
EFECTO DE LA DISPONIBILIDAD DE AGUA DE RIEGO EN EL INTERCAMBIO GASEOSO, RENDIMIENTO DE SEMILLAS, BIOMASA Y EFICIENCIA DEL USO DEL AGUA EN DOS FENOTIPOS DE CHÍA ESTABLECIDOS EN EL VALLE DE AZAPA, ARICA, CHILE

Hugo Escobar, Lady Solís de Ovando, Diana Contreras, Cecilia Baginsky, Jorge Arenas y Herman Silva

RESUMEN

El norte de Chile es una zona de escasos recursos hídricos, en pleno desierto de Atacama y, por ello, el agua que se obtiene desde la cordillera de Los Andes, adquiere un alto interés. En este trabajo se analiza el efecto de diferentes cargas de agua de riego en el intercambio gaseoso, rendimiento de semillas, biomasa y eficiencia del uso del agua en dos fenotipos de chía (*Salvia hispanica* L.), blanca y oscura. Las observaciones se realizaron en las etapas de floración y de madurez fisiológica. El experimento se instaló en condiciones de campo y bajo tres regímenes hídricos: 100, 70 y 40% de la evapotranspiración potencial (ET_p). Los parámetros de intercambio gaseoso no presentan diferencias significativas entre los tratamientos hídricos; no obstante, difieren entre las etapas fenológicas, disminuyendo en función de la senescen-

cia. En ambos fenotipos la eficiencia intrínseca del uso del agua (EUA-intr) no presenta diferencias entre los tratamientos hídricos ni entre los dos momentos de medición, excepto la chía oscura en el tratamiento con menor disponibilidad de agua. La eficiencia del uso del agua en la producción de biomasa (EUA-biomasa) no mostró diferencias significativas entre los tratamientos hídricos en las diferentes etapas fenológicas. En chía blanca, el rendimiento de semilla no difiere significativamente entre los tratamientos, a diferencia de la chía oscura, cuyo rendimiento aumenta en relación directa con la disponibilidad hídrica. En ambos fenotipos la eficiencia del uso del agua en el rendimiento de semilla (EUA-semilla) fue significativamente mayor en plantas con menor disponibilidad de agua.

Introducción

En el año 3500 a.C. la chía fue uno de los alimentos que las civilizaciones precolombinas de América Central, como mayas y aztecas, consumían junto con porotos (*Phaseolus vulgaris* L.) y maíz (*Zea mays* L), entre aquellos más usados (Ayerza y Coates, 2004). Con la llegada de los españoles a América, la introducción de otros cultivos desplazó el consumo de plantas nativas, las que fueron quedando en el olvido. Sin embargo, la conservación de la chía fue posible en las áreas montañosas de México, donde existe la

mayor diversidad genética de esta especie (Hernández *et al.*, 2008).

El cultivo de la chía resurgió a finales del siglo pasado, siendo considerada como la especie vegetal con más alto contenido de omega-3 (Ayerza y Coates, 2006, 2011), aunque también se le reconoce como fuente de omega-6, proteínas, antioxidantes y fibras solubles e insolubles (Busilacchi *et al.*, 2013). Su contenido de proteína fluctúa entre 19 y 26,5% (Weber *et al.*, 1991). No contiene gluten, siendo un alimento nutritivo, saludable y apto para celíacos (Rovati *et al.*, 2012). Hoy en día, este

cultivo está siendo reintroducido a las dietas occidentales para mejorar la salud humana, expandiéndose su producción y comercialización en países como Argentina, México, Bolivia, Paraguay y Ecuador.

La sequía y la salinidad están entre los factores abióticos más importantes que limitan la capacidad productiva de las plantas (de Santana *et al.*, 2015). Esta situación podría agravarse en los próximos años en Chile, ya que en su zona central es uno de los países susceptibles de sufrir reducción de las precipitaciones, producto del cambio climático mundial (Molina-

Montenegro *et al.*, 2011; Silva *et al.*, 2016). El sistema agrícola comienza a ser deficiente, respecto del uso del agua, cuando ésta se pierde sin lograr producción de biomasa; las pérdidas se producen por escurrimiento, evapotranspiración y el consumo por las malezas. La transpiración es la única pérdida de carácter productivo con relación al balance que se produce con el ingreso de CO₂ a través del mismo órgano, el estoma, cuyo mecanismo fisiológico de apertura y cierre dependerá de los factores ambientales y de la especie vegetal (Medrano *et al.*, 2007). El

PALABRAS CLAVE / Chía / Déficit Hídrico / Eficiencia de Uso del Agua / Intercambio Gaseoso /

Recibido: 23/08/2016. Modificado: 02/01/2018. Aceptado: 05/01/2018.

Hugo Escobar. M.Sc. en Fruticultura, Colegio de Postgraduados, México. Doctor en Ciencias Silvoagropecuarias y Veterinarias. Universidad de Chile Dirección: Laboratorio de Cultivo de Tejidos Vegetales, Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de

Tarapacá. 18 de Septiembre 2222, Arica, Chile. e-mail: hescobar@uta.cl

Lady Solís de Ovando. Ingeniera Agrónoma, Universidad de Tarapacá, Chile.

Diana Contreras. Ingeniera Agrónoma, Universidad de Tarapacá, Chile.

Cecilia Baginsky. Doctora en Biología, Universidad Politécnica de Madrid, España. Académico, Universidad de Chile.

Jorge Arenas. M.Sc. en Producción Vegetal y Doctor, Universidad de Chile. Académico, Universidad Arturo Prat, Chile.

Herman Silva. M.Sc., Universidad de Chile. Doctor, Université des Sciences et Techniques, Montpellier II, Francia. Académico, Universidad de Chile.

