

Análisis ecofisiológico del cultivo de la quínoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) en condiciones de estrés de la sequía y la salinidad.

H. Bosque Sanchez¹, R. Lemeur² & P. Van Damme²

Keywords : Ecophysiology - Chlorophyll fluorescence - Quínoa - Drought - Salinity - Stress

Resumen

Hemos investigado la influencia relativa des estrés de la sequía y salinidad con similares potenciales hídricos del suelo, en el crecimiento; las relaciones hídricas en la planta y la tasa fotosintética de *Chenopodium quinoa* Willd., como también la utilización de técnicas comunes en estudios de la fisiología del estrés. Se han impuesto dos niveles de estrés salino (S1=3852,8 mg.1⁻¹ NaCl y S2=8051,2 mg.1⁻¹ NaCl) y dos de sequía, con potenciales matriciales (Ψ_m) de -0,159 MPa (D1) y -0,279 MPa (D2), y el control (c) sin estrés con 65% de contenido volumétrico de agua en el suelo (Ψ_m =-0,059 MPa). Los resultados de experimento en invernadero indicaron un mejor crecimiento relativo y absoluto en condiciones salinas, y que la planta ha desarrollado mecanismos de adaptación a la sequía a través de elevada eficiencia de uso de agua y alta relación raíz/tallo. La resistencia estomática y el potencial hídrico foliar fueron mayores cuando las condiciones de estrés eran altas. La relación de fluorescencia de la clorofila variable a máxima (Fv/Fm) y el análisis de extinción de fluorescencia (qP y qN) mostraron que las plantas bajo sequía tienen menos protección a la fotoinhibición. El porómetro de difusión dinámica tiene uso limitado en plantas con vesículas salinas.

Summary

Ecophysiological Analysis of Drought and Salinity Stress Quinoa (*Chenopodium Quinoa* Willd.)

We have studied the relative influence of drought and salinity stress, with similar soil water potentials on growth, water relations and photosynthetic rate of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.), testing at the same time certain techniques of stress physiology studies. As treatments, we have imposed two levels of salinity stress (S1=3852,8 mg.1⁻¹ NaCl and S2=8051.2 mg.1⁻¹ NaCl) and two of levels of drought stress with -0.159 MPa (D1) and -0.279 MPa (D2) of soil water potentials (Ψ_m), and the control (c) treatment without stress (65% of volumetric soil water content, i.e. Ψ_m =-0.059 MPa). Our results of the greenhouse experiment have shown that quinoa has better relative and absolute growth rate in saline conditions, and the plant have developed adaptations mechanisms to drought through higher water use efficiency and high root/shoot ratio. The stomatal resistance and leaf water potential were higher as higher were the stress conditions. The variable chlorophyll fluorescence to maximal chlorophyll fluorescence ratio (Fv/Fm) and the fluorescence quenching analysis (photochemical: qP and non-photochemical : qN) have shown the plants under drought stress are less protected against photoinhibition. Finally the use of Dynamic Diffusion Porometer has limitations for studies of plants species with salt bladders as quinoa.

Introducción

Dos de los problemas medio ambientales más importantes que influncian sobre la productividad agrícola en el mundo son la sequía y salinidad. Se estima que un tercio de las tierras del planeta potencialmente arables sufren por un inadecuado suministro de agua y cerca del 10% de suelos arables son afectados negativamente por la salinidad del suelo (13,15,16,20). Con el continuo crecimiento de la población, particularmente en los países en desarrollo y la disminución de tierras arables, es muy urgente la necesidad de minimizar los efectos de la salinidad y la sequía o cualquier problema medio ambiental sobre el normal desarrollo de las plantas y su rendimiento.

