrica en extracto etéreo.

La evapotranspiración de referencia (ET₀) se calculó con el software de ET₀ calculator que presenta el siguiente principio de la ecuación de Penman-Monteith:

$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)} \quad (1)$$

Dónde: R_n = radiación neta en la superficie del cultivo (MJ m⁻²d⁻¹); G = densidad de flujo de calor del suelo (MJ m⁻²d⁻¹); T = temperatura media diaria del aire (°C); u₂ = velocidad del viento a 2 metros de altura (m s⁻¹); e_s = presión de vapor a saturación (kPa); e_a = presión de vapor actual (kPa); Δ = pendiente de la curva de presión de vapor (kPa °C⁻¹); γ = constante psicrométrica (kPa °C⁻¹).

El diseño experimental fue unifactorial con tres niveles de lámina de riego o láminas de reposición: 50, 75 y 100% de la ETo. Los tratamientos fueron distribuidos en un diseño completamente al azar con veinte muestras por cada tratamiento. Cada unidad experimental se distribuyó en 8 hileras de 28 m de longitud.

El método de riego fue por goteo, evaluado con eficiencia de uniformidad de 70% según el método de Karmeli y Keller (1975). Las características nominales son: diámetro interno de 16 mm, caudal de 2 l h⁻¹, espacio entre emisores de 0.3 m, y presión máxima de 10 m de columna de agua. El sistema de riego constituye una de las partes más importantes, ya que determina el régimen de riego del cultivo, en función de las características edáficas, meteorológicas y operación del sistema. El diseño agronómico se realizó posterior a la determinación de los coeficientes hídricos del suelo y el cultivo, velocidad de infiltración, capacidad de campo (CC), punto de marchitez permanente (PMP), evapotranspiración y densidad aparente del suelo, los parámetros de la secuencia del diseño se describen en la Tabla 1.

Tabla 1. Diseño agronómico para los tratamientos láminas de riego a diferentes etapas fenológicas.

Parámetros de diseño	Símbolo	Unidad	Etapla plántula	Etapla roseta	Etapla de maduración
Evapotranspiración	ETc	mm día ⁻¹	1.0	2.70	2.50
Profundidad radicular	Pr	cm	10	20	30
Agua disponible total (ADT)	ADT	mm	21.4	21.4	21.4
Agua fácilmente aprovechable	Zn	mm	2.85	5.7	8.55
Eficiencia de Aplicación	Ea	%	80.00	80.00	80.00
Frecuencia de riego	Fr	días	2.00	2.00	2.00
Lámina bruta corregida	Zbc	mm	3.486	8.853	8.217
Tiempo de Riego (100%) *L1	T1	min	12	30	24
Tiempo de Riego (75%) *L2	T2	min	9	22.5	18
Tiempo de Riego (50%) *L3	T3	min	6	15	12

*L1 = Lámina de riego uno; *L2 = Lámina de riego dos; *L3 = Lámina de riego tres.

Con el termómetro infrarrojo de pistola, equipado con un sensor que mide la radiación en la banda del infrarrojo emitida por los cuerpos hacia donde se apunta, se realizaron las siguientes mediciones: temperatura del cultivo, a través de un microprocesador interno que analiza los datos obtenidos para generar un reporte instantáneo del estado en que se encontraba el cultivo, indicando el estado de humedad, seco o dentro de los límites aceptables. Las mediciones se efectuaron entre 9:00 y 16:00 horas diariamente, la temperatura del aire medido con el termómetro infrarrojo, se emparejaron con los datos de temperatura de aire obtenidos de la estación meteorológica automática DAVIS instaladas en el lugar de experimentación obteniendo los datos de la humedad relativa, con las cuales se determinó el IEHC que fue calculado con la expresión propuesta por Idso (1981) y Jackson et al. (1981):

$$IEHC = \frac{[(Tc-Ta)m - (Tc-Ta)li]}{[(Tc-Ta)ls - (Tc-Ta)li]} \quad (2)$$

Dónde: T_c = temperatura del cultivo ($^{\circ}C$); T_a = temperatura del aire ($^{\circ}C$); m = diferencia medida entre las dos temperaturas; li = límite inferior de la diferencia entre las dos temperaturas cuando la evapotranspiración no está restringida por la disponibilidad de agua (cultivo bien regado); T_c = valor más bajo para las condiciones del clima; ls = límite superior de la diferencia hipotética entre las dos temperaturas cuando la evapotranspiración es cero como resultado de falta de disponibilidad de agua en el sistema suelo planta, atmosfera.

López et al. (2009) menciona que para determinar el límite superior e inferior de la ecuación se usa el método desarrollado por Idso y Clawson (1986), que considera los cambios en los límites inferior y superior debido a la variación del DPV, este déficit es la diferencia entre la presión de saturación a una temperatura de aire (e_s) y presión actual de vapor (e_a).

$$DPV = e_s - e_a \quad (3)$$

Dónde: e_s = presión de saturación a una temperatura de aire (kPa); e_a = presión actual de vapor (kPa).