EFFECT OF IRRIGATION WATER AVAILABILITY ON GAS EXCHANGE, SEED YIELD, BIOMASS AND WATER USE EFFICIENCY IN TWO CHIA PHENOTYPES ESTABLISHED IN AZAPA VALLEY, ARICA, CHILE

Hugo Escobar, Lady Solís de Ovando, Diana Contreras, Cecilia Baginsky, Jorge Arenas and Herman Silva

SUMMARY

Northern Chile has scarce water resources due to the Atacama Desert. Thus, water obtained from The Andes range has great interest. This study analyzes the effect of different amounts of irrigation water on gas exchange, seed yield, biomass and water use efficiency in two chia (*Salvia hispanica* L.) phenotypes, white and black. We performed measurements during flowering and at physiological maturity. The experiment was installed in field conditions under three water regimes: 100, 70 and 40% of the evapo-transpiration potential (ET_p). No significant differences were found in gas exchange parameters among treatments, but there were differences between

sampling times, decreasing as a function of senescence. Intrinsic water use efficiency (WUE_{intr}) was not different between treatments or on the two measuring dates in either phenotype, except for black in the treatment with least water. The water use efficiency in biomass production (WUE_{biomass}) did not show significant differences between treatments in either phenological stage. Seed yield was not significantly different between treatments in white chia, while in dark chia seed yield increase was directly related to water availability. In both phenotypes, the WUE referring to seed yield (WUE_{seed}) was significantly greater in plants with less water availability.

EFEITO DA DISPONIBILIDADE DE ÁGUA PARA IRRIGAÇÃO NO INTERCÂMBIO GASOSO, RENDIMENTO DE SEMENTES, BIOMASSA E EFICIÊNCIA DO USO DA ÁGUA EM DOIS FENÓTIPOS DE CHIA ESTABELECIDOS NO VALE DE AZAPA, ARICA, CHILE

Hugo Escobar, Lady Solís de Ovando, Diana Contreras, Cecilia Baginsky, Jorge Arenas e Herman Silva

RESUMO

O norte do Chile é uma região de escassos recursos hídricos em pleno deserto de Atacama e, por isto, a água que se obtém desde a cordilheira dos Andes, ganha alto interesse. Neste trabalho é analisado o efeito de diferentes volumes de água para irrigação no intercâmbio gasoso, rendimento de sementes, biomassa e eficiência do uso da água em dois fenótipos de chia (*Salvia hispanica* L.), branca e escura. As observações foram realizadas nas etapas de floração e de maturidade fisiológica. O experimento foi instalado em condições de campo e sob três regimes hídricos: 100, 70 e 40% de evapotranspiração potencial (ET_p). Os parâmetros de intercâmbio gasoso não apresentam diferenças significativas entre os tratamentos hídricos; no entanto, diferem entre as etapas fenológicas, diminuindo em função da

senescência. Em ambos os fenótipos, a eficiência intrínseca do uso da água (EUA_{intr}) não apresenta diferenças entre os tratamentos hídricos e tampouco entre os dois momentos de medição, exceto a chia escura no tratamento com menor disponibilidade de água. A eficiência do uso da água na produção de biomassa (EUA_{biomassa}) não mostrou diferenças significativas entre os tratamentos hídricos nas diferentes etapas fenológicas. Na chia branca, o rendimento de semente não difere significativamente entre os tratamentos, diferentemente da chia escura, cujo rendimento aumenta em relação direta com a disponibilidade hídrica. Em ambos os fenótipos, a eficiência do uso da água no rendimento de semente (EUA_{semente}) foi significativamente maior em plantas com menor disponibilidade de água.

concepto de la eficiencia del uso del agua corresponde a la cantidad de biomasa o de granos en relación al agua consumida por transpiración, evapotranspiración o total de agua aplicada al sistema, mientras que las escalas de medición pueden ser instantánea, diaria o estacional (Sinclair *et al.*, 1984; Gardner *et al.*, 1985; Yang *et al.*, 2016).

Las plantas que crecen en condiciones de limitada disponibilidad de agua reducen el crecimiento celular, disminuyen el área foliar, reducen la fotosíntesis y consecuentemente disminuyen la producción y el rendimiento de los cultivos (Acevedo *et al.*, 1998). Para no afectar el rendimiento de un cultivo y mantener una condición hídrica favorable bajo estrés hídrico, las plantas poseen

una serie de adaptaciones anatómicas, morfológicas y fisiológicas que evitan la pérdida de agua y mejoran la absorción de ésta (Ennajeh *et al.*, 2008). El efecto de la falta de agua será diferente según la etapa en que se aplique el déficit al cultivo. Un déficit moderado en la etapa de crecimiento vegetativo puede acelerar la maduración y no afectar el crecimiento en chia, sin embargo, en la floración este déficit puede afectar seriamente la formación del grano de polen y la fecundación.

La agricultura en el desierto del norte de Chile se realiza en función exclusiva del agua de riego captada de escurrimientos superficiales y freáticos desde la cordillera de Los Andes, acuífero que es alimentado por las escasas precipitaciones de la alta cordillera. El agua de riego

se considera, por lo tanto, un recurso natural escaso que limita la superficie de cultivo, principalmente en zonas áridas y semiáridas (Shanshan *et al.*, 2016). En este sector, gran parte de los recursos hídricos disponibles, son de baja calidad con altos contenidos de sales y boro (Torres y Acevedo, 2008).

Poco se conoce del cultivo de la chia en condiciones áridas y específicamente de su capacidad de tolerar condiciones de sequía y/o salinidad. Este estudio analiza el efecto de diferentes cargas de agua de riego para comprobar a nivel de crecimiento, rendimiento de semillas, respuestas fisiológicas de intercambio gaseoso y eficiencia del uso del agua, cual es la capacidad de tolerancia que esta planta presenta al déficit hídrico.

Materiales y Métodos

Lugar del estudio

El estudio se llevó a cabo entre los meses de marzo y julio del 2014 en el valle de Azapa, XV Región de Arica y Parinacota (18°31'S y 70° 10'O). En esta zona se presenta un clima desértico, sin precipitaciones, con temperaturas medias mensuales entre 13,61 y 23,73°C y una humedad relativa mensual de 60,41-82,16%, entre cuyos rangos se encuentran los datos registrados durante el cultivo (Tabla 1). El estudio se desarrolló en un suelo de textura franca arcillosa, con altos niveles de B, Na⁺ y Cl⁻, clasificado como salino no sódico. El agua de riego, por su parte, presenta alto contenido de B y bajos niveles de Na⁺ y Cl⁻ (Tabla II).