El Altiplano peruano - boliviano a altitudes entre 3,000-4,000 m, es una de las regiones de mayor severidad medio ambiental para la actividad agrícola. Son comunes las heladas y sequías, evapotranspiración elevada, baja humedad relativa y temperaturas de rocío muy bajas. La radiación UV es mayor y la concentración de CO₂ baja a la mitad de lo que es a nivel del mar. La mayoría de los suelos son marginales, pedregosos, salinos y de muy baja fertilidad natural, y drenaje pobre o muy elevado. Valores extremos de pH, desde 4,8 en algunas del Perú hasta 8,5 en pampas salinas bolivianas (7,14). Uno de los cultivos nativos bien adaptados a estas condiciones es la quínoa

¹ Universidad of San Andres, La Paz, Bolivia. hbosque@hotmail.com.

² Universidad de Gante. Patrick.Van Damme@rug.ac.be; Raoul.Lemeur@rug.ac.be; Coupure Links 653, 9000 Gante, Bélgica.

(*Chenopodium quinoa* Willd). Se produce bajo condiciones ecológicas extremas, pero su fisiología es todavía desconocida. En vista de esto, el objetivo principal de esta investigación fue el análisis de la respuesta ecofisiológica de la quínoa boliviana "real" bajo condiciones de estrés de sequía y salinidad, habiéndose determinado parámetros de crecimiento, resistencia estomática (r_s), potencial hídrico foliar (Ψ_f) y los parámetros de la fluorescencia de la clorofila.

Materiales y Métodos

La investigación fue ejecutada en un invernadero de la Facultad de Agricultura de la Universidad de Gante, Bélgica, entre los meses de febrero y julio. Se ha utilizado la variedad "Real" de quínoa, originaria del Altiplano Sur boliviano.

Se ha sembrado en macetas de 10-dm³ de capacidad en suelo de textura franca, y se ha efectuado raleo a 3 hojas por maceta en la fase de 6 hojas. Las plantas crecieron en condiciones uniformes de invernadero y con contenido de agua similares (65% de agua disponible del suelo) hasta los 70 días después de la siembra; y en los primeros estadios de crecimiento (febrero y parte de marzo), se ha suplido con iluminación artificial para completar a 12.5 horas de luz por día. Los cinco tratamientos consistieron de salinización nivel 1 (S1) con 3852,8 mg.l⁻¹ NaCl y nivel 2 (S2) con 8051,2 mg.l⁻¹ NaCl; estrés de sequía a -0,159 MPa (D1) y -0,279 MPa (D2) de potenciales mátricos, y el testigo (C). Para salinizar el suelo, hemos añadido las soluciones de NaCl de las dos concentraciones mencionadas en forma diaria durante 4 días, hasta completar la cantidad necesaria por maceta, con la finalidad de evitar un shock, si se añadiera de una sola vez. Para los tratamientos de sequía, hemos dejado que el agua se evapotranspire desde 65% de contenido volumétrico (θ_v) hasta 35% θ_v para D1 y 20% θ_v para D2. Las macetas fueron colocadas en diseño de bloques al azar con tres repeticiones, teniendo en total 15 unidades experimentales (macetas); y para el análisis estadístico se ha utilizado el modelo lineal aditivo.

Los parámetros ecofisiológicos fueron determinados durante 5 semanas (uno por semana), empezando 70 días después de la siembra, utilizando los siguientes métodos e instrumentos: Parámetros de crecimiento (terminología de Hunt, (12)); resistencia estomática (Porómetro de Difusión Dinámica ΔT AP3); potencial hídrico foliar (psicrómetro termopar WESCOR HR-33T);

