

EMERGENCIA DE BROTES DE TUBÉRCULOS DE PAPA EN CONDICIONES SALINAS

Emergence of Potato Tuber Sprouts in Salinity Conditions

E. Sánchez-Bernal^{1‡} y M. Ortega-Escobar²

RESUMEN

La salinidad afecta el crecimiento de plantas de papa, sin embargo, se desconoce la respuesta de los tubérculos a emerger brotes en diversas condiciones salinas de suelos en México. Por ello en macetas experimentales controladas, se evaluó la emergencia de brotes de tubérculos de *Solanum tuberosum* L. cv. Alpha en condiciones salinas inducidas por NaCl, NaHCO₃, Na₂SO₄, CaCl₂·2H₂O, MgCl₂·6H₂O y MgSO₄·7H₂O y por las salinidades sulfático-clorhídrica, clorhídrico-sulfática y sulfático-sódica, con concentraciones de 0 a 9.60 g L⁻¹. Cada tipo de salinidad produjo un efecto osmótico-tóxico que prolongó el periodo de emergencia y disminuyó la tasa de emergencia de brotes de tubérculos respecto del testigo; conforme se incrementó la concentración salina, se inhibió el crecimiento de yemas terminales. La mayor disminución se presentó en NaHCO₃ y salinidad sulfático-sódica, con concentraciones superiores a 2.48 g L⁻¹, donde se observaron tejidos tuberosos y yemas promotoras de la emergencia de brotes dañadas por hidrólisis alcalina. Una disminución intermedia se produjo con Na₂SO₄ > salinidad clorhídrico-sulfática > salinidad sulfático-clorhídrica > NaCl y la menor afectación se registró en tubérculos expuestos a MgSO₄·7H₂O > MgCl₂·6H₂O = CaCl₂·2H₂O, en un intervalo de 5.19 a 9.60 g L⁻¹, esto denota niveles de tolerancia a sales por los tubérculos de papa. Todos los tratamientos, excepto CaCl₂·2H₂O, a concentraciones de 3.84 g L⁻¹ a 9.60 g L⁻¹, produjeron un incremento anormal de brotes raquíuticos y escaso crecimiento. La disminución de la emergencia y posterior pérdida de dominancia apical, resultan de: 1) el efecto osmótico de NaCl, Na₂SO₄, salinidades clorhídrico-sulfática y sulfático-clorhídrica, y 2) el efecto tóxico de

MgCl₂·6H₂O, MgSO₄·7H₂O, NaHCO₃ y salinidad sulfático-sódica. Los tubérculos brotaron de forma normal en CaCl₂·2H₂O, sal de gran demanda por los tubérculos.

Palabras clave: brotes, condiciones salinas, efecto osmótico, efecto tóxico.

SUMMARY

Salinity affects the growth of potato plants. However, it is unknown the response of potato tubers to sprout in different saline soil conditions where potato is cultivated in Mexico. For this reason, in experimental plots, the emergence was studied conditions of tuber sprouts *Solanum tuberosum* L. cv. Alpha in stress. Salinity was induced by salts of NaCl, NaHCO₃, Na₂SO₄, CaCl₂·2H₂O, MgCl₂·6H₂O y MgSO₄·7H₂O and three types of salinity (sulphatic-chlorhidric, chlorhidric-sulphatic and sulphatic-sodic), to concentrations of 0 to 9.60 g L⁻¹. Each type of salinity produced an osmotic and the toxic effect extended the period of emergency and decreased the sprouting of tubers in comparison to the control treatment; as salt concentration increased, it inhibited the emergence of terminal buds. This tendency to diminish the rate of sprout emergence was more evident for NaHCO₃ and sulphatic-sodic salt treatments at high levels for; the effect is due to the destruction of tuber tissues and axilar buds caused by alkaline hydrolysis of sodium in the potato tubers. A mid-term decrease was produced by Na₂SO₄ > chlorhidric-sulphatic > sulphatic- chlorhidric > NaCl, and the minor decrease was recorded in tubers exposed to MgSO₄·7H₂O > MgCl₂·6H₂O = CaCl₂·2H₂O, in a range of 5.19 to 9.60 g L⁻¹, this denotes salt tolerance levels for potato tubers. All treatment, except CaCl₂·2H₂O, at concentrations of 3.84 g L⁻¹ to 9.60 g L⁻¹, produced an abnormal increase in sprouting (stunted outbreaks and low growth). The retard in the emergence of sprouts and loss of apical dominance is due to: 1) the osmotic effect of NaCl, Na₂SO₄, CaCl₂·2H₂O, sulphatic-chlorhidric salinity and chlorhidric-sulphatic salinity, and

¹ Instituto de Ecología, Universidad del Mar. Km 1.5 carretera a Zipolite, 70902 Puerto Ángel, Oaxaca, México.

[‡] Autor responsable (edgarivansb@zicatela.umar.mx)

² Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. 56230 Montecillo, estado de México.