TABLA I
DATOS CLIMÁTICOS MENSUALES DEL VALLE DE AZAPA
DURANTE EL CICLO DEL CULTIVO

Meses (2014)	Temperatura (°C)			Humedad relativa (%)	Evaporación mensual (mm)	Recorrido mensual del viento (km/día)
	Media máxima	Media mínima	Media mensual			
Marzo	27,2	14,6	20,9	66,07	8,6	56,06
Abril	25,2	15,6	20,4	68,00	6,4	48,55
Mayo	23,4	12,5	17,9	70,23	4,3	40,16
Junio	20,0	12,6	16,3	79,43	2,6	34,88
Julio	18,7	10,6	14,7	78,33	2,9	37,87

Fuente: Estación meteorológica Universidad de Tarapacá, km 12 valle de Azapa (durante la temporada de estudio no se registran precipitaciones).

TABLA II
CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DE SUELO Y AGUA DE
RIEGO EN EL SECTOR DE ESTUDIO

Parámetro	Unidad	Suelo	Agua
pH		7,2	8,15
CE	dS·m ⁻¹	28,3	0,86
Ca ²⁺	mmol·l ⁻¹	151,95	3,18
Mg ²⁺	mmol·l ⁻¹	54,89	2,55
Na ⁺	mmol·l ⁻¹	129,83	3,06
K ⁺	mmol·l ⁻¹	12,79	0,23
SO ₄ ²⁻	mmol·l ⁻¹	34,43	4,28
Cl ⁻	mmol·l ⁻¹	213,4	1,49
HCO ₃ ⁻	mmol·l ⁻¹	2,52	3,32
CO ₃ ²⁻	mmol·l ⁻¹	ND	ND
B	mg·l ⁻¹	3,05	1,12
RAS		12,77	1,8
PSI	%	14,95	
Clasificación		Salino no sódico	

Fuente: Proyecto FONDECYT 1120202.

Material vegetal y condiciones experimentales

El experimento se desarrolló en una superficie de 864m² en la que se distribuyeron 36 parcelas (unidades experimentales) de 3×3,5m (10,5m²) con seis líneas de siembra, separadas cada una 60 cm. Se sembraron dos fenotipos con seis repeticiones, considerando 18 parcelas para cada uno. Estos fenotipos se identifican como chíca oscura y blanca, originarios de Santa Cruz de La Sierra, Bolivia, proporcionados por la empresa Benexia. Previo a la siembra, se realizó una selección de semillas por colores, eliminando aquellas que no correspondían a las denominaciones de color blanca y oscura, según fuera la selección. El suelo se preparó con aradura a 40cm de profundidad y fue mullido con rastra en diferentes direcciones.

La siembra se realizó el 06/03/2014, fecha seleccionada

en función de un experimento anterior realizado en la temporada 2013, en el que se analizó experimentalmente, la fecha de siembra óptima para el valle de Azapa. La siembra se realizó de forma manual a chorro continuo, a 0,5cm de profundidad con una dosis de semilla de 0,8g por hilera, lo que corresponde a 4,57kg·ha⁻¹. Posteriormente, a los 20 días después de la siembra (DDS), se realizó un raleo de plantas dejando al rededor de 28 plantas por metro lineal, lo que corresponde a una densidad de 45 plantas/m². La fertilización se hizo a través del sistema de riego con aplicaciones semanales de una fórmula nutritiva 25-10-10 (N-P-K) la cual se inició desde la segunda semana después de la siembra. El riego del cultivo se realizó por cinta, con goteros de 2l·h⁻¹ cada 20cm. Antes de la siembra se realizaron varios lavados de suelo para reducir la conductividad eléctrica y luego se sembró en

COR, Lincoln, NE, EEUU). La medición se realizó en hojas maduras y turgentes en dos plantas de cada unidad experimental y durante dos etapas fenológicas: floración (75 DDS) y madurez fisiológica (96 DDS). Las mediciones se realizaron desde las 9:00 hasta las 11:00.

Producción de biomasa y rendimiento de semillas

Este factor corresponde a la sumatoria del peso seco de hojas, tallos e inflorescencias. Se consideraron dos épocas, floración y madurez fisiológica. Se tomó como muestra el total de plantas presentes en 0,25m a lo largo de cada unidad experimental, cortándolas a ras del suelo. El material obtenido fue secado en estufa a 70°C hasta peso constante. El rendimiento de semillas fue determinado en 2m lineales por unidad experimental, separando las inflorescencias del resto de la planta. Estas inflorescencias fueron secadas en estufa de aire forzado a 40°C hasta peso constante. Una vez secas, las inflorescencias fueron trilladas separando los granos del resto de las partes florales. Los granos fueron pesados para determinar el rendimiento.

Eficiencia del uso del agua (EUA)

Se calcularon cuatro tipos de EUA: la eficiencia intrínseca (EUA-intr), calculada como el cociente entre la asimilación de CO₂ y la conductancia estomática (μmol CO₂/mol H₂O); la eficiencia instantánea (EUA-ins), calculada como la relación entre la asimilación de CO₂ y la transpiración (μmol CO₂/mmol H₂O); la eficiencia del uso del agua en la biomasa (EUA-biomasa), calculada como la relación entre la producción de materia seca de biomasa aérea total y el volumen de agua aplicado (kg materia seca/m³); y la eficiencia en el rendimiento de semilla (EUA-semilla), calculada como la relación entre la producción de semilla y el volumen de agua aplicado (kg semilla/m³).

suelo húmedo. Se dio término al riego en el estado de madurez de cosecha de la semilla a los 134 DDS. La aplicación del riego se manejó mediante un programador Rain Bird (Rain Bird Corporation, Tucson, AZ, EEUU), con una distribución de tuberías individuales para cada tratamiento, cada uno con un solenoide y un caudalímetro para registrar la cantidad total (m³) de agua aplicada.