La presión de vapor de agua a saturación e_s en kPa es la máxima cantidad de vapor de agua que puede contener el aire a una temperatura ($^{\circ}C$), calculado con la siguiente ecuación.

$$e_s[T^{\circ}] = 0.611 \exp \left[\frac{17.27 T^{\circ}}{T^{\circ} + 237.3} \right] \quad (4)$$

Dónde: T° = temperatura de aire ($^{\circ}C$).

La presión de vapor de agua actual (e_a), se calculó con el uso de la Humedad Relativa (HR) y despejando la expresión considerando presión de vapor de agua a saturación (e_s).

$$HR = \left[\frac{e_a}{e_s} \right] \times 100 \quad (5)$$

Dónde: HR = humedad relativa.

La determinación del límite inferior y superior del IEHC fue calculado a partir de la diferencia de temperatura del cultivo y del aire circundante, como variable dependiente, la relación de DPV como variable independiente, obteniéndose la regresión lineal y su ecuación con la siguiente expresión:

$$T_c - T_a = a + b * DPV \quad (6)$$

Dónde: $T_c - T_a$ = diferencia de temperatura de cultivo y aire circundante ($^{\circ}C$); DPV = Déficit de Presión de Vapor (kPa); a = intercepto; b = pendiente de la ecuación.

El límite inferior se determinó a partir del tratamiento de lámina de riego 100%ETc considerando que las temperaturas del cultivo son menores que las temperaturas del aire, es decir un cultivo con transpiración, sin estrés hídrico y bien regado.

El límite superior se obtuvo a partir de mediciones realizadas en el tratamiento de lámina de riego 50%ETc, que es severamente estresado por el déficit hídrico con problemas de transpiración tomando en cuenta que la temperatura de cultivo es mayor que la de aire.

Con el propósito de encontrar una relación entre el índice de estrés con las variables estudiadas y el rendimiento del cultivo, se efectuó un análisis de regresión. Así fue posible seleccionar las funciones con mayores coeficientes de correlación (r) y determinación (r^2), al igual que para encontrar la relación y el efecto de las láminas de riego al IEHC a través de funciones exponenciales.

Para observar y diferenciar el efecto de las láminas de riego en cuanto al desarrollo fenológico de la planta se evaluaron las variables fisiotécnicas o agronómicas, con las que se identificó si existe una diferencia significativa o no entre los tratamientos aplicados a través de un análisis de varianza estadística.

En la obtención de los parámetros de programación de riego se integraron las variables; lámina de riego, rendimiento e IEHC, a partir de un análisis de varianza se obtuvieron los rangos de IEHC óptimos para el riego sin reducción de rendimiento, y los rangos negativos o críticos de estrés con reducción de rendimiento total y muerte de la planta.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Límite inferior y superior del Índice de Estrés Hídrico del cultivo de lechuga

Se compararon las variables obtenidas de la diferencia entre la temperatura de cultivo y el aire circundante, asimismo, se utilizó el déficit de presión de vapor para el horario de la medición de 10:00 am a 4:00 pm en los meses de mayo, junio y julio, con ella se consiguió el

parámetro de la variable dependiente (diferencia de temperatura) y variable independiente (déficit de presión de vapor) para obtener la regresión lineal entre las dos variables.

De acuerdo a los límites inferiores con lámina de riego 100%ET_c, el modelo $T_c - T_a = -2.9315 * DPV + 1.2851$ (Figura 1) tiene un coeficiente de determinación de 0.5151 y coeficiente de correlación de 0.72 con n=82, el tratamiento con lámina de riego 75%ET_c muestra el modelo $T_c - T_a = -2.9623DPV + 1.2192$ (Figura 2) con coeficiente de determinación de 0.4918 y coeficiente de correlación de 0.70 con n=79.

El límite superior para el cálculo del IEHC, es la diferencia de la temperatura del aire y del cultivo asociada a períodos de mayor estrés dado por limitaciones de agua con lámina de riego de 50%ET_c, cuando no existe transpiración por parte del cultivo. Los datos obtenidos del T3, durante el periodo de plántula, roseta y maduración es de 2.82°C, con n=42. De acuerdo con el método propuesto por Idso (1981), se reportó 3.17°C, para el cálculo del límite superior en el cultivo de lechuga del IEHC. López et al. (2009), obtuvo un valor promedio de 2.8 °C con n=25, para el cultivo de tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.).

