



Terra Latinoamericana

E-ISSN: 2395-8030

terra@correo.chapingo.mx

Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo,
A.C.
México

Sánchez-Bernal, E.; Ortega-Escobar, M.; González-Hernández, V.; Ruelas-Angeles, G.; Kohashi-Shibata, J.; García-Calderón, N.

Tolerancia de tubérculos de papa cv. Alpha en etapa de brotación a condiciones de salinidad

Terra Latinoamericana, vol. 21, núm. 4, octubre-diciembre, 2003, pp. 481-491

Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C.

Chapingo, México

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=57321404>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal

Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

TOLERANCIA DE TUBÉRCULOS DE PAPA cv. Alpha EN ETAPA DE BROTACIÓN A CONDICIONES DE SALINIDAD

Tolerance of Potato Tubers cv. Alpha in Sprouting Stage to Salinity Stress

E. Sánchez-Bernal^{1‡}, M. Ortega-Escobar^{1§}, V. González-Hernández¹, G. Ruelas-Angeles¹, J. Kohashi-Shibata¹ y N. García-Calderón²

RESUMEN

En macetas experimentales, se estudió la tolerancia en fase de brotación de tubérculos de papa (*Solanum tuberosum* L.) cv. Alpha, al estrés inducido por soluciones de sales puras NaCl, NaHCO₃, Na₂SO₄, CaCl₂·2H₂O, MgCl₂·6H₂O y MgSO₄·7H₂O a concentraciones de 0.00, 1.13, 2.48, 3.84, 5.19, 6.40 y 9.60 g L⁻¹. Los resultados indican una respuesta diferencial de la brotación y del desarrollo de brotes de tubérculos de acuerdo con el tipo de sal y con la concentración. El porcentaje de brotes emergidos aumentó con el tiempo en todos los casos y el promedio de peso seco de raíz y parte aérea de los brotes formados disminuyó al aumentar la concentración salina. Las sales experimentadas disminuyeron el promedio porcentual total de brotes emergidos como sigue: Na₂SO₄ < MgCl₂·6H₂O < MgSO₄·7H₂O < NaHCO₃ < NaCl < CaCl₂·2H₂O, y el promedio de peso seco total de brotes en el siguiente orden: Na₂SO₄ < CaCl₂·2H₂O < NaCl < MgCl₂·6H₂O < MgSO₄·7H₂O < NaHCO₃. El mayor porcentaje de brotes emergidos lo registró el tratamiento de Na₂SO₄ con 89.55% y el menor porcentaje el tratamiento de CaCl₂·2H₂O con 74.36%. Los datos también revelan que, en todos los casos, los brotes acumularon más biomasa en la raíz que en la parte aérea y que los brotes de tubérculos en la fase de acumulación de biomasa de raíz y parte aérea pueden considerarse como sensibles a las sales NaHCO₃ y MgSO₄·7H₂O, ya que presentaron su máxima acumulación de biomasa a una concentración de 1.13 g L⁻¹, moderadamente sensibles a NaCl y MgCl₂·6H₂O, ya que la máxima acumulación de biomasa se registró a

2.48 g L⁻¹, moderadamente tolerantes a Na₂SO₄, ya que su máxima acumulación de biomasa se presentó a 3.84 g L⁻¹ y tolerantes a CaCl₂·2H₂O, debido a que la máxima acumulación de biomasa se presentó a 6.40 g L⁻¹.

Palabras clave: *Solanum tuberosum* L., soluciones salinas, estrés salino, conductividad eléctrica, potencial osmótico, biomasa.

SUMMARY

In experimental plots, the tolerance of sprouting potato tubers (*Solanum tuberosum* L.) cv. Alpha to stress induced by salt solutions of NaCl, NaHCO₃, Na₂SO₄, CaCl₂·2H₂O, MgCl₂·6H₂O, and MgSO₄·7H₂O, at different concentrations (0.00, 1.13, 2.48, 3.84, 5.19, 6.40, and 9.60 g L⁻¹) was studied. Results showed a differential response in sprout emergence and seedling growth in accordance with salt treatment and concentration. In all cases, the emergence rate of sprouts increased with time and the average dry weight of roots and shoot decreased as salinity increased; salt treatments decreased the total sprouting rate in the following order: Na₂SO₄ < MgCl₂·6H₂O < MgSO₄·7H₂O < NaHCO₃ < NaCl < CaCl₂·2H₂O, and the total average dry weight of sprouts in this order: Na₂SO₄ < CaCl₂·2H₂O < NaCl < MgCl₂·6H₂O < MgSO₄·7H₂O < NaHCO₃. The highest rate of sprouting was found in the Na₂SO₄ treatment with 89.55% and the lowest rate in the CaCl₂·2H₂O treatment with 74.36%. The data also show that in all cases the sprouts accumulated more biomass in root than in shoot and that the sprouts of potato tubers in this stage can be considered sensitive to NaHCO₃ and MgSO₄·7H₂O since at a concentration of 1.13 g L⁻¹ the highest accumulation of biomass was registered; they were moderately sensitive to NaCl and MgCl₂·6H₂O since the maximum accumulation of biomass was registered at 2.48 g L⁻¹, moderately tolerant to Na₂SO₄ because the highest accumulation of biomass occurred with 3.84 g L⁻¹, and tolerant to CaCl₂·2H₂O since the

¹ Instituto de Recursos Naturales, Colegio de Postgraduados. Km 36.5 carretera México-Texcoco, 56230 Montecillo, estado de México. [‡] Autor responsable. [§] (manueloe@colpos.colpos.mx)

² Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. 04510 México, D.F. (negc@hp.fcencias.unam.mx)

maximum accumulation of biomass was registered at 6.40 g L^{-1} .

Index words: *Solanum tuberosum L.*, salt solutions, stress, electric conductivity, osmotic potential, biomass.

INTRODUCCIÓN

La papa (*Solanum tuberosum* L.) es el cuarto cultivo más importante en el orbe. Su capacidad de distribución espacial desde el nivel del mar hasta alturas superiores a 3500 m, su adaptación a diferentes climas y suelos, la riqueza nutrimental del tubérculo (gran contenido proteico, vitaminas, minerales y elementos traza), su alto rendimiento y valor económico por unidad de superficie cultivada, son características que sustentan su producción en 130 países. En este contexto, México es un país productor de papa, destinando 72 000 ha para su cultivo, con una producción media anual de 1 213 000 Mg, con un rendimiento promedio de 14 Mg ha^{-1} se logran en condiciones de temporal y de 30 Mg ha^{-1} en condiciones de riego (FAO, 1990).

El cultivo de papa se ha convertido en el principal cultivo hortícola de invierno en muchas zonas áridas y semiáridas con irrigación de México. En dichas áreas, 60% de los suelos presentan problemas de salinidad y las aguas utilizadas en la agricultura incrementan cada vez más su concentración salina, con el riesgo de que la papa disminuya su frontera de cultivo y potencial productivo, debido al aumento de la concentración de sales en el espesor de suelo donde se desarrollan los tubérculos y las raíces de la planta. Por ello, es de gran interés investigar el comportamiento del cultivo cuando se somete a condiciones de estrés salino, sus niveles de tolerancia a sales en cada etapa de crecimiento y su rendimiento.