Tratamientos y diseño experimental

Se establecieron tres tratamientos de riego para cada fenotipo, los que fueron programados para reponer el 100, 70 y 40% de la demanda de evapotranspiración de referencia (ET_o) calculada diariamente por el método de Penman Monteith (FAO, 2006), con seis repeticiones por tratamiento. La unidad muestral correspondió a las cuatro hileras centrales de la unidad experimental, sin considerar 0,5m de cada extremo de la hilera, con el fin de eliminar el efecto de borde. Los parámetros medidos y descritos a continuación, fueron considerados para explicar los diferentes componentes del rendimiento e identificar las variaciones que se producen en la relación de éstos con los diferentes tratamientos de riego aplicados al cultivo.

Intercambio gaseoso

Se midió simultáneamente la fotosíntesis (μmol CO₂/m²·s), la conductancia estomática (mol H₂O/m²·s) y la transpiración (mmol H₂O/m²·s) utilizando un equipo portátil LI-6400× (LI-

Análisis estadístico

Los resultados obtenidos fueron sometidos a análisis de varianza mediante el uso del programa Statgraphycs. Se aplicó la prueba de comparación múltiple de Fisher ($p \leq 0,05$) para identificar diferencias entre las medias de los tratamientos. La comparación entre los fenotipos blanca y oscura se realizó mediante un test de significancia a $p \leq 0,05$.

Resultados

Factores de intercambio gaseoso en dos estados fenológicos

Fotosíntesis. Los tratamientos de riego no causan variaciones significativas en la fotosíntesis en los dos fenotipos (Tabla III). Las diferencias se presentan, principalmente, entre las dos etapas fenológicas consideradas, siendo menor en la madurez fisiológica del grano respecto de la floración. Así, en la chíá blanca la reducción de la fotosíntesis entre las dos etapas fenológicas fue de 38,9; 40,5 y 62,9% en los tratamientos 100, 70 y 40% de la ETo, respectivamente. Por su parte, en la chíá oscura esta reducción alcanzó a 53,1; 54,8 y 63,4% respecto de estos mismos tratamientos.

Conductancia estomática. Los niveles de agua aplicados no afectan diferencialmente a la conductancia estomática de los fenotipos estudiados. Los tratamientos con menor disponibilidad hídrica, en chíá oscura, presentan una diferencia significativa de este parámetro entre floración y madurez fisiológica, con reducción entre 34,0 y 34,1%. En chíá blanca esta reducción no es significativa, en ninguno de los tratamientos, y fluctúa entre 11,1 y 17,4% (Tabla IV).

Transpiración. La transpiración (Tabla V) no mostró diferencias significativas entre los tratamientos, en ninguno de los fenotipos. Sin embargo, la chíá blanca presentó una tendencia a la disminución de la transpiración respecto de la menor disponibilidad hídrica, situación menos clara en la chíá

oscura. Durante la floración la transpiración fue significativamente mayor con relación a la madurez fisiológica, disminuyendo entre 24,9 a 27,5% en chíá oscura y entre 14,8 y 18,6% en chíá blanca.

Eficiencia del uso del agua respecto al intercambio gaseoso

EUA-intr. Durante la floración la EUA-intr no presentó diferencias significativas entre los

tratamientos; es decir, es un factor que se mantuvo independiente de la cantidad de agua aplicada. Sin embargo, en la chíá blanca se apreció una tendencia al aumento de EUA-intr con relación directa a la disminución del volumen de agua de riego, comportamiento opuesto a la respuesta de la chíá oscura. En la madurez fisiológica, no hay diferencias significativas entre los tratamientos para los fenotipos. En este análisis, la chíá oscura presentó una

tendencia al aumento de la EUA-intr, aunque no significativo. Los valores de EUA-intr son menores en la madurez fisiológica (Tabla VI) respecto de las mediciones anteriores, durante la floración.

EUA-ins. Durante la floración la EUA-ins fue significativamente mayor en ambos fenotipos (Tabla VII), expresando las mismas tendencias que presentaron tanto la fotosíntesis como la transpiración

TABLA III
FOTOSÍNTESIS, EN CHÍA BLANCA Y OSCURA EN DOS PERIODOS FENOLÓGICOS, DURANTE LA FLORACIÓN (75 DDS) Y EN LA MADUREZ FISIOLÓGICA (96 DDS)

Tratamientos ETo (%)	Fotosíntesis ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)					
	Chía blanca			Chía oscura		
	75 DDS	96 DDS	p-valor	75 DDS	96 DDS	p-valor
100	16,98 \pm 3,2 a	10,36 \pm 2,0 a	1×10^{-6}	18,05 \pm 3,7 a	9,59 \pm 2,7 a	4×10^{-6}
70	16,98 \pm 3,0 a	10,09 \pm 2,1 a	1×10^{-6}	17,55 \pm 3,7 a	9,62 \pm 2,3 a	2×10^{-6}
40	15,75 \pm 3,2 a	9,91 \pm 2,2 a	3×10^{-5}	16,60 \pm 4,2 a	10,53 \pm 2,1 a	1×10^{-4}

En las tablas III a IX, los valores son promedios \pm desviación estándar ($n=6$). Letras iguales en una misma columna indican ausencia de diferencias significativas entre los tratamientos según test de Fisher a $p \leq 0,05$; p-valor: diferencia entre los dos periodos fenológicos según test de Student a $p \leq 0,05$.