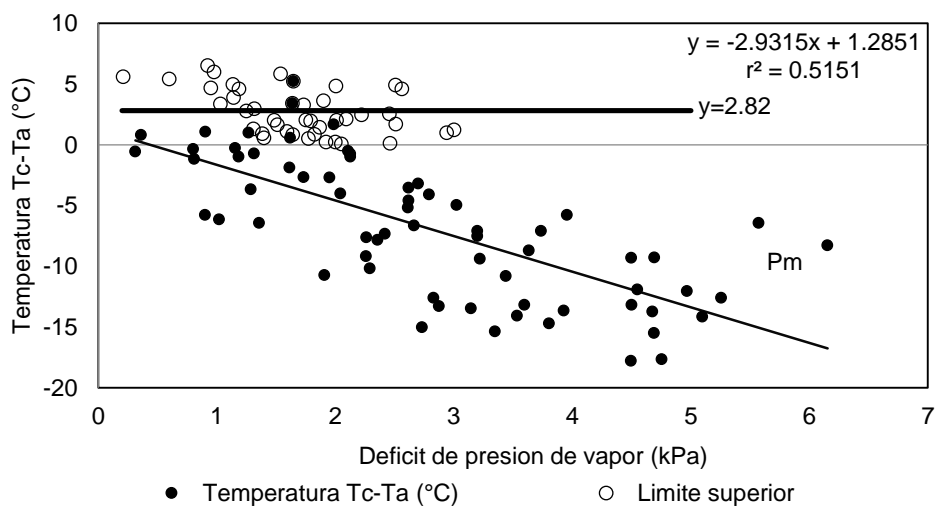


Figura 1. Límite inferior y superior del tratamiento con lámina de reposición al 100%ET_c.

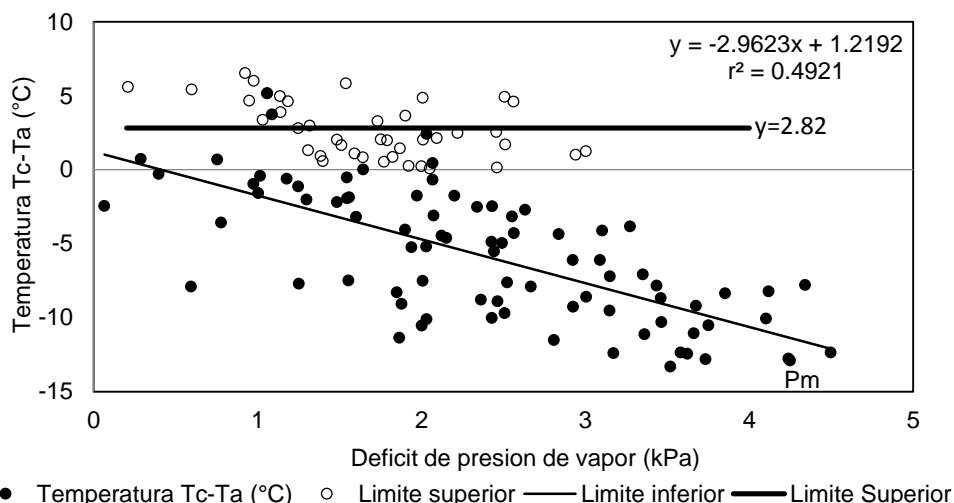


Figura 2. Límite inferior y superior del tratamiento de lámina de reposición al 75%Etc.

En la Figura 1 el cálculo del IEHC a partir del punto (Pm) indica que la planta no se encuentra en estrés hídrico. La presión de saturación de presión del aire es 4.16, presión actual de vapor 0.9568, el déficit de presión de vapor 3.19 kPa, la diferencia de temperatura de temperatura de límite inferior del IEHC es -8.07°C, resultando en un IEHC de 0.0896.

Efecto de la lámina de riego en variables agronómicas

Las variables agronómicas de altura de planta, número de hoja, ancho de hoja, peso de materia verde, peso de materia seca y rendimiento, fueron evaluadas mediante un análisis estadístico para determinar la diferencia existente entre los tratamientos, con la prueba de Duncan al 0.01% (Tabla 2).

Tabla 2. Análisis de varianza IEHC.

Tratamiento	Altura de Planta (cm)	Número de hojas	Ancho de hoja (cm)	Peso de materia verde (g)	Peso de materia seca (g)	Rendimiento (kg m ⁻²)
T1-100%Etc	22.18 ^a	10.19 ^a	14.53 ^a	170.80 ^a	10.58 ^a	3.43 ^a
T2-75%Etc	21.29 ^a	9.63 ^a	12.56 ^a	162.73 ^a	9.51 ^a	3.17 ^a
T3-50%Etc	10.12 ^b	6.94 ^a	5.78 ^b	95.55 ^b	8.17 ^a	1.70 ^b
CV (%)	25.27	44.58	50.30	46.86	44.91	15.83

Medias con la misma letra dentro de la misma columna son estadísticamente iguales (Duncan, P=0.01), C.V.=coeficiente de variación.