Las observaciones de Bernstein (1964) indican que esta hortaliza es moderadamente sensible a salinidad, pues a conductividades de 3 a 6 dS m^{-1} de soluciones de cloruro de sodio reduce drásticamente su rendimiento; no obstante, la tolerancia depende de la variedad. Levy (1992) examinó la tolerancia a sales de 14 cultivares de papa sometidas a soluciones salinas de cloruro de sodio y cloruro de calcio con conductividad eléctrica de 6.1 a 6.9 dS m^{-1} y reportó que la salinidad retardó la emergencia de plántulas, redujo el crecimiento de tallos y tubérculos y retardó la maduración. En este caso, las variedades tempranas fueron más tolerantes a la salinidad. Martínez *et al.*

(1996) señalaron que cv. Alpha es sensible a la salinidad, sin embargo, se desconoce su respuesta a distintos tipos de sales en crecimiento y desarrollo.

El presente trabajo pretende analizar la emergencia y acumulación de biomasa de brotes de tubérculos cv. Alpha en diversas condiciones de salinidad cualitativa y cuantitativa, utilizando seis sales puras: NaCl, NaHCO_3 , Na_2SO_4 , $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ y $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, y siete concentraciones 0.00 , 1.13 , 2.48 , 3.84 , 5.19 , 6.40 y 9.60 g L^{-1} y, en consecuencia, obtener un mejor conocimiento de la tolerancia de los brotes de tubérculos en estas condiciones.

MATERIALES Y MÉTODOS

En invernadero, los tubérculos de papa (*Solanum tuberosum* L.) cv. Alpha se plantaron en macetas experimentales de plástico, conteniendo 10 kg de agrolita uniformemente distribuida, y cubiertas con una capa de 2 cm de espesor de tezontle. La densidad de plantación fue de tres tubérculos por maceta. A cada maceta se aplicó un volumen de 2 L de solución salina conforme los tratamientos establecidos, diseñados como experimentos independientes; se utilizaron seis sales puras (una por tratamiento): NaCl, NaHCO_3 , Na_2SO_4 , $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ y $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$. Se estableció un testigo o control (C_0) con agua destilada y seis niveles de salinidad con concentraciones de 1.13 , 2.48 , 3.84 , 5.19 , 6.40 y 9.60 g L^{-1} , que teóricamente corresponden a conductividades eléctricas teóricas en la solución de 1.77 , 3.88 , 6.00 , 8.11 , 10.00 y 15.00 dS m^{-1} , respectivamente, y que, de acuerdo con lo señalado por Maas y Hoffman (1977), tienden a disminuir la brotación en el orden de 0% (C_1), 25% (C_2), 50% (C_3), 75% (C_4), 100% (C_5) y 150% (C_6).

Las soluciones se prepararon en laboratorio, se determinó su pH con un potenciómetro Beckman, la conductividad eléctrica (dS m^{-1}) con un conductímetro o puente de Wheatstone y el potencial osmótico $\Psi\pi$ (MPa) con un osmómetro Vapro Wescor 5520. El riego consistió en la reposición de agua consumida por evapotranspiración cada tercer día, a fin de mantener las unidades experimentales a peso constante; la temperatura del invernadero osciló entre 13 y 25°C . El experimento tuvo una duración de dos meses (del 30 de mayo al 30 de julio de 2000), período en el cual la fisiología de la planta de papa inicia la etapa de tuberización (Rousselle y Robert, 1996). Durante este lapso se hicieron observaciones

del número de días a la emergencia de brotes, del número de brotes formados, de la altura de plantas y del número de hojas por plántula. Finalmente, los brotes y las plántulas se cosecharon, separando la raíz y la parte aérea de los tubérculos, y se realizaron determinaciones de peso fresco y peso seco. El porcentaje de brotación se obtuvo considerando un total de tres brotes por tubérculo, es decir, nueve brotes por maceta, y se establecieron tres réplicas por cada tratamiento. Los datos colectados se agruparon en fechas de brotación a 30, 40, 50 y 60 días, así la brotación total se registró de manera acumulada, en forma similar al método empleado por Ayers y Hayward en 1948. Un brote de papa emergido se definió como aquel tallo visible inmediatamente arriba del sustrato (Moorby y Milthorpe, 1983). Se calibró un modelo lineal de predicción del peso seco total de brotes (PST) en función de la conductividad eléctrica de las soluciones, mediante la ecuación:

$$y = A + Bx$$

Donde: y = peso seco total de brotes (g), A = ordenada al origen, B = pendiente de la recta o número de unidades (g) que disminuye el PST por unidad de incremento de la CE en la solución, x = CE de la solución (dS m^{-1}).

Los análisis de regresión lineal y de varianza para determinar diferencias significativas con $P < 0.05$, se efectuaron mediante el sistema de análisis estadístico SAS (SAS Institute, 1996).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Efecto de la Salinidad en la Conductividad Eléctrica y en el Potencial Osmótico de las Soluciones

Los datos del Cuadro 1 indican que la conductividad eléctrica (CE) de las soluciones de acuerdo con el tipo de sal presentó el siguiente orden: $\text{NaCl} > \text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} > \text{Na}_2\text{SO}_4 > \text{NaHCO}_3 > \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} > \text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$. La sal NaCl registró los valores más altos de CE y $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ los más bajos, de manera que el comportamiento de los valores de CE está en relación directa con la concentración de sales; al aumentar la concentración, se incrementa la CE en una magnitud que depende del tipo de sal de acuerdo con el orden indicado. Por ejemplo, la sal NaCl se constituye por iones monovalentes de alto radio de hidratación y bajo

coeficiente energético iónico por lo cual son muy móviles, generando mayor conductancia. No sucede lo mismo con la sal $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ cuyos iones divalentes son menos móviles y, por lo tanto, disminuye su capacidad de conductancia eléctrica. Las diferencias de CE producidas por el tipo de sal y concentración guardan estrecha relación con el comportamiento del potencial osmótico producido por cada sal.

Los datos del Cuadro 1 también revelan que cada sal generó, en la solución, un potencial osmótico distinto que disminuyó conforme se incrementó la concentración salina en el orden siguiente: $\text{NaCl} > \text{NaHCO}_3 > \text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} > \text{Na}_2\text{SO}_4 > \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} > \text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$. La diferencia del potencial osmótico producido por las sales a una misma concentración obedece al peso molecular, grado de ionización y coeficiente osmótico de cada soluto (Keenan *et al.*, 1990) y reviste gran importancia en la especificación de sales que tienen un mayor efecto osmótico o un mayor efecto tóxico, lo cual incidió en la brotación y en el crecimiento de plántulas de papa.