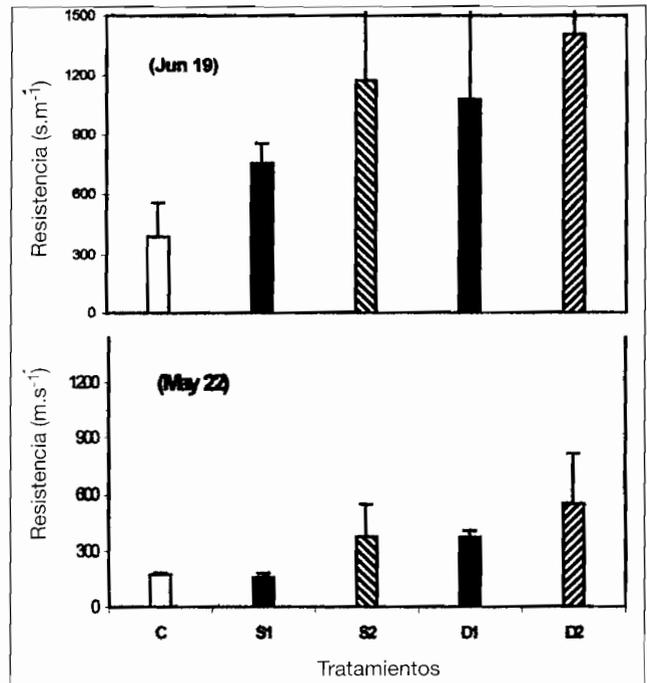


Figura 1 - Resistencia estomática de *Chenopodium quinoa* Willd. en la primera y segunda mediciones

y fluorescencia de la clorofila (Fluorómetro Portátil PAM-2000 Heinz Walz GmbH). El contenido de agua en el suelo fue controlado con tensiómetros (tratamientos salinos y el control), método gravimétrico y psicrómetro de suelos (tratamientos de sequía).

Resultados

Parámetros de crecimiento

En general el Cuadro 1 muestra que las plantas bajo condiciones salinas respondieron mejor que aquellas bajo sequía. Mientras que la respuesta general a la salinidad de concentraciones moderadas a altas es la reducción de crecimiento e interferencia en nutrición vegetal (21), nuestros resultados muestran lo contrario. Munns y Termaat (19) demostraron que las glicófitas tienen como una respuesta inicial la disminución de crecimiento de hojas. Gorham (10) menciona que la inhibición de expansión celular y la reducción de área foliar para fotosíntesis son las limitaciones más importantes. La salinidad aumenta la conductividad hidráulica (6), y probablemente debido a la salinidad y el aumento de absorción iónica fue el resultado de mayor

Cuadro 1

Rendimiento total en biomasa (TBY, g.planta⁻¹), Relación de crecimiento relativo (RGR), Relación de Área/hoja (LAR, cm².g⁻¹), Relaciones Raíz/Tallo (RSR), y Peso fresco/Peso seco (FW/DW) en TBY, Tallo/Raíz (FW/DW) de *Chenopodium quinoa* Willd. en condiciones salinas y sequía.

Trat	TBY (g.pl ⁻¹)		RGR	LAR (cm ² .g ⁻¹)	RSR (g/g)	RBY FW/DW	Tallo FW/DW	Raíz FW/DW
	FW	DW						
C	53,27 ± 11,9	8,50 ± 1,92	2,20 ± 0,72	75,73 ± 6,08	1,73 ± 0,08	6,27 ± 0,20	6,62 ± 0,20	3,75 ± 0,12
S1	69,64 ± 30,83	11,26 ± 0,44	3,23 ± 0,17	87,06 ± 26,9	1,79 ± 0,06	6,18 ± 0,13	6,54 ± 0,09	3,66 ± 0,18
S2	62,66 ± 3,81	10,14 ± 0,56	2,81 ± 0,21	60,31 ± 12,7	1,70 ± 0,11	6,18 ± 0,18	6,50 ± 0,11	3,73 ± 0,34
D1	41,04 ± 3,34	6,87 ± 0,56	1,58 ± 0,21	57,55 ± 6,30	1,81 ± 0,10	5,98 ± 0,15	6,39 ± 0,18	3,53 ± 0,19
D2	37,41 ± 6,59	6,31 ± 1,32	1,37 ± 0,50	58,49 ± 6,18	1,82 ± 0,10	5,96 ± 0,19	6,29 ± 0,20	3,40 ± 0,11
Est,	**	**	*	**	**	**	*	*