Barrios (2004), reporta que la lechuga de la variedad Grand Rapid alcanza una altura de 23 cm, a los 80 días después de la siembra en un sistema semihidropónico. Barrientos (2014) indica que la lechuga crespa de variedad Waldman Green, presenta un crecimiento de 28.39 cm a 120 días del trasplante. Robledo *et al* (2004), reportó un crecimiento promedio del cultivo de lechuga variedad Kagraner summer de 19.51 cm, el cual se realizó con un riego de 2 veces por día, en sistema de plantación de microtúneles con cubiertas foselectivas.

Investigaciones anteriores de Barrientos (2011), mencionan que la lechuga crespa variedad Grand Rapid, presentó un desarrollo de 8 a 12.69 hojas maduras, con evaluación de cubiertas de plástico

(AGROFILM) para ambientes atemperados en tres localidades del departamento de La Paz. Barrios (2004), indica que la lechuga Variedad Grand Rapid desarrolló 30 hojas en sistema semihidropónico a los 80 días después del trasplante. Robledo (2004), indica el desarrollo de número de hojas promedio, del cultivo de lechuga variedad Kagraner summer de 9.64 hojas bajo riego de 2 veces por día.

En cuanto al ancho de hoja, Barrientos (2014) señala que la lechuga crespa variedad Waldman Green, tiene ancho de mayor de 27.64 cm, para un tiempo de 120 días desde la siembra en invernadero. Barrientos (2011), menciona que la variedad Grand Rapid, presenta un ancho de hojas promedio de 10.59 a 16.49 cm en ambientes atemperados.

Con relación peso fresco o materia verde, Defilipis et al. (2004), reportó que la lechuga crespa variedad Grand Rapid, presenta peso fresco 249.59 gramos planta⁻¹ para un nivel de riego de 100% del consumo de agua por parte de la lechuga, 254.97 gramos planta⁻¹ para un nivel de riego de 75% y 246.87 gramos planta⁻¹, para un nivel de riego de 50% en ambientes controlados para un ciclo de producción de 98 días. Barrientos (2014), obtuvo un peso de planta de 271.02 gramos de lechuga crespa de la variedad Waldman Green en 120 días en invernadero con dosificación de riego diario. Barrientos (2011) informó que la lechuga de variedad Grand Rapid, alcanzó un peso por unidad de planta de 120.43 a 80.10 gramos. Robledo (2004) consiguió 129.88 gramos planta⁻¹ en peso fresco de la variedad Kagraner Summer.

En cuanto a materia seca Defilipis et al. (2004), indicaron que la lechuga crespa variedad Grand Rapid, tiene peso seco de 12.15 gramos planta⁻¹ para un nivel de riego de 100% del consumo de agua por parte de la lechuga, 11.32 gramos planta⁻¹ para un nivel de riego de 75% y 10.95 gramos planta⁻¹, para un nivel de riego de 50% en ambientes controlados, observándose diferencias significativas entre el tratamiento identificado. Barrientos (2014), alcanzó un peso seco de planta de 94.14 gramos planta⁻¹, Robledo (2004) reportó un peso seco en la variedad Kagraner Summer de 13.43 gramos planta⁻¹, el cual se realizó con un riego de 2 veces por día, en sistema de plantación de microtúneles con cubiertas fotoselectivas.

Efecto de la lámina de riego en el índice de estrés hídrico

Con los datos de IEHC se realizó el análisis de varianza para determinar la diferencia altamente significativa entre los tratamientos, a una probabilidad de 1%, existiendo una interacción entre las láminas de riego y el IEHC (Tabla 3).

Tabla 3. Análisis de varianza IEHC.

FV	GL	SC	CM	FC	FT	P (0.01)
Muestra	2	0.5418	0.2709	7.01	4.85	0.0015**
Error	90	3.4759	0.0386			
Total	92	4.01772094				

** = altamente significativo, ns= no significativo.

En la prueba de Duncan el grupo A involucra a los T1 con 0.24 y T2 con 0,31, el grupo B contiene el T3 con un valor de 0.50. El efecto observado de la lámina de riego en los tratamientos con los valores del índice de estrés hídrico, se expresaron a través de modelos exponenciales resaltando alta relación estadística entre las láminas de riego y los coeficientes de IEHC, para las etapas fenológicas de plántula, roseta y maduración, los valores obtenidos son resultado del promedio de los valores del IEHC para los diferentes tratamientos (Tabla 4).

Tabla 4. Prueba Duncan de IEHC.

Tratamiento	Media	Duncan
T1-100%Etc	0.24	A
T2-75%Etc	0.31	A
T3-50%Etc	0.50	B

Medias con la misma letra dentro de la misma columna son estadísticamente iguales (Duncan, P=0.01).

