

Germinación y vigor en maíz a diferentes potenciales osmóticos

Seed vigor and germination at different osmotic potentials



Adriana Campos-Flores¹, Norma Angélica Ruiz-Torres^{*2},
Froylán Rincón-Sánchez³, Celestino Flores-López²

¹Maestría en Tecnología de Granos y Semillas, ²Centro de Capacitación de Tecnología de Granos y Semillas,

³Departamento de Fitomejoramiento. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Calzada Antonio Narro 1923, Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. C.P. 25315. Tel. (844)4110377 y 78. Email: n_nruiz@hotmail.com (*Autor responsable).

RESUMEN

Los objetivos del trabajo fueron evaluar la capacidad germinativa en semilla y el vigor en plántulas de maíz, sometidas a diferentes niveles de salinidad, en condiciones de laboratorio e invernadero. Se utilizó semilla de una variedad experimental de maíz amarillo con características de tolerancia al déficit hídrico, desarrollada y adaptada a la región sureste del estado de Coahuila, México. Se establecieron dos ensayos: I. Germinación en laboratorio con 10 potenciales osmóticos (-0.125 MPa a -1.250 MPa) y un testigo con agua destilada, en el que se determinó: porcentajes de vigor, germinación, plántulas normales, plántulas anormales, semillas sin germinar, tasa de crecimiento y la acumulación de materia seca de plúmula y radícula; II. Índice de velocidad de emergencia (IVE) en invernadero. Se sembró en suelo, regado con soluciones salinas ajustadas a siete potenciales osmóticos (-0.25 a -1.50 MPa). Las variables determinadas fueron: índice de velocidad de emergencia, emergencia total y materia seca. Los resultados de ambos ensayos indican diferencias significativas entre tratamientos ($p \leq 0.01$). Se obtuvieron plántulas vigorosas a potenciales osmóticos por encima de -1 MPa, mientras que a partir de éste el vigor se perdió, lo que se reflejó en la reducción del índice de velocidad de emergencia, el porcentaje de germinación, la emergencia total y una menor tasa de acumulación de materia seca. La variedad experimental toleró el estrés salino hídrico durante la germinación y emergencia, hasta un potencial osmótico en la solución de -0.75 MPa.

Palabras clave: capacidad germinativa, emergencia, estrés salino

ABSTRACT

The objectives of this research work were to evaluate the corn seed germination capacity and the seedling vigor, subjected to different salinity levels, under laboratory and greenhouse conditions. Seed from an experimental yellow variety was used, with water stress tolerance characteristics, developed and adapted to the Coahuila State Southeast region, in Mexico. Sodium chloride was used in osmotic solutions expressed in MPa. Two different trials were set: I. Ten osmotic potentials were laboratory tested (from -0.125 to -1.250 MPa) and distilled water as a check. Seed vigor, germination, abnormal seedlings, ungerminated seeds (percentage), growth rate, and plumule and root dry matter accumulation, were evaluated; II. Seed emergence index evaluated under greenhouse conditions. Seeds were planted in a heavy soil and watered with saline solutions, adjusted to ten osmotic potentials (-0.25 to -1.50 MPa). Seed emergence index (SEI), total emergence and seedling dry matter, were determined. Results from both trials showed significant differences ($p \leq 0.01$) among treatments. Vigorous seedlings were obtained above -1.0 MPa, however the seed vigor was reduced below this osmotic potential, showing a decrease in the SEI, germination percentage, total emergence and dry matter accumulation.

Key words: germinative capacity, emergence, salt stress



INTRODUCCIÓN

El porcentaje de germinación es considerado como un parámetro de gran importancia, para evaluar la calidad en el ámbito de la industria de las semillas. El ensayo de germinación es una medida de la viabilidad que predice la emergencia en campo, en condiciones de suelo casi ideales. Sin embargo, tales condiciones rara vez existen, por lo que este ensayo podría sobreestimar la emergencia en campo. Para el comportamiento de la germinación bajo condiciones desfavorables, se realizan ensayos de vigor de plántula, simulando las condiciones a las que se enfrentará en campo.

La International Seed Testing Association (ISTA, Asociación Internacional de Pruebas de Semillas) (1976) define el concepto de vigor, como la capacidad de la semilla para producir, en forma rápida y uniforme, plántulas normales en condiciones específicas. El vigor puede ser determinado mediante pruebas directas o indirectas: las primeras simulan las condiciones que viven las semillas en el campo, y tienen la ventaja de que se evalúan todos los factores que afectan el vigor; las indirectas miden los atributos fisiológicos en laboratorio, que se relacionan con los que se manifiestan en el campo (Copeland, 1976). Con el objeto de evaluar el vigor de la semilla se han propuesto las siguientes pruebas, que por razones de operatividad, eficacia y economía, presentan las siguientes características: baratas, sencillas, cuantificables, reproducibles y que estén correlacionadas con la emergencia en el campo (McDonald, 1980).