TABLA IV
CONDUCTANCIA ESTOMÁTICA EN CHÍA BLANCA Y OSCURA EN DOS PERIODOS FENOLÓGICOS, DURANTE LA FLORACIÓN (75 DDS) Y LA MADUREZ FISIOLÓGICA (96 DDS)

Tratamientos ETo (%)	Conductancia estomática ($\text{mol H}_2\text{O/m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)					
	Chía blanca			Chía oscura		
	75 DDS	96 DDS	p-valor	75 DDS	96 DDS	p-valor
100	0,42 \pm 0,1 a	0,37 \pm 0,2 a	0,4084	0,45 \pm 0,2 a	0,32 \pm 0,1 a	0,061
70	0,46 \pm 0,2 a	0,38 \pm 0,1 a	0,2121	0,44 \pm 0,18 a	0,29 \pm 0,1 a	0,0186
40	0,36 \pm 0,1 a	0,32 \pm 0,1 a	0,3774	0,47 \pm 0,23 a	0,31 \pm 0,1 a	0,0378

TABLA V
TRANSPIRACIÓN EN CHÍA BLANCA Y OSCURA EN DOS PERIODOS FENOLÓGICOS, DURANTE LA FLORACIÓN (75 DDS) Y LA MADUREZ FISIOLÓGICA (96 DDS)

Tratamientos ETo (%)	Transpiración ($\text{mmol H}_2\text{O/m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)					
	Chía blanca			Chía oscura		
	75 DDS	96 DDS	p-valor	75 DDS	96 DDS	p-valor
100	7,02 \pm 0,8 a	5,84 \pm 1,6 a	0,0294	7,26 \pm 1,7 a	5,45 \pm 1,2 a	0,0092
70	7,27 \pm 1,6 a	5,92 \pm 1,3 a	0,0345	7,17 \pm 1,5 a	5,20 \pm 1,2 a	0,0014
40	6,49 \pm 1,1 a	5,53 \pm 1,1 a	0,0445	7,25 \pm 1,8 a	5,37 \pm 1,2 a	0,0076

TABLA VI
EUA INTRÍNSECA EN LA ETAPA DE FLORACIÓN (75 DDS) Y LA MADUREZ FISIOLÓGICA (96 DDS) PARA CHÍA BLANCA Y OSCURA

Tratamientos ETo (%)	EUA intrínseca ($\mu\text{mol CO}_2/\text{mol H}_2\text{O}$)					
	Chía blanca			Chía oscura		
	75 DDS	96 DDS	p-valor	75 DDS	96 DDS	p-valor
100	41,37 \pm 8,2 a	27,47 \pm 5,0 a	0,0001	43,97 \pm 11,8 a	30,86 \pm 4,7 a	0,002
70	40,97 \pm 12,0 a	29,23 \pm 9,6 a	0,015	42,45 \pm 9,1 a	34,73 \pm 8,9 a	0,047
40	45,83 \pm 8,6 a	32,54 \pm 6,5 a	0,0003	40,21 \pm 13,4 a	37,03 \pm 9,0 a	0,503

TABLA VII
EUA INSTANTÁNEA EN LA ETAPA DE FLORACIÓN (75 DDS) Y MADUREZ FISIOLÓGICA (96 DDS) PARA CHÍA BLANCA Y OSCURA

Tratamientos ETo (%)	EUA instantánea ($\mu\text{mol CO}_2/\text{mmol H}_2\text{O}$)					
	Chía blanca			Chía oscura		
	75 DDS	96 DDS	p-valor	75 DDS	96 DDS	p-valor
100	2,41 \pm 0,38 a	1,82 \pm 0,25 a	1x10 ⁻⁴	2,51 \pm 0,18 a	1,74 \pm 0,22 c	8x10 ⁻⁸
70	2,38 \pm 0,29 a	1,74 \pm 0,33 a	5x10 ⁻⁵	2,45 \pm 0,24 a	1,86 \pm 0,33 ab	5x10 ⁻⁵
40	2,43 \pm 0,39 a	1,79 \pm 0,25 a	8x10 ⁻⁵	2,32 \pm 0,43 a	1,99 \pm 0,32 a	4x10 ⁻²

(Tablas III y V). Respecto de la influencia de los tratamientos de riego con relación a la EUA-ins, solamente la chía oscura presentó diferencias significativas en la madurez fisiológica, con una clara tendencia a aumentar en relación inversa a la disponibilidad de agua de riego. En todos los demás casos no hay tendencias claras que expliquen la influencia del tratamiento de riego. Por lo tanto, el proceso de senescencia es más influyente, en este factor, que la disponibilidad hídrica.

Biomasa en floración y en madurez fisiológica

La biomasa obtenida en las temporadas de floración y madurez fisiológica, respecto de los tratamientos de riego, se muestra en la Tabla VIII. La biomasa comprende la sumatoria del peso seco de las hojas, tallo e inflorescencias. Entre

los fenotipos, la única diferencia significativa se observa en 70% con una producción mayor de materia seca para la chía oscura. El rendimiento de materia seca en la temporada de floración no presentó diferencias significativas entre los tratamientos. En general y no obstante la falta de significación estadística, se presenta una clara tendencia de disminución de la biomasa con relación a la menor disponibilidad hídrica en ambos fenotipos, siendo mucho más significativa la disminución en la chía blanca. Una situación similar se observó para la etapa de madurez fisiológica. En esta etapa se observa un aumento significativo de la biomasa total en ambos fenotipos, sin embargo, no todos los componentes de la biomasa aumentaron y el incremento del peso se debe, principalmente, a las inflorescencias ya que las hojas y tallos disminuyen su

peso debido a la defoliación y a la deshidratación.

EUA-biomasa en floración y en madurez fisiológica

La Tabla IX muestra la EUA biomasa para la etapa de floración. Se observa que no hay un efecto, en ésta, del tratamiento de riego. Respecto de la comparación entre fenotipos, en 70% de la ETo se observa que la chía oscura presentó una diferencia significativamente mayor que la chía blanca con una EUA superior, lo cual también se puede observar en los demás tratamientos, aunque no significativamente. En la etapa de madurez fisiológica, la EUA biomasa no presentó diferencias significativas entre los tratamientos o entre los fenotipos.