El efecto observado en la fase de plántula del cultivo, muestra un modelo exponencial positivo con la función $y = 0.0126 e^{0.0355x}$, con un coeficiente de correlación de 0.974 expresando el alto grado de relación entre las variables de índice de estrés hídrico de cultivo frente a las láminas de riego aplicadas.

La función o modelo de la Figura 3 es contraria al resultado esperado, esto se debe a la fuga de agua de la carpa contigua que llegó a infiltrar y afectar a los T1-100ETc y T2-75%ETc, en la fase de plántula del cultivo de dichos tratamientos, tuvo estrés hídrico por exceso de humedad, ocasionando valores incrementados a comparación del T3-50%ETc.

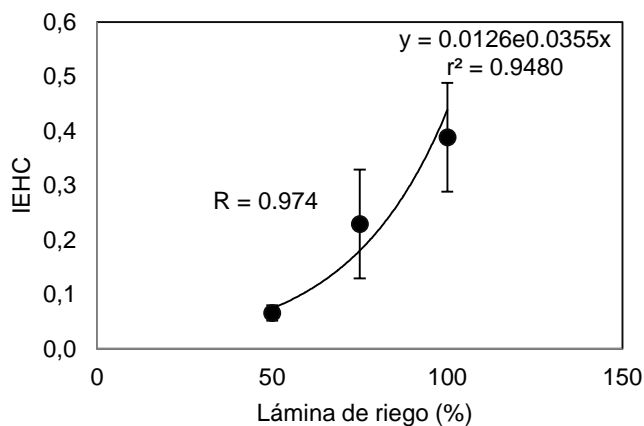


Figura 3. Estimación del IEHC de lechuga a partir de la lámina de riego en fase de plántula.

La fase fenológica roseta del cultivo presenta un modelo exponencial negativo, a medida que la lámina de riego aumenta los valores del IEHC disminuyen, expresando el modelo de $IEHC = 1.0463e^{-0.017x}$, con un coeficiente de correlación de 0.8324, observando alta significancia y relación entre las láminas aplicadas por tratamientos y los valores de IEHC (Figura 4).

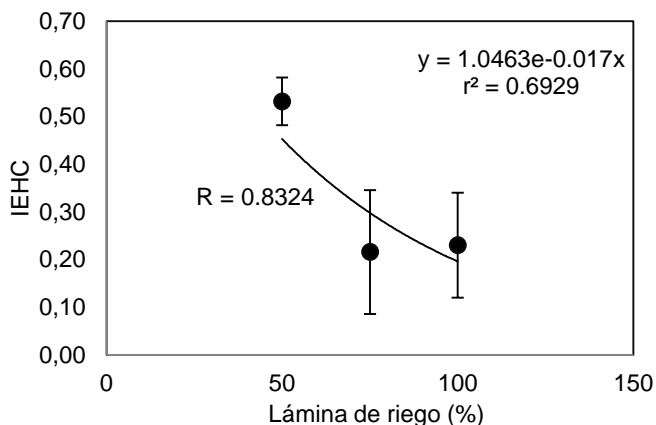


Figura 4. Estimación de IEHC de lechuga a partir de la lámina de riego en fase de roseta.

En la fase fenológica de maduración del cultivo, la función exponencial es $IEHC = 1.2628e^{-0.012x}$ con un coeficiente de correlación de 0.9902, en la etapa presenta un incremento más notable del índice de estrés hídrico por lámina de riego, tras la disminución de la humedad en el suelo (Figura 5).

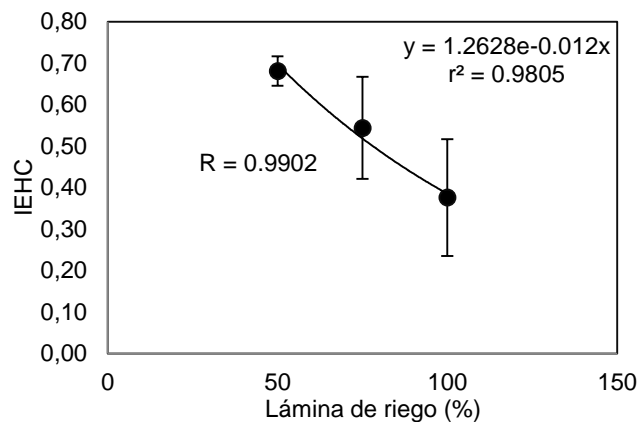


Figura 5. Estimación del IEHC de lechuga a partir de la lámina de riego en fase de maduración.

Efecto del índice de estrés hídrico en el rendimiento del cultivo

Para determinar el efecto en el rendimiento del cultivo de lechuga, por el índice de estrés hídrico, se correlacionaron los valores del índice en las etapas fenológicas del cultivo, obteniendo un modelo lineal que expresa el rendimiento como $Y = 40.01 - 40.566 * IEHC$, con un coeficiente de determinación de 0.6846, correlación de 0.8274 y $n=9$ (Figura 6).