Estadísticamente significativo al 0,01 (**) y 0,05 (*)

Cuadro 2
Potenciales hídricos durante cinco determinaciones semanales en *Chenopodium quinoa* (las unidades en MPa \pm SD)

Trat	May 22	May 29	Jun 6	Jun 11	Jun 19
C	-1,34 \pm 0,14	-1,28 \pm 0,12	-1,50 \pm 0,06	-1,20 \pm 0,16	-1,46 \pm 0,07
S1	-1,31 \pm 0,17	-1,19 \pm 0,19	-1,59 \pm 0,20	-1,27 \pm 0,12	-1,38 \pm 0,10
S2	-1,46 \pm 0,12	-1,41 \pm 0,14	-1,85 \pm 0,02	-1,40 \pm 0,13	-1,88 \pm 0,12
D1	-1,49 \pm 0,10	-1,49 \pm 0,03	-1,69 \pm 0,19	-1,45 \pm 0,05	-1,42 \pm 0,25
D2	-1,52 \pm 0,12	-1,81 \pm 0,15	-1,91 \pm 0,32	-1,32 \pm 0,26	-1,89 \pm 0,30
Est.	ns	ns	ns	ns	ns

ns: estadísticamente no existen diferencias entre tratamientos ($p < 0,05$)

incremento en el crecimiento de *C. quinoa*. Estos resultados muestran que la quínoa pertenecería a las halófitas.

Estrés de sequía es conocido por decrecer producción y tamaño de hojas, incremento de mortalidad de hojas y reducción de altura de planta y pesos radiculares y del tallo en muchas especies vegetales (8). Blum y Sullivan (2), en respuesta a la sequía en trigo, mencionaron una reducción en peso total de tallos con un incremento en la longitud de raíces. Blum *et al* (3), mostró el efecto del tamaño de planta en tolerancia a la sequía. En nuestro estudio la tolerancia a la sequía fue incrementada, pero la tasa de crecimiento fue afectada.

Resistencia estomática (r_s)

C. quinoa tiene hojas anistomáticas y estomas anociticas con poros orientados al azar. En la Figura 1 hay una tendencia general en los niveles 2 de estrés, de tener r_s elevadas. García *et al.* (9), mencionan que la r_s en *C. quinoa* es menor en condiciones de sequía que en los de riego. Espíndola (1986), encontró que la transpiración en quínoa fue reducida e incrementada la resistencia de difusión de vapor al aumentarse el déficit hídrico del suelo. Barbe (1), en plántulas de quínoa ha observado que la tasa de transpiración fue reducida a medida que el contenido de agua en el suelo disminuyó. Lal y Edwards (17), encontraron que con la capacidad de retención de agua, la conductancia estomática y la transpiración declinó con el aumento del período de estrés en *Zea Mays* y *Amaranthus cruentus*.

En *C. quinoa* estas comparaciones indican que en estrés salino y de sequía a nivel 2 (S2 y D2), la reducción de la transpiración por aumento de la r_s ayudan a la planta en condiciones de déficit hídrico. El bajo valor

de r_s encontrado para el tratamiento S1 probablemente no significa estrés a este nivel de salinidad y contenido hídrico del suelo.

Potencial hídrico foliar (ψ_1)

En Cuadro 2 están los datos de ψ_1 obtenidos durante 5 mediciones semanales.

El ψ_1 fue levemente variable entre tratamientos. La tendencia general es que las hojas con sequía de nivel 2 (D2) y 1 (D1), y estrés salino al nivel 2 (S2) mostraron los más bajos ψ_1 . La excepción fue con el tratamiento salino al nivel 1 (S1) cuya tendencia fue más alto, el cual es relativo al uso máximo de agua durante el período experimental.