Efecto del Tipo de Sal y su Concentración en la Emergencia de Brotes del Tubérculo

En el Cuadro 1, se observa que la emergencia de brotes de tubérculos de papa aumentó con el tiempo en todos los casos. Según Levy (1992), este retraso en la emergencia se debe al estrés osmótico y tóxico a que se sometieron los tubérculos por la solución salina, ya que, al inicio se presenta un desbalance hídrico al interior del órgano vegetal y una excesiva absorción de iones tóxicos que inhiben procesos enzimáticos importantes, como la síntesis de nitrato reductasa y de poliaminas, esenciales para que el tejido seminal promueva la germinación o brotación. Esto coincide con lo señalado por Moorby y Milthorpe (1983), quienes indicaron que tubérculos de papa sometidos a estrés hídrico incrementan la tasa de descomposición de proteínas, lo que restringe el crecimiento y la emergencia de brotes; es decir, el sistema se ve retardado directa o indirectamente a causa del déficit de agua. Una vez que los tubérculos son capaces de adecuarse a este cambio osmótico mediante la regulación de su régimen hídrico y el aprovechamiento al máximo de sus sustancias de reserva, mecanismos considerados como de tolerancia al estrés, entonces incentivan su brotación para continuar su ciclo de vida; esta adaptación al estrés salino requiere tiempo.

Cuadro 1. Efecto de seis sales puras (NaCl, NaHCO₃, Na₂SO₄, CaCl₂·2H₂O, MgCl₂·6H₂O y MgSO₄·7H₂O), en la conductividad eléctrica (CE), pH y potencial osmótico de la solución de macetas experimentales y en el porcentaje de brotes emergidos de tubérculos de papa.

Sal	Concentración solución	CE solución	pH solución	Potencial osmótico solución ($\Psi\pi$)	Porcentaje de brotes emergidos			
					30 días	40 días	50 días	60 días
	g L ⁻¹	dS m ⁻¹		MPa				
NaCl	0.00 [†]	0.00	7.20	0.00	29.33	58.66	80.66	87.99 a
	1.13	2.20	6.04	-0.15	11.00	44.00	58.66	69.66 a
	2.48	4.20	5.94	-0.22	11.00	11.00	58.00	72.66 a
	3.84	6.40	5.92	-0.28	3.66	40.32	73.32	91.65 a
	5.19	8.60	5.88	-0.34	0.00	7.30	54.96	76.96 a
	6.40	10.50	5.84	-0.48	0.00	7.33	51.30	69.63 a
	9.60	15.40	5.82	-0.68	22.00	25.66	36.66	76.99 a
NaHCO ₃	0.00	0.00	7.20	0.00	14.66	43.99	73.32	76.98 a
	1.13	1.30	8.91	-0.15	11.00	33.00	58.66	69.66 a
	2.48	2.50	8.96	-0.19	3.66	14.66	36.66	62.32 a
	3.84	3.60	8.95	-0.21	3.66	43.99	80.65	95.31 a
	5.19	4.80	8.93	-0.25	11.00	11.00	44.00	69.66 a
	6.40	5.50	8.91	-0.29	0.00	11.00	55.00	77.00 a
	9.60	8.80	8.90	-0.43	0.00	14.66	32.99	95.32 a
Na ₂ SO ₄	0.00	0.00	7.20	0.00	22.00	58.66	62.32	76.98 a
	1.13	1.90	6.10	-0.12	14.66	40.32	54.98	76.98 a
	2.48	3.40	6.07	-0.14	11.00	25.66	65.99	76.99 a
	3.84	4.90	6.12	-0.17	22.00	36.66	91.66	98.99 a
	5.19	6.40	6.05	-0.22	11.00	73.33	91.66	98.99 a
	6.40	7.50	6.06	-0.24	0.00	47.66	87.99	98.99 a
	9.60	10.90	6.08	-0.36	11.00	58.66	95.32	98.98 a
CaCl ₂ ·2H ₂ O	0.00	0.00	7.20	0.00	3.66	29.32	65.98	87.98 a
	1.13	1.80	5.58	-0.12	22.00	36.66	54.99	58.65 a
	2.48	3.50	5.56	-0.16	14.66	65.99	76.99	80.65 a
	3.84	5.10	5.60	-0.20	3.66	47.66	62.32	62.32 a
	5.19	6.90	5.52	-0.22	3.66	36.66	47.66	62.32 a
	6.40	8.20	5.56	-0.27	14.66	47.66	54.99	87.99 a
	9.60	12.20	5.43	-0.37	0.00	44.00	66.00	80.66 a
MgCl ₂ ·6H ₂ O	0.00	0.00	7.20	0.00	11.00	51.33	62.33	84.33 a
	1.13	1.30	5.98	-0.12	0.00	47.66	51.32	76.98 a
	2.48	2.30	5.78	-0.14	25.66	73.32	73.32	98.98 a
	3.84	3.70	5.76	-0.17	0.00	44.00	51.33	58.66 a
	5.19	4.70	5.60	-0.19	25.66	69.66	91.66	98.99 a
	6.40	5.90	5.59	-0.21	3.66	32.99	87.99	98.99 a
	9.60	8.30	5.47	-0.28	14.66	76.99	91.65	91.65 a
MgSO ₄ ·7H ₂ O	0.00	0.00	7.20	0.00	7.33	73.33	87.99	98.99 a
	1.13	0.90	6.01	-0.13	11.00	22.00	44.00	62.33 a
	2.48	1.60	6.00	-0.14	18.33	51.66	69.99	77.32 a
	3.84	2.20	5.93	-0.14	22.00	25.66	73.32	98.98 a
	5.19	2.80	5.91	-0.14	0.00	22.00	55.00	66.00 a
	6.40	3.30	5.92	-0.16	14.66	43.99	58.65	80.65 a
	9.60	4.50	5.95	-0.19	3.66	3.66	47.66	84.32 a

[†] 0.00 g L⁻¹ = testigo o control con agua destilada. Nota: medias con la misma letra no son significativamente diferentes ($\alpha = 0.05$; Pr > F = 0.1777 entre tratamientos y Pr > F = 0.1385 entre concentraciones).

La inferencia estadística indica que la emergencia de brotes no presentó diferencia significativa entre tratamientos y concentraciones, lo que obedece a la alteración fisiológica de los tubérculos semilla como consecuencia del efecto osmótico y tóxico de las sales, alteración íntimamente ligada con la madurez fisiológica de la semilla. Los tubérculos con menos dormancia produjeron mayores porcentajes de emergencia de brotes debido al efecto nutritivo inicial de las soluciones salinas, mientras que los tubérculos con más madurez fisiológica aumentaron su período de latencia, debido a la alteración de procesos bioquímicos y niveles hormonales por la salinidad (Strogonov, 1964; Moorby y Milthorpe, 1983). Esto explica los altibajos en dicho porcentaje entre tratamientos y concentraciones de 30 a 50 días después de la siembra (dds). En el periodo de 50 a 60 dds, se presentó el fenómeno de pérdida de dominancia apical de la yema terminal del tubérculo que consiste en que el brote apical inhibe su crecimiento por efectos de estrés hídrico y se estimula el crecimiento de las yemas subsiguientes, generando una brotación múltiple con brotes raquíuticos. Este efecto fue más intenso en las sales de gran solubilidad y toxicidad a altas concentraciones; en consecuencia, los porcentajes de emergencia fueron próximos entre tratamientos y grado de salinidad, razón por la cual el análisis estadístico no reporta diferencias significativas.