2) the toxic effect of $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, NaHCO_3 and sulphatic-sodic salinity. Tubers sprang as normal in $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, which is required by tubers.

Index words: *sprouts, salinity conditions, osmotic effect, toxic effect.*

INTRODUCCIÓN

La papa es un cultivo importante en la dieta alimenticia de países densamente poblados como China que cultiva 1 000 000 de hectáreas con rendimientos promedio de 13.6 Mg ha⁻¹ y México que cultiva 72 000 hectáreas con un rendimiento medio en condiciones de riego de 30 Mg ha⁻¹ y su rendimiento promedio mundial es de 15 Mg ha⁻¹ (FAO, 2008). Las variedades comerciales están adaptadas a fotoperiodos cortos, por ello y por requerimientos de sanidad, se siembran en zonas áridas o semiáridas, cuyos suelos están afectados en mayor o menor grado por procesos de salinización natural o inducida por el hombre a través del riego con aguas de concentración salina superior a 2 g L⁻¹ (Ayers y Westcot, 1987). La salinidad afecta el crecimiento y desarrollo de las plantas de papa desde sus primeros estadios. Moorby y Milthorpe (1983) señalan que la inhibición de la etapa de emergencia de brotes por estrés salino provoca alteraciones metabólicas y fisiológicas en las etapas vegetativas y de llenado del tubérculo, que inciden en la disminución del rendimiento por unidad de superficie cultivada y en la reducción espacial de la frontera del cultivo. Bernstein (1964) clasificó a la papa como una hortaliza moderadamente sensible a salinidad, ya que a concentraciones de 1.92 a 3.84 g L⁻¹ en soluciones de NaCl, redujo en forma notable su rendimiento. Levy (1992) evaluó la tolerancia de catorce cultivares de papa en soluciones de CaCl_2 y NaCl, con concentraciones de 3.90 a 4.41 g L⁻¹ y reportó un retraso en la emergencia de plántulas, la formación de tubérculos pequeños y que las variedades tempranas toleraron más la salinidad que las tardías. Martínez *et al.* (1996) señalan que cv. Alpha fue sensible a NaCl. Sánchez *et al.* (2003) y Sánchez *et al.* (2008) investigaron la emergencia y acumulación de biomasa de brotes de tubérculos y de plantas de papa cv. Alpha, respectivamente, en diversas condiciones salinas a concentraciones de 0 a 9.60 g L⁻¹, y concluyeron que los brotes y las plantas fueron sensibles a 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 $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (su máxima acumulación de biomasa se registró con 2.48 g L⁻¹), moderadamente tolerantes a Na_2SO_4 , (máxima acumulación de biomasa con 3.84 g L⁻¹) y tolerantes a $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (máxima acumulación de biomasa con 6.40 g L⁻¹). El objetivo del presente trabajo fue evaluar el porcentaje de emergencia de brotes de tubérculos de papa cv. Alpha en condiciones de estrés inducido por un mayor espectro salino que incluye además de las sales y concentraciones indicadas por Sánchez *et al.* (2003), las salinidades sulfático-clorhídrica, clorhídrico-sulfática y sulfático-sódica presentes en las cuencas endorréicas del Valle de Toluca en México, el altiplano de Nuevo León y las estribaciones de la Laguna del Carmen en Tlaxcala, donde se produce papa en México.

MATERIALES Y MÉTODOS

En condiciones experimentales de invernadero se sembraron tubérculos de papa (*Solanum tuberosum* L.) en macetas de plástico, preparadas con 10 kg de agrolita y una cubierta de tezontle de 2 cm de espesor, a una densidad de dos propágulos por maceta, espaciados 15 cm uno de otro; a cada maceta se aplicó un volumen de 2 L de solución salina. Los tratamientos diseñados como experimentos independientes (una sal por tratamiento), utilizaron sales de: 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 tres salinidades cualitativas: sulfático-clorhídrica, clorhídrico-sulfática y sulfático-sódica, más un testigo (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 en la solución de 1.77, 3.88, 6.00, 8.11, 10 y 15 dS m⁻¹ respectivamente y que de acuerdo con Maas y Hoffman (1977) disminuyen el crecimiento o rendimiento en el orden de 0 (C_1), 25 (C_2), 50 (C_3), 75 (C_4), 100 (C_5) y 150% (C_6). Se estableció un modelo bloques al azar con tres réplicas por tratamiento. Las soluciones se prepararon en laboratorio; las de las salinidades sulfático-clorhídrica, clorhídrico-sulfática y sulfático-sódica se obtuvieron mediante las relaciones aniónicas $\text{Cl}^- / \text{SO}_4^{-2} = 1.5$; $\text{Cl}^- / \text{SO}_4^{-2} = 0.6$ y $\text{HCO}_3^- / \text{Cl}^- + \text{SO}_4^{-2} = 2$ respectivamente, establecidas por Arinushkina (citado por Szabolcs, 1989). En las dos primeras salinidades las fuentes de sales fueron NaCl y MgSO_4 y para la salinidad sulfático-sódica las fuentes fueron MgCl_2 , Na_2SO_4 y NaHCO_3 . A las soluciones se les determinó pH con un potenciómetro, conductividad