Espíndola (1986), determinó como los valores más bajos de ψ_1 en *C. quinoa* -4,2 MPa en el cual el ψ_{soil} fue -11,1 MPa, i.e. 4,7% más bajo que PWP. García *et al.* (9) mostraron que las plantas irrigadas tenían ψ_1 entre -1,0 MPa y -2,5 MPa mientras que las no irrigadas de -1,5 MPa y -3,2 MPa. En halófitas, aparte de disminuir ψ_1 , el exceso de sales en las hojas son concentradas y cristalizadas en células especiales. Estas estructural no son bioactivas en el metabolismo de las hojas, tampoco las sales "compartimentalizadas" o en tejidos u organelos. En *C. quinoa* tal vez lo más elaborado de adaptación a la salinidad y sequía es la formación de estructuras secretoras de sales, las vesículas salinas en superficies foliares y su importancia en el régimen hídrico de la planta.

Análisis de la fluorescencia de la clorofila

La aparición de "medidores de estrés" ha permitido la determinación de parámetros de extinción de la fluorescencia, especialmente la relación entre la fluorescencia variable y máxima, F_v/F_m (11). La técnica de fluo-

Cuadro 3
Relación de fluorescencia variable a máxima de acuerdo a niveles de sequía y salinidad. Valores promedio de cinco mediciones semanales.

Tratamientos	May 20	May 27	Jun 3	Jun 10	Jun 17
	Fv/Fm \pm SD	Fv/Fm \pm SD	Fv/Fm \pm SD	Fv/Fm \pm SD	Fv/Fm \pm SD
C	0,822 \pm 0,009	0,831 \pm 0,0002	0,812 \pm 0,012	0,828 \pm 0,005	0,826 \pm 0,008
S1	0,820 \pm 0,016	0,830 \pm 0,008	0,832 \pm 0,006	0,827 \pm 0,009	0,838 \pm 0,005
S2	0,834 \pm 0,010	0,836 \pm 0,008	0,833 \pm 0,006	0,825 \pm 0,010	0,833 \pm 0,008
D1	0,824 \pm 0,003	0,827 \pm 0,004	0,823 \pm 0,007	0,821 \pm 0,011	0,831 \pm 0,010
D2	0,816 \pm 0,002	0,833 \pm 0,005	0,826 \pm 0,003	0,813 \pm 0,003	0,829 \pm 0,003
Stat.	ns	ns	ns	ns	ns

ns: estadísticamente no diferencias significativas entre tratamientos.

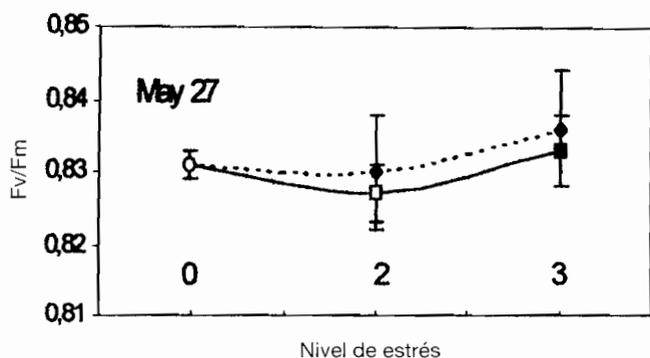


Figura 2 - Relación de variable a máxima fluorescencia de *Chenopodium quinoa* Willd. en condiciones de estrés de sequía (-) y salinidad (- - -). Control (o); estrés de sequía nivel 1, D1 (□); estrés de sequía nivel 2, D2 (■); estrés salino nivel 1, S1 (◊), y estrés salino nivel 2, S2 (★). Valores de la segunda determinación.

rescencia modulada ha demostrado la determinación de coeficientes de extinción de fluorescencia fotoquímica (qP) y no-fotoquímica (qN), como también el rendimiento fotoquímico cuántico, y la curva regular de Kautsky (18). En este estudio nuestro análisis se centró en la relación F_v/F_m y coeficientes de extinción (qP y qN).