Se deduce que a través de la función del rendimiento del cultivo, esta llega a reducir cuando el índice de estrés hídrico es diferente a cero, disminuyendo proporcionalmente al incremento del índice de estrés hídrico, por ejemplo, cuando es 0 el rendimiento de lechuga es de 40 t ha^{-1} , pero el rango observado del IEHC en el cultivo es de 0.24 a 0.49, obtenida del análisis de varianza de los valores del índice de estrés hídrico para los diferentes tratamientos en las fases de roseta y maduración. Por lo tanto, para un índice de estrés hídrico de 0.24, se llega a un rendimiento de 30.27 t ha^{-1} , o 3.027 kg m^{-2} según el modelo de rendimiento obtenido (Figura 6).

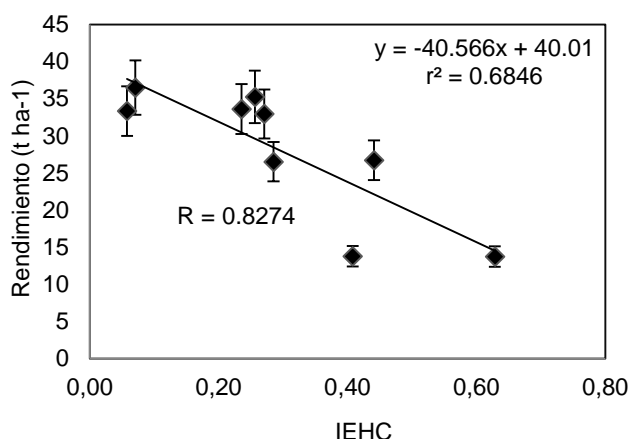


Figura 6. Rendimiento del cultivo de la lechuga en función al IEHC.

Los rendimientos en la evaluación de frecuencias de riego por gravedad de 1, 2 y 3 veces por semana fueron de 23.4 t ha⁻¹, 34.2 t ha⁻¹, 36.4 t ha⁻¹, en la zona de La Esperanza, Intibucá, Honduras (FHAJ, 2004).

El cultivo de lechuga en sistemas orgánicos es viable y altamente productivo con 9 plantas m⁻² en el punto de

producción más alto con 2.44 kg m⁻² equivalente a 24.4 t ha⁻¹ apto para cualquier época del año, la única variación es el tiempo de cosecha que depende del clima (Barrientos, 2014). Barrios (2004) indica que la variedad Grand Rapids tiene un rendimiento (2.20 kg 1.20 m⁻²) semejante a 18.33 t ha⁻¹.

Programación de riego para los índices de estrés hídrico

Para la programación de riego, en base a los IEHC, se obtuvo la media de prueba de significancia de los valores, considerando el estrés hídrico como límite para establecer el riego en el cultivo (Tabla 5).

La Tabla 5 muestra una síntesis de las medias del análisis de varianza del IEHC y el rendimiento en base a los tratamientos aplicados, estas llegan a tener diferencias significativas entre los T1, T2, respecto al T3, estos valores se tomaron como base para obtener los límites de estrés para la programación de riego.

Tabla 5. Análisis de varianza del rendimiento.

Tratamientos	Aplicación de riego total (mm)	Media de IEHC	Total rendimiento (t ha ⁻¹) y (kg m ⁻²)
T1-100%Etc	411.2	0.240 (a)*	31.71 (a); 3.17
T2-75%Etc	308.4	0.309 (a)	34.36 (a); 3.46
T3-50%Etc	205.6	0.499 (b)**	17.07 (b); 1.70

*Valores con la misma letra dentro de la columna son iguales de acuerdo con la prueba Duncan a una P≤0.01

**Valores con diferente letra dentro de la columna son distintos de acuerdo con la prueba Duncan a una P≤0.01 presentando diferencias significativas entre los tratamientos.

En la Figura 7 el límite donde la planta no se encuentra en estrés, es con los valores de 0 a 0.23 del IEHC, los valores con estrés relativo y necesidad del suministro de riego se encuentra en los rangos de 0.24 a 0.31 para obtener rendimientos de 3.17 a 3.44 kg m⁻², los valores

de estrés en mayor magnitud se encuentra en los valores de 0.32 a 0.50 influenciando en el rendimiento hasta 1.7 kg m⁻². Los valores del índice de estrés hídrico en los rangos 0.56 a 1.00 resultan en la muerte del cultivo.