eléctrica (CE) con un conductímetro y potencial osmótico $\Psi\pi$ (MPa) con un osmómetro. Adicionalmente, y con base en la fórmula de fertilización 40-40-20, se preparó una solución nutritiva Steiner (1984) la cual fue vertida a cada uno de los contenedores de las soluciones salinas que a su vez se suministraron a las macetas sembradas; el riego consistió en la reposición de agua consumida por evapotranspiración cada tercer día, a fin de mantener unidades experimentales a peso constante y a capacidad de campo; en invernadero se registraron temperaturas de 15 a 30 °C. El experimento tuvo una duración de 2 meses (del 18 de febrero al 18 de abril de 2007) periodo suficiente para evaluar la emergencia de brotes. Durante ese lapso los brotes se asperjaron con Ridomil Gold MZ 68 WP, fungicida sistémico, lo que permitió mantener periodos prolongados de protección contra tizón tardío (*Phytophthora infestans*); cada tercer día se hicieron observaciones para registrar el porcentaje de emergencia de brotes (número de días a la emergencia y número de brotes formados). El porcentaje de brotes emergidos se obtuvo considerando un total de cuatro brotes por tubérculo, es decir, ocho brotes por maceta, obteniéndose los promedios respectivos; los datos recabados se agruparon en fechas de brotación a 16, 23, 30 y 50 días, de esta forma la emergencia de brotes total se registró de forma acumulada en apego al método de Ayers y Hayward (1948). De acuerdo a Moorby y Milthorpe (1983) un brote de papa emergido se consideró como el tallo visible inmediatamente arriba del sustrato. Finalmente se calibró un modelo lineal de predicción del porcentaje total de brotes emergidos por tubérculo (PEB) 50 días después de la emergencia, en función de la CE de las soluciones mediante la ecuación: $y = a + bx$. Donde: y = porcentaje de brotes emergidos por tubérculo (%), A = ordenada al origen, b = pendiente de la recta o número de unidades (%) que aumenta o disminuye el PEB 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 $P \leq 0.05$, se efectuaron mediante el programa sistema de análisis estadístico (SAS Institute, 2006).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Porcentaje de Brotes Emergidos

De los datos del Cuadro 1 se desprende para todos los casos incluyendo el testigo, un retraso

en la emergencia de brotes, ya que cerca de 90% de los mismos ocurrió 30 días después de la siembra. La emergencia de brotes en condiciones ambientales adecuadas comprende un periodo de 16 días; en parte tal retraso se atribuye al estado de madurez fisiológica de los tubérculos semilla, pues tubérculos madre con prolongados periodos de almacenamiento tienden a aumentar su lapso de latencia y en consecuencia manifiestan cierto grado de envejecimiento (Moorby y Milthorpe, 1983), sin embargo, el retraso en la emergencia de brotes en lo fundamental es resultado del efecto del tipo de sal y de su concentración, de tal manera que en el rubro de porcentaje de brotes emergidos a los 16 días, se presenta un descenso abrupto de dicho porcentaje en los tubérculos expuestos a NaCl, NaHCO_3 y a las salinidades sulfático-clorhídrica, clorhídrico-sulfática y sulfático-sódica a partir de 2.48 g L^{-1} , en tanto que para los tratamientos Na_2SO_4 y $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, el porcentaje de brotes emergidos fue muy disminuido a 3.84 g L^{-1} ; por su parte los tratamientos $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ y $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ disminuyeron notablemente el porcentaje a una concentración de 5.19 g L^{-1} , lo que denota niveles de tolerancia a sales en los tubérculos semilla.

En general, el retraso en la emergencia de brotes es una respuesta de los tubérculos al efecto osmótico y tóxico que producen las sales al interior de este órgano vegetal, ya que el déficit hídrico y la toxicidad iónica inhiben la síntesis de la nitrato reductasa y las poliaminas, alteran los niveles hormonales (mayor producción de ácido absícico que de giberelinas), y deshidratan o desprenden el protoplasma de la pared celular, todo lo cual incrementa el periodo de quiescencia. Una vez que el tubérculo es capaz de adecuarse al estrés, incentiva sus procesos metabólicos y uso de sustancias de reserva para promover emergencia de brotes, lo que según Strogonov (1964) y Ashraf (1983) está relacionado con una regulación osmótica al interior del tubérculo o con condiciones hídricas del sustrato que favorecen una periodicidad del crecimiento como el riego. El estrés hídrico o tóxico guarda relación con la disminución del potencial osmótico en las soluciones salinas que presentó el siguiente orden: $\text{NaCl} > \text{salinidad sulfático-sódica} > \text{salinidad sulfático-clorhídrica} > \text{NaHCO}_3 > \text{salinidad clorhídrico-sulfática} > \text{Na}_2\text{SO}_4 > \text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} > \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} > \text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$; la secuencia es determinada por las características químicas de cada soluto tales como: su peso molecular, grado de ionización y coeficiente osmótico (Hasegawa *et al.*, 2000);

Cuadro 1. Efecto de la conductividad eléctrica (CE), pH y potencial osmótico ($\Psi\pi$) de soluciones salinas experimentales sobre el porcentaje de brotación de tubérculos de papa a diferentes días después de la siembra.