Los valores semanales de F_v/F_m (Cuadro 3) muestran una diferencia no significativa entre tratamientos. Sin embargo, las plantas en salinidad muestran valores levemente superiores de F_v/F_m (Figura 2). La reducción de F_v/F_m en plantas bajo sequía sugiere una disminución en la eficiencia cuántica máxima de PSII abierto como también un incremento en la disipación de calor. En *C. quinoa* bajo sequía y salinidad la relación F_v/F_m no fue afectado severamente. Sin embargo, otros estudios son necesarios, con niveles superiores de estrés y en condiciones naturales.

Los coeficientes de extinción, qP y qN, están ilustrados en la Figura 3. La única varicación fue en la extinción qN en estrés de sequía, el cual mostró mayor pendiente de reducción que en condiciones de estrés bajo salinidad. Este último indica que las plantas en salinidad tienen mejor protección a la fotoinhibición al nivel de los centros de reacción de PSII que las plantas bajo sequía.

Con estos resultados concluimos de que *Chenopodium quinoa* Willd. es una halófito facultativa. Que las vesículas salinas juegan un rol importante en las relaciones hídricas de la planta. *C. quinoa* tiene buena respuesta a condiciones de sequía, sin embargo, esta estrategia va en detrimento del rendimiento.

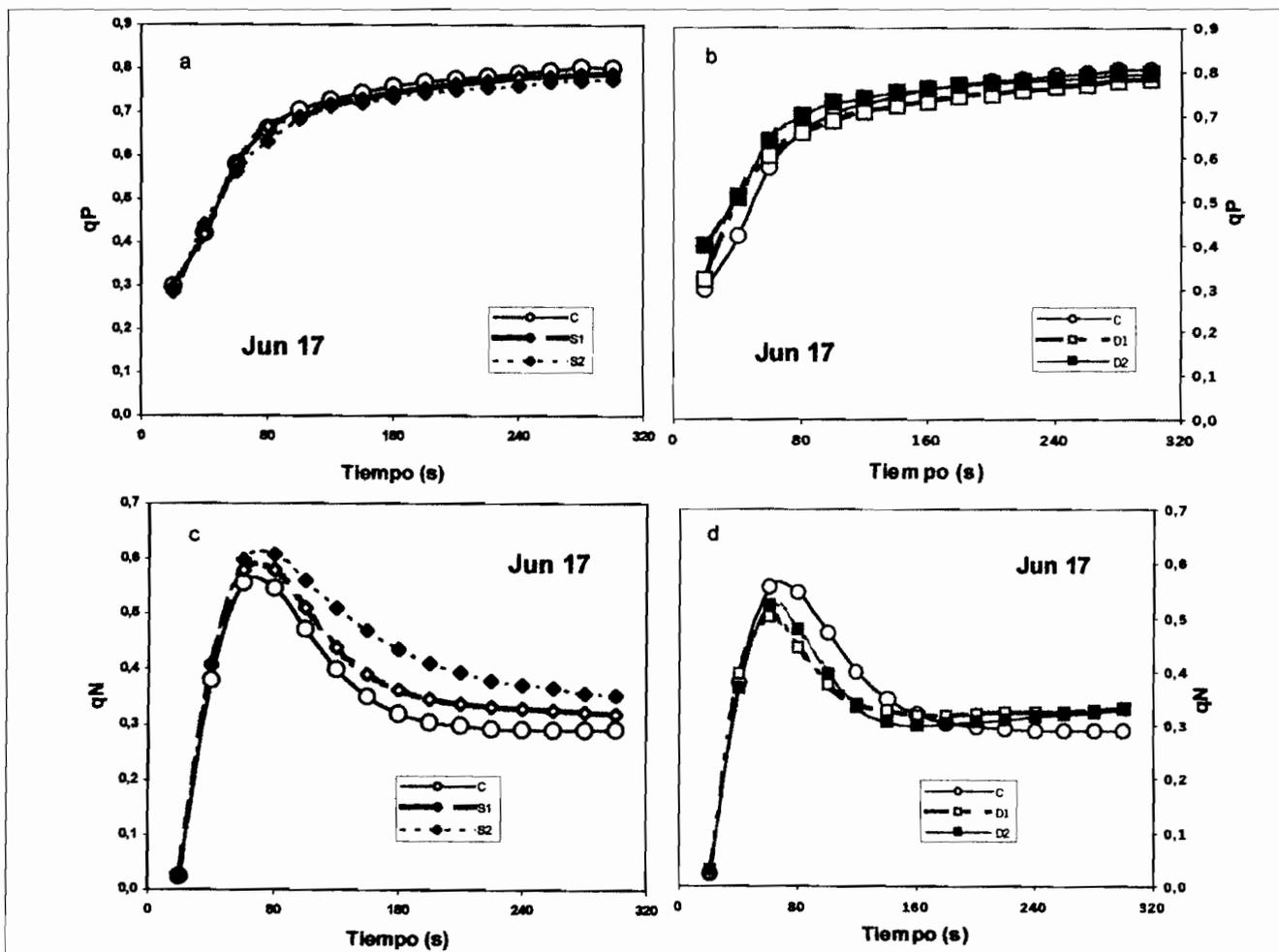


Figura 3 - Extinción fotoquímica qP (a,b) y no-fotoquímica qN (c,d) de la fluorescencia de la clorofila de *Chenopodium quinoa* Willd. en condiciones salinas (a,c) y sequía (b,d). Control (o); estrés de sequía nivel 1, D1 (□); estrés de sequía nivel 2, D2 (■); estrés salino nivel 1, S1 (◊), y estrés salino nivel 2, S2 (★). Datos de Junio 17.

La fluorescencia de la clorofila con Fluorómetro PAM-2000 demostró ser una herramienta útil para estudios de la fisiología del estrés. El porómetro de difusión dinámica tiene limitaciones en plantas con vesículas salinas. Estos resultados indican que la quínoa tiene una gran potencialidad como cultivo alternativo, par-

ticularmente para las zonas de condiciones ambientales adversas en donde otros cultivos no se desarrollan. En consecuencia el conocimiento profundo de su fisiología posibilitará la obtención de variedades más resistentes a la salinidad y tolerantes a la sequía.