Independientemente del análisis estadístico, se empleó el análisis porcentual como medida aritmética de comparación de datos (Ayers y Hayward, 1948), lo que permitió determinar una respuesta diferencial entre tipos de sal y concentraciones. El mayor porcentaje en promedio de emergencia de brotes lo registró el tratamiento de Na_2SO_4 (89.55%) y el menor porcentaje el tratamiento de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (74.36%); sin embargo, este último presentó los brotes más vigorosos. Entre concentraciones tal diferencia de brotación se manifestó de acuerdo con el grado de salinidad y con el tipo de sal, así en los tratamientos NaCl , NaHCO_3 , $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ y $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, se observan incrementos en el porcentaje de brotación total de 3.84 a 9.60 g L^{-1} , en tanto que la brotación en el tratamiento con la sal Na_2SO_4 , manifestó un comportamiento más consistente de 2.48 a 9.60 g L^{-1} .

Con relación al porcentaje total de emergencia de brotes (60 dds), las sales que disminuyeron dicho porcentaje con respecto al testigo fueron $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ con 14.67%, NaCl con 11% y

$\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ con 7.32%; por el contrario, las sales que incrementaron el porcentaje de emergencia de brotes con respecto al testigo aun a concentraciones de 6.40 y 9.60 g L^{-1} fueron las de Na_2SO_4 con 22%, de NaHCO_3 con 18.34% y de $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ con 7.32%. El tratamiento más homogéneo fue el de soluciones de Na_2SO_4 que, junto con el de $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, mostró más consistencia que el resto al promover una emergencia de brotes cercana a 90% entre 30 y 60 dds. La concentración que más favoreció el porcentaje de brotación total fue la de 3.84 g L^{-1} para las sales NaCl , NaHCO_3 , Na_2SO_4 y $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, mientras que el mejor porcentaje de emergencia de brotes para las sales $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ y $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ se registró entre 3.84 y 6.40 g L^{-1} .

Los tratamientos $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, NaHCO_3 y $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, sales de gran solubilidad y toxicidad en las plantas, favorecieron porcentajes de brotación mayores que los generados por las sales NaCl y $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ de efecto puramente osmótico; sin embargo, el hecho de que las tres primeras sales hayan producido mayores porcentajes de brotación, no implica que se formaran brotes normales. Por el contrario, a concentraciones de 5.19, 6.40 y 9.60 g L^{-1} estas sales provocaron en los tubérculos una brotación copiosa, pero con brotes raquíuticos, cloróticos y con marcada inhibición en su crecimiento y desarrollo. Moorby y Milthorpe (1983) señalaron que un efecto del estrés térmico e hídrico en los tubérculos de papa es la pérdida de dominancia apical de la yema terminal, ya que inhibe su crecimiento, provocando que el resto de las yemas subsiguientes en estado latente reasuman su crecimiento sin que se restablezca dicha dominancia, lo que produce una competencia intensa de efectos negativos. Esto evidencia el comportamiento de la tasa de brotación de tubérculos sometidos a dichas sales. Aunado a lo anterior, en algunos casos, como en el tratamiento $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ a una concentración de 9.60 g L^{-1} , se desarrollaron plantas enanas con hojas micrófilas, lo que puede considerarse como una tendencia al haloxerismo en respuesta de los brotes al estrés salino. Para Poljakoff y Lerner (1994), éste es un mecanismo de las plantas no halófitas para tolerar la salinidad, de hecho, como lo señaló Jacoby (1994), una gran absorción iónica puede provocar que el organismo vegetal o el órgano incentive sus procesos metabólicos y enzimáticos a fin de promover un rápido crecimiento poco sostenido para evadir la salinidad.

Con relación a la tolerancia a la salinidad, entendida por Shannon y Griene (1999) como la

capacidad de un genotipo vegetal para crecer y desarrollarse aun en condiciones de estrés salino, sin una severa disminución de su tasa de crecimiento, se infiere que en cuanto a la emergencia de brotes normales que dieron origen a plántulas estructuralmente bien definidas, los tubérculos deben ser considerados de moderadamente sensibles (para NaHCO_3 y $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), a moderadamente tolerantes (para NaCl , Na_2SO_4 y $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), pues produjeron brotes normales con concentraciones de 1.13 a 3.84 g L⁻¹, mientras que para $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ los tubérculos deben considerarse como tolerantes, ya que produjeron brotes normales con una concentración de 6.40 g L⁻¹; después de tales concentraciones, los brotes emergidos en los tratamientos mencionados en primer término fueron múltiples, raquíticos y con quemaduras en el ápice, algunos de los cuales dieron origen a plantas enanas con hojas micrófilas.

Efectos de la Concentración Salina en el Peso Seco de Raíz y Parte Aérea

Los datos del Cuadro 2 presentan una tendencia general de las sales a disminuir el peso seco de raíz y de parte aérea de los brotes conforme aumenta la concentración, efecto que difiere de acuerdo con la naturaleza de la sal y grado de salinidad. El análisis de varianza indica que entre tratamientos, Na_2SO_4 fue el más sobresaliente, pues produjo la menor reducción del promedio de peso seco de ambas secciones del brote. En contraste, NaHCO_3 registró la mayor reducción, existiendo diferencia significativa entre ellos; el resto de los tratamientos son estadísticamente iguales. El orden de reducción del promedio de peso seco de raíz es el siguiente: $\text{NaHCO}_3 > \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} > \text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} > \text{NaCl} > \text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} > \text{Na}_2\text{SO}_4$ y el del promedio de peso seco de la parte aérea presenta la secuencia: $\text{NaHCO}_3 > \text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} > \text{NaCl} > \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} > \text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} > \text{Na}_2\text{SO}_4$. Entre concentraciones, las que menos redujeron el promedio de peso seco, tanto de raíz, como de parte aérea oscilan en el intervalo de 0 a 2.48 g L⁻¹, mientras que las de 3.84 a 9.60 g L⁻¹ produjeron la mayor reducción; es decir, la diferencia significativa para el promedio de peso seco de raíz se establece a partir de 3.84 g L⁻¹ y el de la parte aérea se registra desde 6.40 g L⁻¹. Las sales NaHCO_3 , $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ y $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, son las que más disminuyeron el peso seco de raíz y parte aérea.

La tendencia de los órganos vegetales a disminuir su acumulación de biomasa conforme aumenta la

concentración salina obedece al efecto osmótico y tóxico de las sales que deshidrata el protoplasma celular, inhibe la síntesis de proteínas y enzimas promotoras del crecimiento y disminuye el flujo de sustancias nitrogenadas y de carbohidratos hacia las zonas meristemáticas, limitando su crecimiento (Strogonov, 1964). La disminución del crecimiento depende de la concentración, así como del tiempo de exposición al estrés y es más intensa en sales de gran efecto osmótico, como NaCl , y en sales sumamente tóxicas, como NaHCO_3 , $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ y $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$; en el caso de la sal bicarbonatada, el efecto obedece a procesos de hidrólisis alcalina que destruyen tejidos de crecimiento, mientras que en $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ y $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ la disminución del crecimiento se debe a la toxicidad de iones específicos (Ortega, 1993).