Rendimiento de semillas

En la Tabla X se observa que los dos fenotipos presentaron el

mismo comportamiento respecto del rendimiento de semillas, el cual se aprecia relacionado directamente al volumen de agua aplicado y, en este sentido, el rendimiento aumentó con relación al aumento de la disponibilidad hídrica. Este aumento solo es significativo en la chía oscura. Respecto de la comparación entre los dos fenotipos para cada tratamiento, el rendimiento de semilla no presentó diferencias significativas para los dos primeros tratamientos, sin embargo, para el 40% de la ETo el rendimiento fue mayor en la chía blanca. Esto podría indicar un mejor comportamiento de este fenotipo al déficit hídrico ya que, además, en los otros dos tratamientos el rendimiento fue mayor, aunque sin diferencias significativas.

EUA-semillas

Los resultados presentados en la Tabla XI indican que en ambos fenotipos la EUA-semillas tiende a ser mayor, significativamente, respecto del menor volumen de agua de riego aplicado al cultivo. De la comparación entre los dos fenotipos, se observa que en 70 y 40% la chía blanca muestra, significativamente, una mayor eficiencia en el uso del agua, produciendo 0,24 y 0,30kg de semilla/m³ con relación a los 0,19 y 0,21kg de semilla/m³ de la chía oscura. En 100% también resultó ser mayor la producción de chía blanca, aunque no significativamente, respecto de la chía oscura.

Discusión

La disminución de la fotosíntesis entre las dos etapas fenológicas (floración y madurez fisiológica) refleja, principalmente, un efecto de la condición de senescencia más que un efecto de la disponibilidad hídrica, ya que entre los tratamientos de riego no hay diferencias significativas. Sin embargo, se estima que el estrés hídrico causa importantes efectos en la fisiología de la planta; entre éstos, el intercambio gaseoso y el estado hídrico, dependen de la rapidez, severidad

TABLA VIII
BIOMASA (SUMA DEL PESO DE HOJAS, TALLOS, INFLORESCENCIAS) DE CHÍA BLANCA Y OSCURA EN LA ETAPA DE FLORACIÓN (75 DDS) Y MADUREZ FISIOLÓGICA (96 DSS)

Tratamientos ETo (%)	Biomasa (kg materia seca/ha)					
	Chía blanca		p-valor	Chía oscura		p-valor
	75 DDS	96 DDS		75 DDS	96 DDS	
100	5790,0 \pm 2126,0 a	7370,6 \pm 2276,1 a	0,3022	7748,0 \pm 2647,4 a	8152,0 \pm 2279,4 ab	0,8247
70	3833,3 \pm 1591,7 a	7020,8 \pm 2689,2 a	0,0368	6832,0 \pm 3482,0 a	9944,0 \pm 1981,7 a	0,2497
40	3544,0 \pm 1237,0 a	5539,2 \pm 1841,5 a	0,1072	5642,7 \pm 1824,3 a	4802,6 \pm 210,5 b	0,6743

TABLA IX
EUA CON RELACIÓN AL TOTAL DE BIOMASA EN LA ETAPA DE FLORACIÓN (75 DDS) Y MADUREZ FISIOLÓGICA (96 DDS)

Tratamientos ETo (%)	EUA Biomasa (Kg materia seca/m ³)					
	Chía blanca		p-valor	Chía oscura		p-valor
	75 DDS	96 DDS		75 DDS	96 DDS	
100	1,63 \pm 0,7 a	1,93 \pm 0,6 a	0,4248	1,51 \pm 0,6 a	1,69 \pm 1,0 a	0,7238
70	1,29 \pm 0,5 a	2,37 \pm 0,9 a	0,0370	1,51 \pm 0,9 a	2,37 \pm 0,9 a	0,2025
40	1,43 \pm 0,5 a	2,23 \pm 0,7 a	0,1075	1,88 \pm 0,7 a	2,10 \pm 1,3 a	0,7548

TABLA X
RENDIMIENTO DE SEMILLA DE
CHÍA BLANCA Y OSCURA

Tratamientos ETo (%)	Chía blanca kg·ha ⁻¹	Chía oscura kg·ha ⁻¹	p-valor
100	1402,75 ±400,5 a	1154,0 ±321,5 a	0,30
70	1287,06 ±362,7 a	967,8 ±329,9 ab	0,14
40	1153,68 ±300,1 a	787,17 ±179,7 b	0,02

En las tablas X y XI, los valores son promedios ± desviación estándar (n=6). Letras diferentes en columnas verticales indican diferencias significativas entre los tratamientos según test de Fisher a $p \leq 0,05$; p-valor representa la diferencia entre los dos fenotipos según test de Student a $p \leq 0,05$.

TABLA XI
EFICIENCIA DEL USO DEL AGUA (EUA)
RESPECTO DEL RENDIMIENTO DE SEMILLAS
EN CHÍA BLANCA Y OSCURA

Tratamientos ETo (%)	EUA blanca (kg semilla/m ³)	EUA oscura (kg semilla/m ³)	p-valor
100	0,20 ±0,1 b	0,17 ±0,05 b	0,10
70	0,24 ±0,1 ab	0,19 ±0,05 ab	0,05
40	0,30 ±0,1 a	0,21 ±0,05 a	0,04

y duración del déficit hídrico, cuya primera respuesta es el cierre estomático para prevenir la deshidratación, en forma previa a cambios en el potencial hídrico o contenido relativo de agua. La reducida disponibilidad hídrica afecta la tasa neta de fotosíntesis debido a la disminución del ingreso de CO₂ y a menor disponibilidad de éste a nivel del cloroplasto (Yan *et al.*, 2016). En este estudio, no se detecta una disminución significativa de la fotosíntesis, aunque sí una tendencia a disminuir en función de la menor disponibilidad hídrica en el suelo. Esto podría significar que, aunque la planta comienza a reducir su eficiencia fotosintética, estos niveles de agua no son lo suficientemente bajos para inducir un cambio significativo en el intercambio gaseoso de esta especie (Yan *et al.*, 2016).