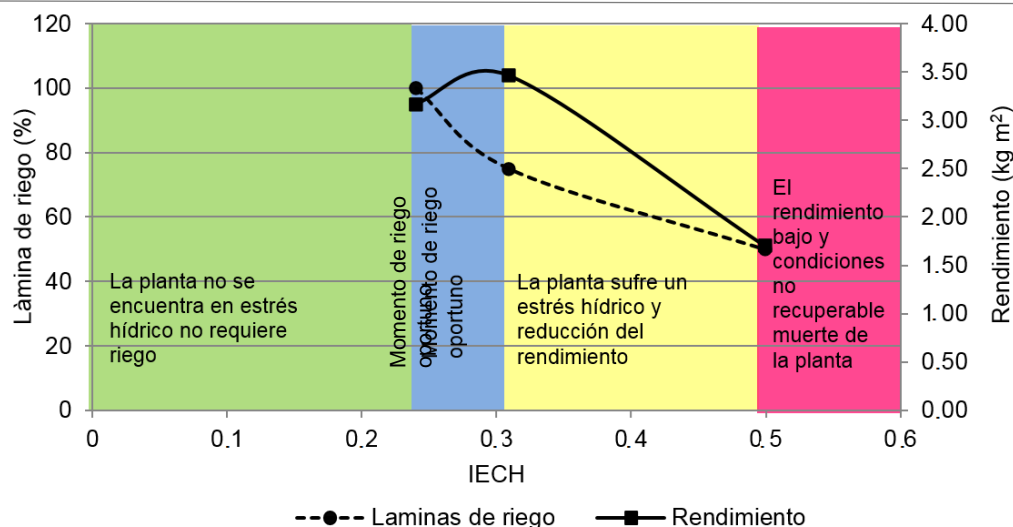


Figura 7. Programación de riego en función al IEHC vs rendimiento.

Şimşek et al. (2005), realizó estudios en el efecto de diferentes láminas de riego por goteo en el rendimiento del pepino (*Cucumis sativus* L.) para determinar un valor de umbral del IEHC basado en la programación del riego, con cuatro tratamientos de riego: 50%, 75%, 100% y 125% con la evaporación de un tanque “A”, la producción comercial máxima del fruto se obtuvo con el T1-100%Etc con 76.65 t ha⁻¹ en 2002 y 68.13 t ha⁻¹ en 2003 y redujo el rendimiento cuando disminuyó la lámina de riego. Cuando disminuyó la lámina de riego, la tasa de transpiración del cultivo disminuyó aumentando la temperatura del dosel del cultivo y del IEHC, esto resultó en una disminución en el rendimiento. Un IEHC igual que 0.2 se considera como el valor umbral para el inicio del riego en el cultivo de pepino producido a campo abierto en condiciones semiáridas.

Nielsen (1990), utilizó diferentes umbrales de IEHC con 0.2, 0.3, 0.4 y 0.5 en la programación del riego en el cultivo de soya (*Glycine max* L. Merrill.) con riego por goteo, aplicándose láminas de 180, 181, 174 y 145 mm, los rendimientos obtenidos fueron 2.656, 2.566, 2.430, y 2.189 kg ha⁻¹ respectivamente. Los rendimientos se incrementaron ligeramente cuando aumentó la lámina de riego en 25 y 51 mm adicionales, y presentó las mismas tendencias cuando se incrementó el umbral de IEHC.

Hutmacher et al. (1991) en el cultivo de alfalfa (*Medicago sativa* L.) encontraron que los valores de IEHC fueron altamente y linealmente correlacionados con el potencial hídrico del tallo, concluyendo que el uso de la línea base sin estrés en el período vegetativo para calcular los valores durante la floración y llenado de vaina fueron 0.1 a 0.2 más altos que los determinados usando líneas base que depende de la etapa de crecimiento. En la programación del riego, sugieren el uso de dos líneas base, una para el período vegetativo y otra determinada mediante una base de datos de los períodos de floración y llenado de vaina.

CONCLUSIONES

Los tratamientos utilizados para obtener los modelos de límite inferior del índice de estrés hídrico del cultivo, fueron las láminas de 100%Etc y 75%Etc, mientras que para el límite superior se utilizó la lámina de 50%Etc, obteniendo los modelos $T_c - T_a = -2.9315 * DPV + 1.2851$, con un coeficiente de determinación de 0.5151 y coeficiente de correlación de 0.72. El tratamiento con lámina de riego 75%Etc, presenta el modelo de $T_c - T_a = -2.9623DPV + 1.2192$, con un coeficiente de determinación de 0.4918 y un coeficiente de correlación de 0.70 con n=79 y un límite superior de 2.82.

Las variables agronómicas evaluadas tienen diferencias estadísticas, los tratamientos 100%ETc, 75%ETc respecto al 50%ETc, a excepción de la variable de número de hojas, con referencia a la programación de riego, se la realiza en base a los valores de 0 a 0.23 del (IECH), los valores que presentan un estrés relativo y existe la necesidad del suministro de riego se encuentra en los rangos de 0.24 a 0.31 para obtener rendimientos de 3.17 a 3.44 kg m⁻², la planta presenta un estrés de mayor magnitud cuando se encuentra en los valores de 0.32 a 0.50, donde tiene influencia en el rendimiento del cultivo hasta 1.7 kg m⁻², en cuanto a los valores del índice de estrés hídrico en los rangos 0.56 a 1, las características del cultivo presentarían aparte de una reducción absoluta del rendimiento, la muerte del cultivo.