En cuanto a la proporción de biomasa acumulada en raíz y parte aérea, se observa que, en los seis tratamientos, la mayor parte de la biomasa (aproximadamente 60 a 80%) se encuentra en la raíz, dependiendo del tipo de sal; así, en NaCl , NaHCO_3 y $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, este órgano aumentó su proporción de biomasa acumulada de 67.41 a 75.58%, 81.92 y 90.16%, respectivamente, al pasar de 0 a 9.60 g L⁻¹, estas tres sales de gran solubilidad promovieron una mayor proporción de biomasa en la raíz a altas concentraciones (3.84 a 9.60 g L⁻¹). Por su parte, los tratamientos de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ y $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ también incrementaron la proporción de biomasa en la raíz en el intervalo de concentración citado, de 67.41 a 79.45% y 71.52%, respectivamente; su máxima proporción de acumulación la registraron a 9.60 g L⁻¹. El tratamiento de Na_2SO_4 registró la menor proporción de biomasa en la raíz, pues su porcentaje máximo fue de 72.61 a una concentración de 2.48 g L⁻¹, este porcentaje disminuyó a 62.63 en la concentración de 9.60 g L⁻¹.

La tendencia de la raíz a acumular más biomasa que la parte aérea en condiciones de estrés salino, ha sido reportada por Poljakoff y Lerner (1994), quienes indicaron que la salinidad induce inhibición del crecimiento y, en muchos casos, el tallo es más afectado que la raíz, incluso en muchas de las plantas estudiadas glycophytas y halophytas, el efecto de la salinidad sobre el crecimiento de la raíz es una función de la concentración salina. Algunas concentraciones pueden estimular el crecimiento de dicho órgano, mientras que inhiben el crecimiento del tallo; este fue el caso de plantas de chícharo las cuales, después de someterse cinco días a una solución de 120 mM de NaCl , incrementaron su

Cuadro 2. Efecto de la concentración de seis sales puras sobre el peso seco de raíz y parte aérea de brotes de tubérculos de papa.

Sal	Concentración solución	Promedio peso seco raíz	Parámetros estadísticos	Promedio peso seco parte aérea	Parámetros estadísticos	Peso seco total	Parámetros estadísticos
	g L ⁻¹	g		g		g	
Testigo (A ^{1,2,3})	0.00	1.21 a ⁴		0.58 a ⁵		1.80 a ⁶	
NaCl	1.13	1.11 ba	$\sigma = 0.06$	0.60 ba	$\sigma = 0.19$	1.72 ba	$\sigma = 0.38$
	2.48	1.23 ba	Error = 0.10	0.47 ba	Error = 0.12	1.70 bac	Error = 0.17
(BA ^{1,2} , BAC ³)	3.84	1.04 bc*	M = 0.99	0.20 ba	M = 0.34	1.24 bdc*	M = 1.34
	5.19	0.97 bc*	CV = 6.46%	0.18 ba	CV = 57.52%	1.15 bdc*	CV = 28.97%
	6.40	0.71 c*		0.15 b*		0.87 dc*	
	9.60	0.72 c*		0.23 b*		0.95 d*	
NaHCO ₃	1.13	1.07 ba	$\sigma = 0.22$	0.33 ba	$\sigma = 0.18$	1.40 ba	$\sigma = 0.39$
	2.48	0.97 ba	Error = 0.10	0.12 ba	Error = 0.15	1.09 bac	Error = 0.22
(B ^{1,2} , C ³) [*]	3.84	0.91 bc*	M = 0.88	0.43 ba	M = 0.26	1.34 bdc*	M = 1.51
	5.19	0.78 bc*	CV = 25.50%	0.18 ba	CV = 70.19%	0.96 bdc*	CV = 25.90%
	6.40	0.57 c*		0.08 b*		0.65 dc*	
	9.60	0.67 c*		0.14 b*		0.82 d*	
Na ₂ SO ₄	1.13	1.38 ba	$\sigma = 0.19$	0.61 ba	$\sigma = 0.09$	2.00 ba	$\sigma = 0.27$
	2.48	1.10 ba	Error = 0.12	0.41 ba	Error = 0.10	1.51 bac	Error = 0.21
(A ^{1,2,3})	3.84	1.28 bc*	M = 1.12	0.69 ba	M = 0.53	1.98 bdc*	M = 1.66
	5.19	1.18 bc*	CV = 17.62%	0.49 ba	CV = 18.39%	1.68 bdc*	CV = 16.65%
	6.40	0.89 c*		0.45 b*		1.35 dc*	
	9.60	0.84 c*		0.50 b*		1.34 d*	
CaCl ₂ ·2H ₂ O	1.13	1.10 ba	$\sigma = 0.17$	0.40 ba	$\sigma = 0.14$	1.50 ba	$\sigma = 0.21$
	2.48	1.16 ba	Error = 0.19	0.45 ba	Error = 0.15	1.62 bac	Error = 0.22
(BA ^{1,3} , A ²)	3.84	0.92 bc*	M = 1.04	0.51 ba	M = 0.50	1.44 bdc*	M = 1.55
	5.19	0.70 bc*	CV = 16.98%	0.55 ba	CV = 28.48%	1.25 bdc*	CV = 13.54%
	6.40	1.09 c*		0.74 b*		1.84 dc*	
	9.60	1.14 c*		0.29 b*		1.44 d*	
MgCl ₂ ·6H ₂ O	1.13	0.90 ba	$\sigma = 0.21$	0.48 ba	$\sigma = 0.13$	1.39 ba	$\sigma = 0.30$
	2.48	1.13 ba	Error = 0.18	0.37 ba	Error = 0.12	1.51 bac	Error = 0.24
(BA ^{1,2} , BAC ³)	3.84	0.62 bc*	M = 0.90	0.40 ba	M = 0.43	1.02 bdc*	M = 1.34
	5.19	0.94 bc*	CV = 23.37%	0.63 ba	CV = 30.45%	1.57 bdc*	CV = 22.38%
	6.40	0.76 c*		0.29 b*		1.06 dc*	
	9.60	0.76 c*		0.30 b*		1.06 d*	
MgSO ₄ ·7H ₂ O	1.13	1.00 ba	$\sigma = 0.19$	0.54 ba	$\sigma = 0.20$	1.54 ba	$\sigma = 0.37$
	2.48	1.07 ba	Error = 0.11	0.32 ba	Error = 0.08	1.39 bac	Error = 0.15
(BA ¹ , B ² *, BC ^{3*}).	3.84	0.79 bc*	M = 0.92	0.20 ba	M = 0.28	1.00 bdc*	M = 1.21
	5.19	0.78 bc*	CV = 20.64%	0.15 ba	CV = 72.45%	0.94 bdc*	CV = 31.22%
	6.40	0.95 c*		0.12 b*		1.07 dc*	
	9.60	0.66 c*		0.07 b*		0.73 d*	