Referencias

1. Barbe D., 1998. Droogtetolerantie van zes quinoacultivars *Chenopodium quinoa* Willd. Thesis Ind. Ingenieur, Hogeschool Gent.
2. Blum A. & Sullivan C.Y., 1997. The effect of plant size on wheat response to agents of drought stress. I. Root drying. *Aust. J. Plant Physiol.*, 24: 35-41.
3. Blum A., Sullivan C.Y. & Nguyen H.T., 1997. The effect of plant size on wheat response to agents of drought stress. II. Water deficit, heta and ABA. *Aust. J. Plant Physiol.*, 24: 43-48.
4. Bosque H., 1994. Cultivo en suka kollu de quinas tolerantes a heladas en dos épocas de siembra. Tesis de grado. Licenciado en Ingeniería Agronómica. UMSA. La Paz, Bolivia, p.130.
5. Dizes J. & Bonifacio A., 1992. Estudio en microscopia electrónica de la morfología de los órganos de la quínoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) y de la cañihua (*Chenopodium pallidicaule* Aellen) en relación con la resistencia ala sequía, Actas del VII Congreso Internacional de Cultivos Andinos. La Paz, Bolivia, pp. 69-74.
6. Eвлagon D.L., Ravina I. & Seumann P., 1990. Interactive effects of salinity and calcium on hydraulic conductivity, osmotic adjustment and growth in primary roots of maize seedlings. *J. Botany*, 39: 239-247.
7. Fleming J.E. & Galway N.W., 1995. Quinoa (*Chenopodium quinoa*), Cereals and pseudocereals (J.T. William, ed.), Chapman & Hall, pp. 3-83.
8. Fresnillo Fedorenko D.E., Fernandez O.A. & Busso C.A., 1995. The effect of water stress on top and root growth in *Medicago minima*. *Journal of Arid Environments*, Vol. 29 (1): 47-54.
9. Garcia M., Vacher J. & Hidalgo J., 1992. Estudio comparativo del comportamiento hídrico de dos variedades de quínoa en el altiplano central. Actas del VII Congreso Internacional de Cultivos Andinos. La Paz, Bolivia, pp. 57-61.
10. Gorham J., 1996. Mechanisms of salt tolerance of halophytes, Halophytes and biosaline agriculture (R. Choukr-Allah, C.V. Malcolm & A. Hamdy, eds.). Dekker, New York, pp. 31-53.
11. Hovenden M.J. & Seppelt R.D., 1995. Utility of modulated fluorescence in measuring photosynthetic activity of Antarctic plants: Field and laboratory studies. *Aust. J. Plant Physiol.*, 22: 321-330.
12. Hunt R., 1990. Basic growth analysis. Allen and Unwin, New Zeland. p. 86.
13. International Atomic Energy Agency (IAEA), 1995. Introduction, management strategies to utilize salt affected soils. IAEA-TECDOC-814, Vienna, pp. 7-10.
14. Jacobsen S.-E., Jørgensen, I. & Stølen O., 1994. Cultivation of quinoa (*Chenopodium quinoa*) under temperate climatic conditions in Denmark. *Journal of Agricultural Science, Cambridge*, 122, 47-52.
15. Kergreis A., 1995. Sécheresse: risque écologique majeur pour le XXI siècle (Editorial). *Sécheresse* Vol. 6 (1): 7-8.
16. Kramer P.J., 1980. Drought stress and the origin of adaptations. Adaptation of plant to water and high temperature stress (N.C. Turner and P.J. Kramer, eds.), J. Wiley and Sons. New York. pp 7-20.
17. Lal A. & Edwards G.E., 1996. Analysis of inhibition of photosynthesis under water stress in the C₄ species *Amaranthus cruentus* and *Zea mays*: electron transport, CO₂ fixation and carboxylation capacity. *Aust. J. Plant Physiol.*, 23: 403-412.
18. Lichtenthaler H.K., 1992. Review: The Kautsky effect: 60 years of chlorophyll fluorescence induction kinetics. *Photosynthetica* 27 (1-2): 45-55.
19. Munns R. & Termaat A., 1986. Whole-plant responses to salinity. *Aust. J. Plant Physiol.*, 13: 143-160.
20. National Drought Mitigation Center - NDMC. 1996. Drought happens. University of Nebraska. Lincoln. USA.
21. Shannon, M.C., 1992. Effects of salinity on cellular and biochemical processes associated with salt tolerance in tropical plants, Proc. Plant stress in the tropical environment (T.L. Davenport and H.M. Harrington, eds.), Univ. FL, pp. 56-63.

H. Bosque, Bolivian, Agronomist Engineer, MSc. Soil Science and Eremology, Lecturer of Highland Plateau and Valleys Crops at Faculty of Agriculture of the State University of San Andres, P.O. Box 12807, Phone/Fax 591-2-419119. hbosque@hotmail.com; La Paz - Bolivia.

R. Lemeur, Belgian, Prof. Dr. ir. Physiological and Biophysical Ecology, Academic Staff and Head of the Department of Applied Ecology and Environmental Biology. Faculty of Agriculture and Applied Biological Sciences. University of Ghent. Phone +32(0)9 2646087. raoul.lemeur@rug.ac.be; Coupure Links 653, B-9000 Ghent-Belgium.

P. Van Damme, Belgian, Prof. Dr. ir. Tropical and Subtropical Agronomy and Etnobotany. Academic Staff of the Department of Plant Production, Faculty of Agriculture and Applied Biological Sciences. University of Ghent. Phone +32(0)9 2646087. patrick.van.damme@rug.ac.be; Coupure Links 653, B-9000 Ghent-Belgium.