BIBLIOGRAFÍA

- Barrientos, H., 2014. Análisis de crecimiento funcional, acumulación de biomasa y translocación de materia seca de ocho hortalizas cultivadas en invernadero. Tesis de Maestría. La Paz, Bolivia.
- Barrientos, H., 2011. Determinación de la intensidad lumínica en plásticos de cubierta (agofilm) para ambientes atemperados en tres localidades del departamento de la paz. Tesis de Licenciatura. La Paz - Bolivia.
- Barrios, E. 2004. Evaluación del cultivo de la lechuga, *Lactuca sativa* L. Bajo condiciones hidropónicas en Pachalí, San Juan Sacatepéquez, Guatemala. Tesis de Licenciatura. Universidad de San Carlos de Guatemala Instituto de Investigaciones Agronómicas. Guatemala.
- Bucks, D., Nakavamma, F., French, O., Regard, W., Alexander, W. 1985. Irrigated guayule evapotranspiration and plant water stress. *Agricultural water management* 10: 61-79.
- Defilipis, C., Pariani, S., Jimenez, A., Bouzo, C., 2004. Respuesta al riego de lechuga (*Lactuca sativa* L.) cultivada en invernadero. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional del Litoral, Argentina.
- Feldhake, C., Glenn, D., Edwards, W., Peterson, D. 1997. Quantifying drought for humid, temperate pastures using the Crop Water Stress Index (IEHC). *New Zealand Journal of Agricultural Research*, v. 40: 17-23.
- Fundación Hondureña de Investigación Agrícola (FHAI). 2004. Proyecto de investigación y validación de tecnologías modernas en producción de hortalizas de clima frío. Evaluación de 3 frecuencias de riego por gravedad en el cultivo de Lechuga (*Lactuca sativa*) en la zona de La Esperanza, Intibucá.
- Giuliani, R., Magnanini, E., Flore, J. 2001. Potential use of infrared thermometry for the detection of water deficit in apple and peach orchards. *Acta Horticulturae (ISHS)*. 557: 38-43.
- Hutmacher, R., Steiner, J., Vail, S., Ayars, J. 1991. Crop water stress index for seed alfalfa: influences of within-season changes in plant morphology. *Agricultural Water Management*. 19:135-149.
- Idso, S., Clawson, K. 1986. Foliage temperature: effects of environmental factors with implications for plant water stress assesment and the CO₂/Climate connection. *Water Resources Research*, 22(12): 1133-1138.
- Idso, S. 1981. Non – water – stressed baselines, a key to measuring and enterpreting plant water stress. *Agricultural Meteorology*, 27: 59 – 70.
- Jackson, R., Idso, S., Reginato, R., Pinter, P. 1981. Canopy Temperature as a crop water stress indicator. *Water Resources Research* 17:1133.
- Karmeli, D., Keller, J. 1975. Trickle irrigation design. 1st. edition. Rain Bird Sprinkler Manufacturing Corporation, Glendora, California U.S.A. 133 p.

López, R., Arteaga R., Vázquez, M., López, I., Sánchez, I. 2009. Evapotranspiración del cultivo de tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.) estimada mediante el potencial mátrico del suelo husk tomato (*Physalis ixocarpa* Brot.) Crop Evapotranspiration Estimated by Soil Matric Potential. Rev. Fitotec. Mex. v. 33 (2): 157 – 168, 2.

López, R., Arteaga, R., Vázquez, M., López, I., Sánchez, I. 2009. Índice de estrés hídrico como un indicador del momento de riego en cultivos agrícolas. Rev. Agricultura Técnica en México. v. 35 n.1, p. 97-111.

Nielsen, D. 1990. Scheduling irrigations for soybeans with the crop water stress index (CWSI). Field Crops Res. 23:103-116.

Robledo, T., Ramírez, G., Hernández, D. J., Domínguez, R., Portos, G. 2004. Comportamiento agronómico de plántulas de lechuga desarrolladas en microtúneles con cubiertas fotoselectivas. Buena Vista – México.

Şimşek, M., Tonkaz T., Kaçira, M., Çömlekçioğlu, N., Doğan, Z. 2005. The effects of different irrigation regimes on cucumber (*Cucumis sativus* L.) yield and yield characteristics under open field conditions. Agricultural Water Management. 73:240-252.

Artículo recibido en: 3 de marzo 2017

Aceptado en: 4 de mayo 2017