La conductancia estomática en chía oscura disminuyó significativamente entre la floración y la madurez fisiológica, lo cual significa que este fenotipo podría entrar en un proceso de senescencia antes que la chía blanca, con una disminución abrupta de su conductancia estomática, o bien presentar una mayor sensibilidad al déficit hídrico que la chía blanca. Si bien el déficit hídrico puede

incrementar la resistencia estomática reduciendo la transpiración (de Santana *et al.*, 2015) y el aumento de solutos compatibles para retener agua (Moy *et al.*, 2014), en este estudio se observó que los tratamientos de riego no tuvieron un efecto significativo en la transpiración, y la disminución de ésta fue causada, principalmente, por la ontogenia de la planta. Se comprueba entonces que la planta de chía puede regular la pérdida de agua, controlando el cierre estomático, cuya acción podría estar controlada por el ácido abscísico (ABA); Yan *et al.*, 2016) como una acción preliminar al déficit hídrico del suelo (de Santana *et al.*, 2015) y antes de que se expresen cambios en el potencial hídrico foliar y/o en el contenido relativo del agua (Medrano *et al.*, 2002).

Dado que la EUA-intr es una medida de la relación entre fotosíntesis y conductancia estomática se puede apreciar en los valores originales (Tablas III y IV) que si bien ambos factores presentan un mayor valor en floración, respecto de la madurez fisiológica, la fotosíntesis sufre una disminución más significativa que la conductancia estomática. Esto significa que hay un efecto importante de la

senescencia de la planta en la eficiencia fotosintética, afectando en menor medida a la conductancia estomática. También es posible que esta marcada disminución de la fotosíntesis en la etapa avanzada sea producto de una baja disponibilidad de nitrógeno, cuya ausencia puede afectar este proceso fisiológico (Corrales-González *et al.*, 2016). Así mismo, se determinó que la reducción de la fotosíntesis está claramente relacionada, en forma directa, a la disponibilidad hídrica y no así la conductancia estomática.

Las plantas pueden limitar la pérdida de agua por apertura y cierre estomáticos, y al mismo tiempo, hacer más eficiente la absorción de moléculas de CO₂ y de esta manera aumentar la eficiencia del uso del agua (de Santana *et al.*, 2015). En este estudio se observa que la EUA-intr tiende a aumentar en el tratamiento con mayor restricción hídrica (40%) y en este caso pudieran estar implicados otros factores como ABA, en respuesta al estímulo externo del déficit hídrico que puede modular la acción de los estomas (Medrano *et al.*, 2002). Respecto del comportamiento de la EUA-ins, lo más significativo es su disminución entre los dos periodos analizados y, por lo tanto, el proceso de senescencia es más influyente que la disponibilidad hídrica. Esto significa que la disminución de la EUA-ins por efecto de la disminución de la disponibilidad hídrica no alcanza niveles significativos porque sus factores, fotosíntesis y transpiración, se mantienen o son controlados por una eficiente regulación estomática.

La biomasa total medida en este estudio correspondió a la sumatoria del peso seco de tallos, hojas e inflorescencias, observándose un aumento de la misma entre los dos periodos fenológicos estudiados, que se expresan desde la antesis hasta el final de la floración. Por lo tanto, también se involucra el desarrollo de los frutos de las primeras flores fecundadas. La variación del peso de las inflorescencias entre estos dos periodos, que en algunos casos

fue más del doble, podría explicarse principalmente por el crecimiento de los frutos o llenado de los granos. Por lo tanto, este es un periodo crítico en el desarrollo de la planta, en el que la cantidad de agua disponible puede ser el factor que decida el éxito o el fracaso del cultivo. La reducción de la biomasa, debería producir una disminución en la EUA-biomasa (de Santana *et al.*, 2015). En este estudio la reducción de la biomasa, aunque no significativa, está directamente relacionada a la disminución de la disponibilidad hídrica, y su causa puede ser la sensibilidad de las estructuras foliares al déficit hídrico (Silva *et al.*, 2016).

Respecto de los resultados encontrados en el rendimiento de semilla, el de la chía blanca fluctúa entre 1153,68 y 1402,75kg·ha⁻¹ y el de la chía oscura entre 787,17 y 1116,33 kg·ha⁻¹, los que pueden ser comparables con los que informa Ayerza y Coates (2009) para sectores productivos de Ecuador, cuya fluctuación fue de 446 a 1753kg·ha⁻¹. No obstante la falta de significancia entre los tratamientos, se presenta una tendencia a un mayor rendimiento de semillas en relación directa a la mayor disponibilidad de agua. La escasa diferencia entre los tratamientos, para chía blanca podría estar relacionada al grado de estrés impuesto, su duración y al periodo fenológico en que éste fue aplicado (Kang *et al.*, 2002). En este estudio, los tratamientos fueron aplicados desde los 40 días, al inicio de la ramificación lateral, proceso muy relacionado a la intensidad de la floración, ya que cada rama terminará en una panícula o grupo de espigas. Es decir, el momento del inicio del estrés podría ser tardío y su efecto podría ser menor o bien el nivel mínimo de agua aplicado no fue lo suficientemente estresante. En cambio, en chía oscura, esta misma situación causó una diferencia significativa entre los tratamientos de riego, cuya mayor producción estuvo relacionada directamente a la mayor disponibilidad hídrica.

El aumento de la EUA-semilla puede ser una estrategia fisiológica de las plantas para reducir el efecto negativo del estrés hídrico en el cultivo, a través de la regulación estomática (Molina-Montenegro *et al.*, 2011). A este nivel de medición de la EUA, la chíá blanca mostró diferencias significativas entre los tratamientos, no así respecto de la EUA-intrínseca e instantánea. Según Sinclair *et al.* (1984) estas últimas, siendo parámetros de medición instantáneos, no se correlacionan muy bien con la eficiencia de la planta completa respecto de la cantidad total de biomasa que se produce por cantidad de agua transpirada, siendo ésto lo que finalmente interesa en los sistemas agrícolas.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue financiada por FONDECYT proyecto N° 1120202 “Effect of soil and climatic conditions in the physiology and metabolism secondary in chia (*Salvia hispanica* L.), natural source of omega 3 fatty acids”. Los autores agradecen a Víctor Medel y Elvis Hurtado, de la Universidad de Tarapacá, por su colaboración en los trabajos de terreno.