¹ Prueba de medias entre tratamientos para la variable peso seco de raíz (Pr > F = 0.0211). ² Prueba de medias entre tratamientos para la variable peso seco de tallo (Pr > F = 0.0019). ³ Prueba de medias entre tratamientos para la variable peso seco total (Pr > F = 0.0011). ⁴ Prueba de medias entre concentraciones para la variable peso seco de raíz (Pr > F = 0.0001); ⁵ Prueba de medias entre concentraciones para la variable peso seco del tallo (Pr > F = 0.0038); ⁶ Prueba de medias entre concentraciones para la variable peso seco total (Pr > F = 0.0001). Medias con la misma letra no son significativamente diferentes (Tukey $\alpha = 0.05$). (*) Diferencia significativa.

longitud de raíz con respecto a las plantas control, pero tal tendencia disminuyó en el siguiente período. La elevada concentración de NaCl inhibió el crecimiento de la raíz, mientras que en tallo no se observó estímulo de crecimiento por la salinidad. Al respecto, Kafkafi y Bernstein (1996) señalaron evidencias de que a cierta salinidad se inhibe el crecimiento del tallo, el crecimiento de la raíz es

menos afectado, de manera que consideraron a la raíz más tolerante al estrés osmótico que al tallo. Por su parte, Levy (1992) indicó que algunas especies vegetales sometidas a estrés salino acumulan más biomasa en la raíz que en el tallo, como una forma de inducir a ésta para que localice espacios de menor concentración salina y, de esta manera, evadir el estrés; en todo caso, el objetivo es lograr la

supervivencia. El desbalance hormonal causado por la salinidad es también responsable de la distribución de biomasa en el vegetal.

En cuanto a la reducción de proporción de materia seca en la parte aérea, el tratamiento de Na_2SO_4 la incrementó de 32.58 a 37.36% para la concentración de 0 a 9.60 g L^{-1} . En cambio, el resto de las sales sí provocaron una reducción en dicha proporción en el siguiente orden: $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ de 32.58 a 28.47%, NaCl de 32.58 a 24.42%, $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ de 32.58 a 20.54%, NaHCO_3 de 32.58 a 18.07% y $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ de 32.58 a 9.83%, para la concentración señalada. Esto confirma que las sales NaHCO_3 y $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ inhibieron en forma drástica la acumulación de materia seca en la parte aérea, así se considera que los brotes de tubérculos de papa son poco tolerantes a estas sales, las que, por su alta solubilidad, son excesivamente tóxicas y dañinas para las plantas (Ortega, 1993).

Con relación a la disminución del promedio de peso seco total de brotes, el análisis estadístico revela que los tratamientos sobresalientes (con menos reducción en dicho promedio conforme aumentó la concentración salina) fueron Na_2SO_4 y $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, siguiendo en ese orden NaCl y $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, los que estadísticamente son iguales; la diferencia mínima significativa se registró para $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ y NaHCO_3 que disminuyeron acentuadamente el peso seco total. Las concentraciones con menor disminución de peso seco total oscilan de 0 a 2.48 g L^{-1} , a medida que aumentó el grado de salinidad de 3.84 a 9.60 g L^{-1} (intervalo significativamente diferente), la disminución fue más pronunciada. Estos datos indican que la etapa de crecimiento de brotes de tubérculos es más afectada por las sales $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ y NaHCO_3 señaladas por su toxicidad, quedando en un lugar intermedio el efecto provocado por las sales $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, NaCl y $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, caracterizadas por su efecto osmótico. Se debe precisar que el hecho de que $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ haya producido un mayor incremento de la biomasa acumulada en raíz, obedece a que el calcio es un ion deficiente en los tubérculos de papa y, por ende, altamente requerido por éstos para aumentar su tasa de crecimiento (Davies y Millard, 1985). Finalmente, el tratamiento Na_2SO_4 fue el que mostró una mejor proporción de reducción de crecimiento entre raíz y parte aérea, de manera que los tubérculos sufrieron más estrés por el efecto tóxico que por el efecto osmótico de las sales.

El análisis estadístico de los datos del Cuadro 3 permitió determinar que los tratamientos con mayor

altura de plántulas y número de hojas por plántula fueron $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, Na_2SO_4 , NaCl y $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ que a concentraciones de 1.13 a 3.84 g L^{-1} permitieron la formación de plántulas de porte medio con buena arquitectura vegetal, Na_2SO_4 y $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (plantas con 18 a 20 cm de altura y cuatro a seis hojas formadas), $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ y NaCl (plantas de 18 a 25 cm de altura y ocho hojas formadas). Este intervalo de tolerancia fue más amplio en los brotes sometidos con $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, pues de 5.19 a 9.60 g L^{-1} , los brotes formaron plantas cuyo crecimiento y desarrollo alcanzaron la etapa de tuberización (ocho hojas fotosintéticamente activas). De esto se infiere que los tubérculos para estas sales y concentraciones tuvieron una buena capacidad de regulación osmótica. Delauney y Verma (1993) y Heuer y Nadler (1998) reportaron esta capacidad de los tubérculos y de las plantas de papa de proveerse de agua en condiciones salinas. En el caso de las plantas desarrolladas en el tratamiento $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, se considera que fue el suministro de calcio que favoreció el crecimiento, como lo indicaron Davies y Millard (1985).

La diferencia significativa con respecto a $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ se presentó en $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ y NaHCO_3 , cuyos tubérculos brotaron formando plántulas de escasa altura (11 a 13 cm), raquíticas y cloróticas hasta una concentración de 3.84 g L^{-1} . Con concentraciones mayores, la inhibición del crecimiento y desarrollo de los brotes fue acentuada, producto de la toxicidad de dichas sales. Stroganov (1964) observó este efecto salino en el crecimiento en plantas de cebada, tomate y algodón; asimismo, Levy (1992) reportó la inhibición del crecimiento de brotes en condiciones salinas.

De acuerdo con lo señalado, se observa que, en cuanto al efecto producido por las sales NaHCO_3 y $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, los brotes de tubérculos de papa en la fase de acumulación de biomasa de raíces y parte aérea pueden considerarse como sensibles a la salinidad, pues a una concentración de 1.13 g L^{-1} presentaron su máxima acumulación de biomasa. En cuanto al efecto producido por las sales $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ y NaCl , los brotes deben considerarse como moderadamente sensibles, pues la máxima acumulación de biomasa se registró a 2.48 g L^{-1} . Por lo que se refiere a la sal Na_2SO_4 , los brotes se consideran moderadamente tolerantes, ya que su máxima acumulación de biomasa se presentó a 3.84 g L^{-1} y por lo que respecta a la sal $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, los brotes se consideran tolerantes, ya que la máxima acumulación de biomasa se presentó a 6.40 g L^{-1} .

Cuadro 3. Efecto de la concentración de seis sales puras en la altura de plántulas y número de hojas por plántula, provenientes de brotes de tubérculos de papa.