Sal	C	CE	pH	$\Psi\pi$	Días después de la siembra				Sal	C	CE	pH	$\Psi\pi$	Días después de la siembra				
					16	23	30	50						16	23	30	50	
	g L ⁻¹	dS m ⁻¹		MPa	%					g L ⁻¹	dS m ⁻¹		MPa	%				
Testigo	0.00	0.00	7.3	0.00	50.55	83.88	97.21	97.21 a [†]										
NaCl	1.13	2.07	6.3	-0.15	20.00	96.66	99.99	99.99 a	MgSO ₄ 7H ₂ O	1.13	0.90	7.1	-9.00	43.33	76.66	99.99	99.99 a	
	2.48	4.47	6.2	-0.22	3.33	46.66	93.32	93.32 ba		2.48	1.64	7.0	-0.11	46.66	79.99	96.65	96.65 ba	
	3.84	6.93	6.1	-0.26	3.33	66.66	96.66	96.66 ba		3.84	2.29	7.0	-0.13	26.66	73.32	96.65	96.65 ba	
	5.19	8.81	6.2	-0.35	0.00	50.00	83.33	83.33 ba		5.19	2.70	7.0	-0.16	16.66	69.99	86.56	86.56 ba	
	6.40	10.86	6.2	-0.50	0.00	20.00	96.66	96.66 ba		6.40	3.29	7.0	-0.17	10.00	66.66	89.99	89.99 ba	
	9.60	15.27	6.3	-0.67	0.00	10.00	63.32	63.32 b*		9.60	4.64	7.0	-0.22	0.00	43.33	59.99	59.99 b*	
NaHCO ₃	1.13	1.14	8.2	-0.14	13.33	39.99	79.99	86.65 a	Sulfático- clorhídrica	1.13	1.85	5.2	-0.13	16.66	69.66	89.66	89.66 a	
	2.48	1.50	8.3	-0.19	0.00	0.00	36.66	43.32 b*		2.48	4.05	5.5	-0.17	0.00	50.00	96.66	96.66 ba	
	3.84	3.25	8.4	-0.21	0.00	0.00	10.00	30.00 b*		3.84	5.82	5.6	-0.22	3.33	6.66	89.99	89.99 ba	
	5.19	4.27	8.6	-0.25	0.00	0.00	0.00	26.66 b*		5.19	7.64	5.6	-0.27	10.00	30.00	93.33	93.33 ba	
	6.40	5.08	8.6	-0.30	0.00	0.00	0.00	6.66 b*		6.40	8.99	5.9	-0.33	13.33	56.66	96.66	96.66 ba	
	9.60	6.93	8.5	-0.38	0.00	0.00	0.00	6.66 b*		9.60	12.92	5.9	-0.50	0.00	3.33	69.99	73.32 b*	
Na ₂ SO ₄	1.13	1.68	6.2	-0.12	53.33	76.66	86.66	86.66 a	Clorhídrico- sulfática	1.13	1.62	6.9	-0.14	26.66	76.66	89.99	89.99 a	
	2.48	3.00	6.2	-0.15	33.33	93.33	99.99	99.99 ba		2.48	3.52	6.7	-0.15	6.66	63.32	86.65	86.65 ba	
	3.84	4.39	6.2	-0.17	26.66	46.66	79.99	79.99 ba		3.84	5.11	6.9	-0.18	6.66	39.99	99.99	99.99 ba	
	5.19	4.97	6.3	-0.22	0.00	26.66	79.99	79.99 ba		5.19	6.81	6.9	-0.22	3.33	43.33	83.33	83.33 ba	
	6.40	6.17	6.2	-0.24	0.00	13.33	63.33	63.33 b*		6.40	7.88	6.7	-0.27	3.33	26.66	83.32	83.32 ba	
	9.60	7.93	6.2	-0.36	0.00	0.00	59.99	59.99 b*		9.60	11.16	6.5	-0.37	0.00	13.33	59.99	69.99 b*	
CaCl ₂ 2H ₂ O	1.13	1.59	6.5	-0.11	50.00	86.66	99.99	99.99 a	Sulfático- sódica	1.13	2.33	7.9	-0.14	3.33	56.66	99.99	99.99 a	
	2.48	3.00	6.5	-0.16	26.66	76.66	93.32	93.32 ba		2.48	2.94	8.0	-0.18	16.66	76.66	99.99	99.99 ba	
	3.84	4.17	6.5	-0.20	30.00	56.66	86.66	96.66 ba		3.84	5.29	8.0	-0.21	0.00	3.33	36.66	36.66 b*	
	5.19	5.05	6.5	-0.24	36.66	79.99	96.65	96.65 ba		5.19	6.23	8.0	-0.26	3.33	9.99	46.65	46.65 b*	
	6.40	6.46	6.5	-0.26	3.33	73.33	99.99	99.99 ba		6.40	7.40	8.1	-0.29	0.00	0.00	43.33	43.33 b*	
	9.60	8.22	6.5	-0.34	26.66	56.66	96.66	96.66 ba		9.60	9.75	8.1	-0.56	0.00	0.00	10.00	10.00 b*	
MgCl ₂ 6H ₂ O	1.13	1.00	6.9	-0.12	36.66	83.32	99.98	99.98 a										
	2.48	2.23	6.8	-0.15	33.33	96.66	99.99	99.99 ba										
	3.84	3.40	7.8	-0.20	33.33	86.66	99.99	99.99 ba										
	5.19	4.35	7.2	-0.23	26.66	93.32	99.98	99.98 ba										
	6.40	5.29	7.1	-0.25	10.00	70.00	96.66	99.99 ba										
	9.60	7.40	7.0	-0.31	0.00	33.33	83.33	96.66 ba										