REFERENCIAS

Acevedo E, Silva H, Silva P (1998) Tendencias actuales de la investigación en la resistencia al estrés hídrico de plantas cultivadas. Boletín Técnico N° 49.

- Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Universidad de Chile, pp. 1-28.
- Ayerza R, Coates W (2004) Composition of chia (*Salvia hispanica*) grown in six tropical and subtropical ecosystem of South America. *Trop. Sci.* 44: 131-135.
- Ayerza R, Coates W (2006) *Chía. Redescubriendo un Olvidado Alimento de los Aztecas*. 1ª ed. Nuevo Extremo. Buenos Aires, Argentina. 197 pp.
- Ayerza R (Jr), Coates W (2009) Influence of environment on growing period and yield, protein, oil and α -linolenic content of three chia (*Salvia hispanica* L.) selections. *Indust. Crops Prod.* 30: 321-324.
- Ayerza R (Jr), Coates W (2011) Protein content, oil content and fatty acid profiles as potential criteria to determine the origin of commercially grown chia (*Salvia hispanica* L.). *Indust. Crops Prod.* 34: 1366-1371.
- Basilacchi H, Quiroga M, Bueno M, Di Sapio O, Flores V, Severin C (2013) Evaluación de *Salvia hispanica* L. cultivada en el sur de Santa Fe, Argentina. *Cult. Trop.* 34(4): 55-59.
- Corrales-González M, Rada F, Jaimez R (2016) Efectos del nitrógeno en los parámetros fotosintéticos y de producción del cultivo de la gerbera (*Gerbera jamesonii* H. Bolus ex Hook. f.) *Acta Agron.* 65: 255-260.
- de Santana TA, Oliveira OS, Silva LD, Laviola BG, de Almeida AA, Gomes FP (2015) Water use efficiency and consumption in different Brazilian genotypes of *Jatropha curcas* L. subjected to soil water deficit. *Biomass Bioenergy* 75: 119-125.
- Ennajeh M, Tounekti T, Vadel AM, Khemira H (2008) Water relations and drought-induced embolism in olive (*Olea europaea*) varieties ‘Meski’ and ‘Chemlali’ during severe drought. *Tree Physiol.* 28: 971-976.
- FAO (2006) *Evapotranspiración del Cultivo*. Estudio FAO Riego y Drenaje 56. Food and Agriculture Organization. Roma, Italia. 298 pp.
- Gardner FP, Pearce RB, Mitchell RL (1985) *Physiology of Crop Plants*. Iowa State University Press. Ames, IO, EEUU. 328 pp.
- Hernández JA, Miranda S, Peña A (2008) Cruzamiento natural de chia (*Salvia hispanica* L.) *Rev. Chapingo Ser. Hortic.* 14: 331-337.
- Kang S, Zhang L, Liang Y, Hu X, Cai H, Gu B (2002) Effects of limited irrigation of yield of winter wheat in the Loess Plateau of China. *Agric. Water Manag.* 55: 203-216.
- Medrano H, Escalona JM, Bota J, Gulías J, Flexas J (2002) Regulation of photosynthesis of C3 plants in response to progressive drought: Stomatal conductance as a reference parameter. *Ann. Bot.* 89: 895-905.
- Medrano H, Bota J, Cifre J, Flexas J, Ribas-Carbó M, Gulías J (2007) Eficiencia en el uso del agua por las plantas. *Inv. Geogr.* 43: 63-84.
- Moy Ng L, Melcher K, Tean The B, Xu HE (2014) Abscisic acid perception and signaling: structural mechanisms and applications. *Acta Pharmacol. Sin.* 35: 567-584.
- Molina-Montenegro MA, Zurita-Silva A, Osés R (2011) Effect of water availability on physiological performance and lettuce crop yield (*Lactuca sativa*). *Cien. Inv. Agr.* 38: 65-74.
- Rovati A, Escobar E, Prado C (2012) Particularidades de la semilla

de chíá (*Salvia hispanica* L.). *Avance Agroindust.* 33(3): 39-43.

- Shanshan L, Hao L, Xiangzhang L, Golam Jalal A, Xiaoqian X, Jie Z, Kai S, Tadao A, Jingquan Y, Yanhong Z (2016) Grafting cucumber onto luffa improves drought tolerance by increasing ABA biosynthesis and sensitivity. *Sci. Rep.* 6(20212): 1-14.
- Silva H, Garrido M, Baginsky C, Valenzuela A, Morales L, Valenzuela C, Pavez S, Alister S (2016) Effect of water availability on growth, water use efficiency and omega3 (ALA) content in two phenotypes of chia (*Salvia hispanica* L.) established in the arid Mediterranean zone of Chile. *Agric. Water Manag.* 173: 67-75.
- Sinclair T R, Tanner CB, Bennett JM (1984) Water-use efficiency in crop production. *BioScience* 34: 36-40.
- Torres A, Acevedo E (2008) El problema de salinidad en los recursos suelo y agua que afectan el riego y cultivos en los valles de Lluta y Azapa en el norte de Chile. *Idesia* 26(3): 31-44.
- Weber CW, Gentry HS, Kohlhepp EA, McCrohan PR (1991) The nutritional and chemical evaluation of chia seeds. *Ecol. Food Nutr.* 26: 119-25.
- Yan W, Zhong Y, Shangguan Z (2016) A meta-analysis of leaf gas exchange and water status responses to drought. *Sci. Rep.* 6: 20917.
- Yang Y, Guan H, Batelaan O, McVicar Tim R, Long D, Piao S, Liang W, Liu B, Jin Z, Simmons CT (2016) Contrasting responses of water use efficiency to drought across global terrestrial ecosystems. *Sci. Rep.* 6: 23284.

Reproduced with permission of copyright owner. Further reproduction prohibited
without permission.