Sal	Concentración solución	Promedio altura de plántulas	Parámetros estadísticos	Número de hojas	Parámetros estadísticos
	g L ⁻¹	cm			
Testigo	0.00	13.00		6	
NaCl (BA ^{1,2})	1.13	18.00		8	$\sigma = 1$
	2.48	14.00	$\sigma = 4.99$	6	Error = 1.09
	3.84	25.00	Error = 5.45	8	M = 7
	5.19	20.00	M = 16.42	8	CV = 14.28%
	6.40	10.00	CV = 30.38%	6	
	9.60	15.00		7	
NaHCO ₃ (C ^{1,2})*	1.13	13.00	$\sigma = 6.60$	6	$\sigma = 2.88$
	2.48	13.50	Error = 3.37	5	Error = 1.37
	3.84	8.00	M = 6.78	4	M = 3
	5.19	0.00	CV = 97.34%	0	CV = 96%
	6.40	0.00		0	
	9.60	0.00		0	
Na ₂ SO ₄ (BA ¹ , A ²)	1.13	13.00	$\sigma = 3.13$	8	$\sigma = 0.97$
	2.48	18.00	Error = 3.40	8	Error = 1.06
	3.84	20.00	M = 16.14	9	M = 7.57
	5.19	20.00	CV = 19.39%	8	CV = 12.81%
	6.40	15.00		7	
	9.60	14.00		7	
CaCl ₂ ·2H ₂ O (A ^{1,2})	1.13	14.00	$\sigma = 4.84$	5	$\sigma = 1.60$
	2.48	16.50	Error = 1.12	6	Error = 0.81
	3.84	19.00	M = 19.07	8	M = 7.28
	5.19	21.50	CV = 25.38%	8	CV = 21.97%
	6.40	24.00		9	
	9.60	25.50		9	
MgCl ₂ ·6H ₂ O (BAC ^{1,2})	1.13	10.00	$\sigma = 4.18$	5	$\sigma = 1.46$
	2.48	15.00	Error = 4.38	6	Error = 0.93
	3.84	15.00	M = 12.92	5	M = 4.85
	5.19	20.00	CV = 32.35%	6	CV = 30.10%
	6.40	10.00		4	
	9.60	7.50		2	
MgSO ₄ ·7H ₂ O (BC ^{1,2})*	1.13	12.00	$\sigma = 2.31$	6	$\sigma = 1.38$
	2.48	11.50	Error = 0.70	5	Error = 0.64
	3.84	10.00	M = 9.92	4	M = 4.28
	5.19	8.00	CV = 23.28%	3	CV = 32.24%
	6.40	8.00		3	
	9.60	7.00		3	

¹ Prueba de medias entre tratamientos para la variable altura de plantas ($Pr > F = 0.002$); ² Prueba de medias entre tratamientos para la variable número de hojas ($Pr > F = 0.0001$).

Nota: Medias con la misma letra no son significativamente diferentes. (Tukey $\alpha = 0.05$).

(*) Significancia estadística.

Modelos de Predicción del Peso Seco Total de Brotes

Los modelos de calibración del peso seco total de brotes en función de la conductividad eléctrica de cada solución salina plasmados en el Cuadro 4, predicen que al aumentar la CE resultará una disminución del peso seco total de brotes, en el orden:

Na₂SO₄ < CaCl₂·2H₂O < NaCl < MgCl₂·6H₂O < MgSO₄·7H₂O < NaHCO₃.

Efecto del Potencial Osmótico de las Soluciones Salinas en el Peso Seco Total del Brote

En la Figura 1, se presenta el comportamiento del peso seco total de brotes en relación con el potencial

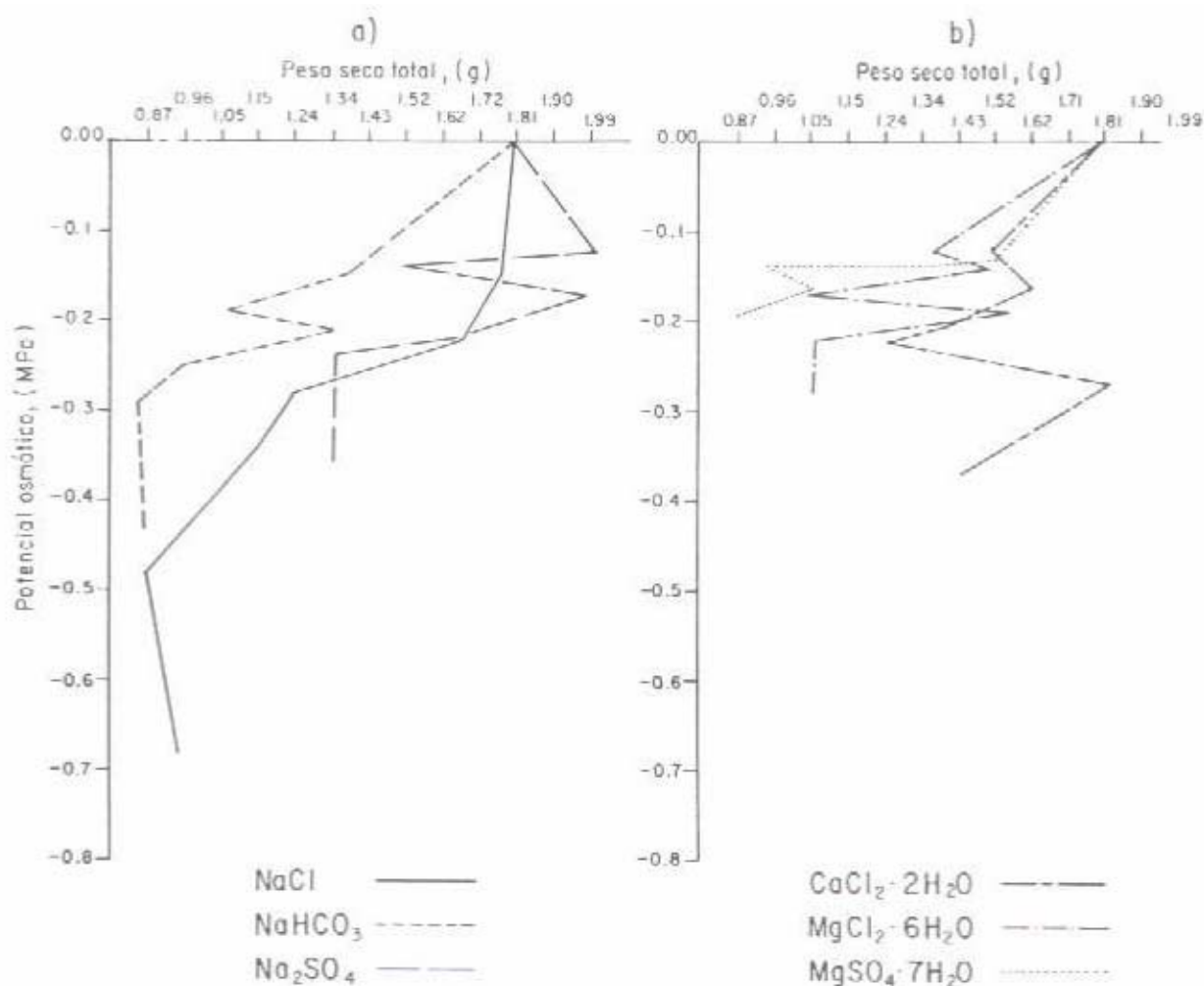


Figura 1. Efecto del potencial osmótico de soluciones salinas de: a) NaCl, NaHCO₃ y Na₂SO₄ y b) CaCl₂·2H₂O, MgCl₂·6H₂O y MgSO₄·7H₂O, en el peso seco total de brotes de tubérculos de papa.