Prueba de medias entre tipo de sal para la variable emergencia de brotes a 50 días de la siembra ($P > F = 0.0001$); [†] Prueba de medias entre concentraciones para la variable emergencia de brotes a 50 días de la siembra ($P > F = 0.002$). * Significancia. Medias con la misma letra no son significativamente diferentes, Tukey, 0.05.

lo que permite establecer criterios definidos sobre el efecto de las sales en el crecimiento y desarrollo de las plantas, el cual puede ser predominantemente osmótico o tóxico (Leidi y Pardo, 2002), de tal manera que el efecto de las sales en la emergencia de brotes de tubérculos de papa, puede ser de carácter osmótico como

el producido por la sal NaCl o tóxico generado por la sal MgSO₄·7H₂O (Sánchez *et al.*, 2003).

Si se considera el porcentaje total de brotes emergidos 50 días después de la siembra, la sal NaHCO₃ y la salinidad sulfático-sódica registraron el menor porcentaje de emergencia de brotes, tal disminución

se registró para NaHCO_3 a 2.48 g L^{-1} y para salinidad sulfático sódica a 3.84 g L^{-1} , a mayores concentraciones la emergencia de brotes disminuyó en forma notoria, lo que indica que los tubérculos de papa son muy sensibles para emerger brotes en condiciones sódico alcalinas; al respecto Moorby y Milthorpe (1983) señalan que en condiciones de pH superiores a 7.5 los tubérculos de papa inhiben la emergencia de brotes, situación contraria a lo que sucede en un intervalo de pH de 6 a 6.5, que la favorecen, comportamiento que coincide con los datos de pH y porcentajes de emergencia registrados en los tratamientos de sales y salinidades no sódicas (Cuadro 1).

Un efecto diferente produjeron las sales magnésicas ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ y $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) que por su alta solubilidad (353 g L^{-1} y 275 g L^{-1}) y toxicidad, inhibieron el crecimiento de la yema terminal del tubérculo con la consiguiente pérdida de dominancia apical, que favoreció la formación de múltiples brotes compitiendo entre sí por alimento, luz y agua, caso indeseable y de efectos negativos para la producción de papa. En este caso se registraron hasta siete brotes por tubérculo, de los cuales al menos cuatro presentaban raquitismo, clorosis en su ápice y escaso desarrollo longitudinal (0.5 cm aproximadamente), el resto de los brotes alcanzó una longitud de 2 a 2.5 cm . La pérdida de dominancia apical por estrés hídrico ha sido explicada a detalle por Moorby y Milthorpe (1983). En el tratamiento $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, sal de tipo neutro, cuyo efecto osmótico y tóxico es mínimo, se presentó una emergencia de brotes cercana a la normalidad (cuatro brotes por tubérculo semilla) en todas las concentraciones, con la característica de que estos eran más sanos y vigorosos que los del resto de los tratamientos (4 cm de longitud). En 2003 Sánchez *et al.* obtuvieron resultados similares. Por su parte, el efecto osmótico producido por las sales NaCl y Na_2SO_4 , así como por las salinidades sulfático-clorhídrica y clorhídrico-sulfática, es la causa del retardo en la emergencia de brotes 16 días después de la siembra; el estrés hídrico además de alargar el periodo de latencia, provocó la pérdida de dominancia apical de la yema terminal, emergiendo hasta cinco brotes por tubérculo semilla, de los que tres al menos presentaron clorosis, raquitismo e inhibición del crecimiento (1 a 1.5 cm de longitud), lo que explica el aumento de porcentaje de emergencia a los 30 días de la siembra; el resto de los brotes denotaron buenas características de vigor (3 cm de longitud). Para este último periodo, las concentraciones salinas de 1.13 a 9.6 g L^{-1} indujeron en los tubérculos de papa altos porcentajes de emergencia de brotes

en los tratamientos $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ y NaCl . Las concentraciones de 1.13 a 6.40 g L^{-1} promovieron altos porcentajes de emergencia de brotes en los tratamientos Na_2SO_4 , salinidad sulfático-clorhídrica y salinidad clorhídrico-sulfática, ello indica que a pesar del retardo en la emergencia y de la pérdida de dominancia apical provocada por la mayoría de estas sales, los tubérculos de papa tienen gran plasticidad para emerger brotes en estas condiciones salinas, lo que está vinculado al efecto nutritivo inicial producido por la concentración de dichas soluciones, ya que de acuerdo a lo señalado por Moorby y Millthorpe (1983) y Sánchez *et al.* (2008), esta tasa aumenta con el tiempo, entre otros factores con incrementos en la concentración de la solución nutritiva.

Modelos de Predicción de Brotación

Los modelos de calibración del porcentaje total de brotes emergidos en función de la CE de cada solución salina (Cuadro 2) predicen que al aumentar la CE disminuye el porcentaje total de brotes en el siguiente orden: $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} < \text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} < \text{salinidad sulfático-clorhídrica} < \text{NaCl} < \text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} < \text{salinidad clorhídrico-sulfática} < \text{Na}_2\text{SO}_4 < \text{salinidad sulfático-sódica} < \text{NaHCO}_3$.

Efecto del Potencial Osmótico de las Soluciones Salinas

Las sales y salinidades disminuyeron el potencial osmótico de las soluciones conforme aumentó

Cuadro 2. Modelos $y = a + bx$ para la determinación del porcentaje total de brotes emergidos, en función de la conductividad eléctrica (CE) de las soluciones salinas.

Salas y salinidades	a	b	r	R ²	CV
NaCl	106.80	-3.75	-0.82	0.67	15.49
NaHCO ₃	74.11	-8.54	-0.86	0.75	89.22
Na ₂ SO ₄	98.64	-4.25	-0.86	0.74	18.98
CaCl ₂ ·2H ₂ O	97.11	0.02	0.02	0.00	2.58
MgCl ₂ ·6H ₂ O	101.13	-0.35	-0.78	0.61	1.36
MgSO ₄ ·7H ₂ O	109.71	-4.48	-0.91	0.84	16.66
Sulfático-clorhídrica	98.56	-1.80	-0.62	0.39	9.66
Clorhídrico-sulfática	97.27	-2.45	-0.75	0.57	11.47
Sulfático-sódica	107.44	-10.75	-0.89	0.79	64.79

CV = coeficiente de variación.

su concentración en el orden NaCl (0 a -0.67 MPa) > salinidad sulfático-sódica (0 a -0.56 MPa) > salinidad sulfático-clorhídrica (0 a -0.50 MPa), > NaHCO₃ (0 a -0.38 MPa) > salinidad clorhídrico-sulfática (0 a -0.37 MPa), > Na₂SO₄ (0 a -0.36 MPa), > CaCl₂·2H₂O (0 a -0.34 MPa) > MgCl₂·6H₂O (0 a -0.31 MPa) > MgSO₄·7H₂O (0 a -0.22 MPa), de tal forma que las sales y salinidades que más redujeron el porcentaje de brotes emergidos en el intervalo de 0 a 9.6 g L⁻¹, respecto del testigo, fueron: NaHCO₃ y salinidad sulfático-sódica, con promedios de emergencia de 33.3 y 56.1%

respectivamente, porcentajes que fueron significativamente diferentes respecto del resto de los tratamientos que presentaron mayores porcentajes de brotes emergidos, en el siguiente orden: Na₂SO₄ con 78.3%, salinidad clorhídrico-sulfática con 85.5%, MgSO₄·7H₂O con 88.3%, NaCl con 88.9%, salinidad sulfático-clorhídrica con 89.9%, CaCl₂·2H₂O con 97.2% y MgCl₂·6H₂O con 99.4%, en los que no hubo diferencias significativas (Figura 1).

Este comportamiento denota el efecto osmótico-tóxico de las sales sódico-alcálinas en los tubérculos