osmótico producido por cada sal y grado de salinidad, cuyo análisis indica que las sales que más disminuyeron el potencial osmótico y que produjeron una mayor reducción en dicho peso seco total a una concentración de 9.6 g L⁻¹, respecto del testigo, fueron NaCl con 46.96% a un potencial osmótico de -0.68 MPa y NaHCO₃ con 54.22% a un potencial osmótico de -0.43 MPa, en tanto que las sales que disminuyeron de manera intermedia el potencial osmótico de la solución y que menos redujeron el porcentaje de peso seco total promedio de brotes a la concentración citada respecto del testigo, fueron Na₂SO₄ con 25.51% a un potencial osmótico de -0.36 MPa y CaCl₂·2H₂O con 19.95% a un potencial osmótico de -0.37 MPa. Las sales que menos redujeron el potencial osmótico, pero que produjeron una reducción drástica del porcentaje de peso seco

total, fueron MgCl₂·6H₂O con 40.84% a un potencial osmótico de -0.28 MPa y MgSO₄·7H₂O con 59.09% a un potencial osmótico de -0.19 MPa, es decir, el peso seco total de brotes fue más afectado por sales de efecto tóxico, que por sales de efecto osmótico.

Cuadro 4. Modelos para la determinación del peso seco total de brotes en función de la conductividad eléctrica de las diferentes soluciones salinas.

Sales	Ecuación	R	R ²	CV
				%
NaCl	PST (g) = 1.78+(-0.10)CE	-0.91	0.83	28.97
NaHCO ₃	PST(g) = 1.56+(-0.10)CE	-0.84	0.71	25.90
Na ₂ SO ₄	PST (g) = 1.90+(-0.05)CE	-0.70	0.50	16.65
CaCl ₂ ·2H ₂ O	PST (g) = 1.63+(-0.01)CE	-0.29	0.08	13.54
MgCl ₂ ·6H ₂ O	PST (g) = 1.60+(-0.06)CE	-0.69	0.47	22.38
MgSO ₄ ·7H ₂ O	PST (g) = 1.64+(-0.10)CE	-0.92	0.85	31.22

CONCLUSIONES

- Existe diferencia entre los valores de conductividad eléctrica (dS m^{-1}) para concentraciones equivalentes de las sales utilizadas de acuerdo con el siguiente orden: $\text{NaCl} > \text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} > \text{Na}_2\text{SO}_4 > \text{NaHCO}_3 > \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} > \text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$. En todos los casos, se presenta una tendencia a incrementar los valores de conductividad eléctrica conforme aumenta la concentración salina.
- El potencial osmótico de las soluciones disminuyó conforme se incrementó la concentración salina, presentando el siguiente orden: $\text{NaCl} > \text{NaHCO}_3 > \text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} > \text{Na}_2\text{SO}_4 > \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} > \text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$.
- Los brotes manifestaron diferencias de tolerancia a sales en sus órganos; en todos los casos la raíz acumuló más biomasa que la parte aérea. Las sales Na_2SO_4 , $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ y NaCl favorecieron una mayor acumulación de biomasa en raíz y parte aérea, en tanto que NaHCO_3 , $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ y $\text{MgCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ fueron las que más inhibieron la acumulación de biomasa en ambas secciones, lo que indica que los brotes son más afectados por sales de efecto tóxico que por sales de efecto osmótico.
- En cuanto a la acumulación de biomasa de raíces y parte aérea, los brotes se consideran sensibles a las sales NaHCO_3 y $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, ya que su máxima acumulación se dio a una concentración de 1.13 g L^{-1} , moderadamente sensibles a NaCl y $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, debido a que la máxima acumulación de biomasa se registró a 2.48 g L^{-1} , moderadamente tolerantes a Na_2SO_4 ya que su máxima acumulación de biomasa se presentó a 3.84 g L^{-1} y tolerantes a $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ en virtud de que la máxima acumulación de biomasa se generó a 6.40 g L^{-1} .

LITERATURA CITADA

- Ayers, A.D. y H.E. Hayward. 1948. A method for measuring the effects of soil salinity on seed germination with observations on several crop plants. *Proc. Soil. Sci. Soc. Am.* 13: 224-226.
- Bernstein, L. 1964. Salt tolerance of plants. *Information Bull.* 283. US Department of Agriculture. Washington, DC
- Davies, H.V. y P. Millard. 1985. Fractionation and distribution of calcium in sprouting and non sprouting potato tubers. *Ann. Bot.* 56: 745-754.
- Delauney, J.A. y D.P. Verma. 1993. Proline biosynthesis and osmoregulation in plants. *The Journal Plant* 4: 215-223.
- FAO. Food and Agriculture Organization. 1990. Anuario FAO de la Producción. Rome, Italy.
- Heuer, B. y A. Nadler. 1998. Physiological response of potato plants to soil salinity and water deficit. *Plant Sci.* 137: 43-51.
- Jacoby, B. 1994. Mechanisms involved in salt tolerance by plants. pp. 97-123. *In: Pessarakli, M. (ed). Handbook of plant and crop stress.* University of Arizona. Tucson, AZ.
- Kafkafi, U. y N. Bernstein. 1996. Root growth under salinity stress. pp. 435-451. *In: Waisel, Y., A. Eshel y U. Kafkafi. Plant roots: The hidden half.* Marcel Dekker. New York.
- Keenan, W.Ch., D.C. Kleinfelter y J.H. Wood. 1990. Química general universitaria. Trad. al español por Antonio Eroles Gómez. Editorial CECSA. México.
- Levy, D. 1992. The response of potatoes (*Solanum tuberosum* L.) to salinity: Plant growth and tuber yields in the arid deserts of Israel. *Ann. App. Biol.* 120: 547-555.
- Maas, E.V. y G.J. Hoffman. 1977. Crop salt tolerance-current assessment. *J. Irrigation Drainage Division* 103(IR2): 115-134.
- Martínez, C.A., M. Maestri y E.R. Lani. 1996. *In vitro* salt tolerance and proline accumulation in Andean potato (*Solanum* spp.) differing in frost resistance. *Plant Sci.* 116: 177-184.
- Moorby, J. y F.J. Milthorpe. 1983. Papa. pp. 245-280. *In: Evans, L.T. (ed.). Fisiología de los cultivos.* Trad. al español por H. González Idiarte. Editorial Hemisferio Sur. Buenos Aires, Argentina.
- Ortega E., M. 1993. Causas de la salinidad y efectos en los suelos. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.
- Poljakoff, M.A. y H.R. Lerner. 1994. Plants in saline environments. pp. 65-96. *In: Pessarakli, M. (ed.). Handbook of plant and crop stress.* University of Arizona. Tucson, AZ.
- Rousselle, P. y J.C. Robert. 1996. La pomme de terre. Institut National de la Recherche Agronomique. Paris, France.
- Shannon, M.C. y C.M. Griene. 1999. Tolerance of vegetable crops to salinity. *Scientia Horticulturae* 78: 5-32.
- Strogonov, B.P. 1964. Physiological basis of salt tolerance of plants (as affected by various types of salinity). Translated from Russian. Israel Program for Scientific Translations. Jerusalem, Israel.