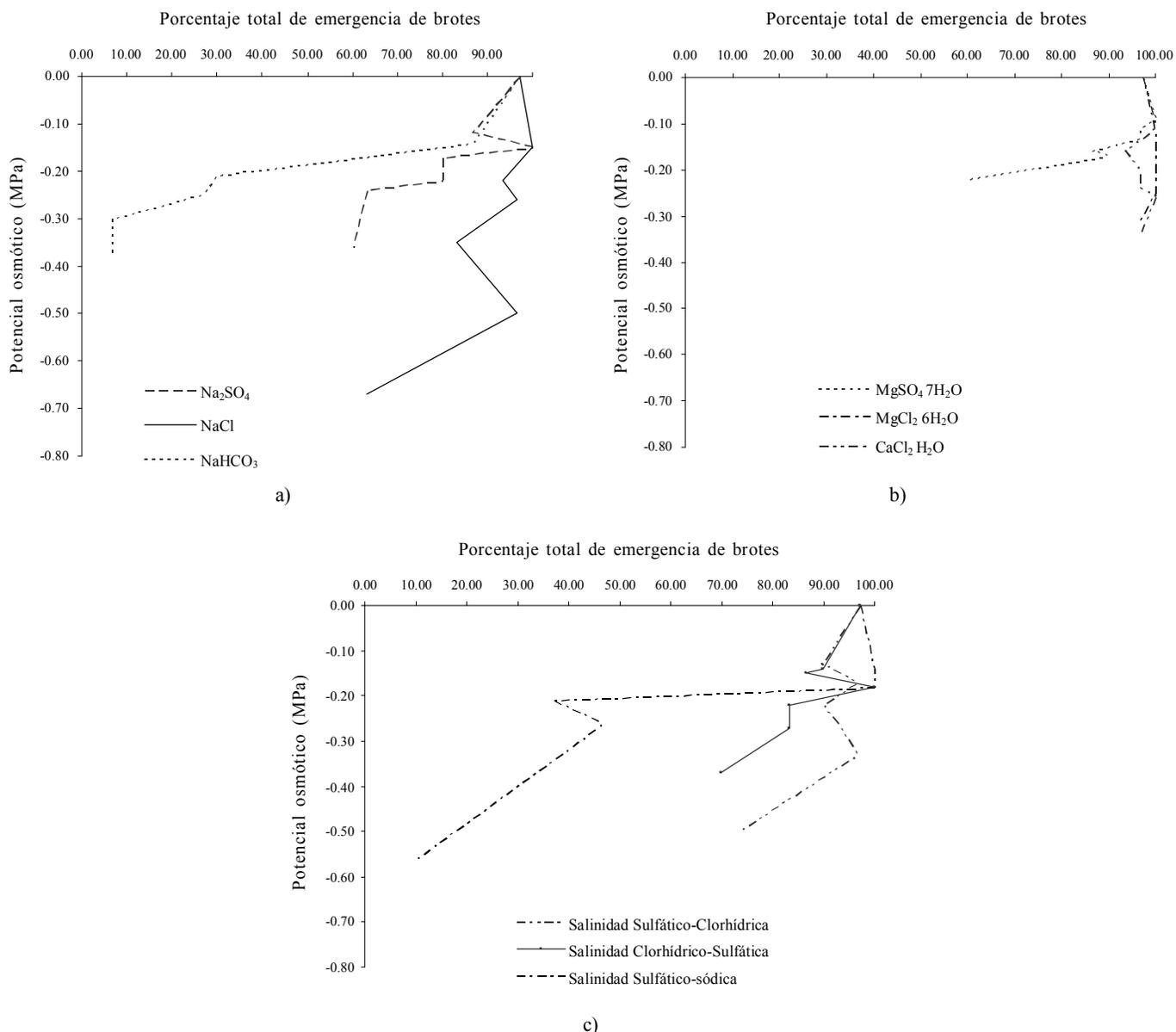


Figura 1. Efecto del potencial osmótico de soluciones salinas de: a) NaCl, NaHCO₃, Na₂SO₄; b) CaCl₂·2H₂O, MgCl₂·6H₂O, MgSO₄·7H₂O; c) salinidad sulfático-clorhídrica, salinidad clorhídrico-sulfática y salinidad sulfático-sódica, en el porcentaje de emergencia de brotes de tubérculos de papa.

madre, cuyos procesos de hidrólisis inhiben la emergencia de brotes, e inducen la destrucción de tejidos vegetales (Strogonov, 1964; Velázquez, 2002). En forma análoga, se presenta el efecto osmótico de NaCl, salinidad sulfático-clorhídrica, Na_2SO_4 y salinidad clorhídrico-sulfática, que genera la pérdida de dominancia apical y por ende una brotación copiosa anormal, y finalmente el efecto tóxico de las sales $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ y $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ que inducen una pérdida de dominancia apical más aguda. Las variaciones en potencial osmótico de las sales y salinidades experimentadas, han sido debidamente señaladas por Ortega *et al.* (1989), su efecto en el crecimiento de algunas plantas cultivadas como el tomate de la misma familia que la papa fue analizado a detalle por Strogonov (1964). El comportamiento osmótico de $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ no provocó ni disminución, ni aumento en exceso de la emergencia de brotes, ya que se trata de una sal neutra que generó una brotación de tipo normal, lo que según Davies y Millard (1985) se atribuye al crecimiento celular que promueve el ion calcio absorbido por los tubérculos madre.

CONCLUSIONES

- En la fase de emergencia, los brotes de tubérculos de papa cv. Alpha, son sensibles a NaHCO_3 y a la salinidad sulfático-sódica, ya que su máximo porcentaje de emergencia se registró de 2.48 g L⁻¹ a 3.84 g L⁻¹ de concentración; a concentraciones superiores se produjo una disminución notoria del número de brotes emergidos. Son también moderadamente sensibles a NaCl, Na_2SO_4 , $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, salinidad sulfático-clorhídrica y salinidad clorhídrico-sulfática, su máximo porcentaje de emergencia de brotes se registró de 5.19 a 6.40 g L⁻¹ de concentración, esta emergencia de brotes se caracterizó por la pérdida de dominancia apical de los tubérculos. Finalmente se consideran tolerantes a $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, ya que su máximo porcentaje de emergencia de brotes se registró a 9.60 g L⁻¹ de concentración, con brotes normales.

- Se distinguen tres tipos de efectos salinos en la emergencia de brotes: a) hidrólisis alcalina y toxicidad inducida por las sales sódicas en las yemas promotoras de la brotación de tubérculos, que implica destrucción de meristemas y restricción de crecimiento de brotes; b) pérdida de dominancia apical por toxicidad de las sales $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ y $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, con formación de múltiples brotes, efecto indeseable y negativo en la producción

de papa y c) pérdida de dominancia apical menos pronunciada que la anterior, provocada por el estrés osmótico de las sales NaCl y Na_2SO_4 , así como por las salinidades sulfático-clorhídrica y clorhídrico-sulfática; en estos tratamientos los brotes exhibieron menos daño y más vigor que los de los casos anteriores. Los brotes en $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ presentaron características normales.

- La pérdida de dominancia apical de la yema terminal de los tubérculos madre, es resultado de la variación del estrés salino provocada por el riego, lo que induce periodicidad del crecimiento, caso indispensable y de efectos negativos para el cultivo de papa.

LITERATURA CITADA

- Ashraf, M. 1983. Breeding for salinity tolerance in plants. *Crit. Rev. Plant Sci.* 13: 17-42.
- Ayers, A. D. and 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. USDA. Agric. Inf. Bull. no. 283. Washington, DC, USA.
- Davies, H. V. and P. Millard. 1985. Fractionation and distribution of calcium in sprouting and non sprouting potato tubers. *Ann. Bot.* 56: 745-754.
- FAO (Food and Agriculture Organization of The United Nations). 2008. Nueva luz sobre un tesoro enterrado. Año Internacional de la papa. FAO-UNESCO. New York, NY, USA.
- Hasegawa, P. M., R. A. Bressan, J. K. Zhu, and H. J. Bohnert. 2000. Plant cellular and molecular response high salinity. *Ann. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 51: 463-499.
- Leidi, O. E. y J. M. Pardo. 2002. Tolerancia de los cultivos al estrés salino: ¿Qué hay de nuevo? *Rev. Inv. Fac. Ciencias Agrarias* 2: 1-15.
- 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. and G. J. Hoffman. 1977. Crop salt tolerance-current assessment. *J. Irrig. Drain. Div. Am. Soc. Civ. Eng.* 103: 115-134.
- Martínez, C. A., M. Maestri, and E. G. 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. 245-248. *In: L. T. Evans* (ed.). Fisiología de cultivos. Hemisferio Sur. Buenos Aires, Argentina.
- Ortega, E. M., M. O. Ramírez, J. L. Ontiveros, A. C. Ramírez y J. Rone. 1989. Determinación de la capacidad germinativa de algunos cultivos agrícolas en soluciones salinas de diferente concentración total y composición cualitativa. *Agrociencia* 78: 249-264.
- Sánchez-Bernal, E., M. Ortega-Escobar, V. González-Hernández, G. Ruelas-Angeles, J. Kohashi-Shibata y N. García-Calderón. 2003. Tolerancia de tubérculos de papa cv. Alpha en etapa de brotación a condiciones de salinidad. *Terra* 21: 481-491.

- Sánchez-Bernal, E., M. Ortega-Escobar, V. González-Hernández, M. Camacho-Escobar y J. Kohashi-Shibata. 2008. Crecimiento de plantas de papa (*Solanum tuberosum* L.) cv. Alpha, inducido por diversas soluciones salinas. *Interciencia* 33: 643-650.
- SAS Institute. 2006. User's guide. Release 0.13. SAS Institute. Cary, NC, USA.
- Steiner, A. A. 1984. The universal nutrient solution. International Society for Soiless Culture. Proc. 6th Intern. Congress on Soiless Culture 634-649.
- Strogonov, B. P. 1964. Physiological basis of salt tolerance of plants (as affected by various types of salinity). Israel Program for Scientific Translations. Jerusalem, Israel.
- Szabolcs, I. 1989. Salt affected soils. CRC Press. Boca Raton, FL, USA.
- Velázquez-Machuca, M. A., M. Ortega-Escobar, A. Martínez-Garza, J. Kohashi-Shibata y N. García-Calderón. 2002. Relación funcional PSI-RAS en las aguas residuales y suelos del Valle de Mezquital, Hidalgo, México. *Terra* 20: 459-464.