Un estimador de vigor de las plántulas es el índice de velocidad de emergencia propuesto por Maguire (1962), en el que se cuenta el número de días en que emergieron, para establecer un índice de emergencia en condiciones específicas. Las semillas en el campo están a menudo sujetas a estrés hídrico, lo cual reduce su emergencia. Un método para determinar su resistencia a la sequía y su índice de germinación bajo potenciales osmóticos diferenciales, es el uso de soluciones osmóticas en base a NaCl (García y Lasa, 1991).

La alta concentración salina en la solución del suelo incrementa las fuerzas potenciales que retienen el agua y hacen más difícil la absorción (Mata-Fernández *et al.*, 2014). La disminución de la movilidad del agua en los suelos salinizados reduce la germinación, lo que da como resultado la emergencia no uniforme de las plántulas (González, 2001).

El efecto de las sales comienza a manifestarse desde la germinación de las semillas, la cual se refleja en la retención, emergencia no uniforme y desolación que se observa en los suelos salinizados, debido principalmente a la poca disponibilidad de agua para la imbibición, la cual es la primera etapa del proceso de germinación. Estudios realizados por diversos autores (Argentel *et al.*, 2010; Argentel y González, 2006; Franca *et al.*, 2007 y Nicasio *et al.*, 2011) evidencian la existencia de variabilidad intraespecífica en varias especies y variedades, respecto de la tolerancia que presentan los genotipos a las condiciones de salinidad durante el proceso de imbibición.

La segunda etapa del proceso de germinación corresponde al rompimiento de las estructuras, en la cual tienen lugar los procesos físico-químicos, los que pueden verse afectados e, incluso, inhibidos a altas concentraciones de sales, aun cuando se haya iniciado el proceso de germinación con la imbibición (González, 2001). Algunos autores (Camejo y Torres, 2000) refieren que, bajo condiciones de salinidad, existe cambio en la dinámica de germinación, ya que se incrementa el tiempo para que se dé la máxima velocidad de germinación de diferentes cultivos, y se extiende más conforme se incrementa la concentración de sal. El porcentaje de germinación final se verá afectado debido a tal situación. Por otro lado, Kaya (2008) menciona que el estrés por salinidad (NaCl) no afecta la frecuencia de germinación en semillas de genotipos de garbanzo, aunque la interacción del tamaño de la semilla y la concentración de sal da como resultado un menor crecimiento de las plántulas dentro de un mismo genotipo.

Respecto a la germinación de semillas de maíz, Laynes *et al.*, 2008 y Akram *et al.*, 2010, dieron a conocer la existencia de diferencias en la respuesta a salinidad entre genotipos. Determinados genotipos presentan mayor susceptibilidad bajo esta condición de estrés, ya que se obtiene menor porcentaje de germinación conforme se incrementa la concentración de sal. Al respecto, Laynes *et al.* (2008) comentan que el empleo de NaCl para simular diferentes potenciales osmóticos, permite discriminar entre genotipos en relación con la germinación. Sin embargo, un alto porcentaje de germinación bajo condiciones de estrés no es un parámetro que pueda asegurar que el genotipo en cuestión presente la misma tolerancia en etapas posteriores del crecimiento.

Después del proceso de la germinación comienza el desarrollo de las plántulas. En esta fase, las plántulas se ven mucho más afectadas bajo condiciones

de estrés salino, aun a menores concentraciones de sal en el sustrato. González *et al.* (2001) mencionan que el retraso en la división y diferenciación celular causado por las altas concentraciones de sal en el sustrato en el que las plántulas se desarrollan, limita su crecimiento, y aseveran que el crecimiento de las plántulas no se ve afectado directamente por procesos relacionados con la hidrólisis de las sustancias de reservas de la semillas, sino más bien debido a la acumulación de hidrolizados, lo cual sugiere que esta reducción del crecimiento está relacionada con la disminución de los procesos de síntesis. Por su parte, Leidi y Pardo (2002) consideran que al hacer frente al estrés por salinidad, las plantas activan mecanismos de adaptación, los cuales se reflejan fenotípicamente con un menor crecimiento, la modificación de la relación parte aérea/raíz y la limitación de la expansión foliar.

Läuchli y Grattan (2007) mencionan que la mayoría de las plantas de cultivo son tolerantes a la sal en la germinación, pero sensibles a ésta durante la emergencia y el desarrollo vegetativo. Además, señalan que la fase de desarrollo reproductivo es menos sensible al estrés salino que el crecimiento vegetativo, aunque en especies como en el trigo, el estrés salino puede acelerar el crecimiento reproductivo, inhibir el desarrollo de la espiga y disminuir el potencial de rendimiento. En contraste, el arroz es más sensible, pues su bajo rendimiento se asocia, principalmente, con la reducción de los macollos y por las espiguillas estériles en algunos cultivares.

MATERIALES Y MÉTODOS

En este trabajo se utilizó semilla de una variedad experimental de maíz amarillo, con características de tolerancia al déficit hídrico, desarrollada y adaptada a la región sureste del estado de Coahuila, México.

Estudio I

Efectos de la salinidad en la germinación y vigor de la semilla

Los ensayos de germinación estándar y de vigor bajo condiciones de salinidad se llevaron a cabo en el Laboratorio de Fisiología de Semillas del Centro de Capacitación y Desarrollo en Tecnología de Semillas (CCDTs), en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. El ensayo se estableció en un diseño completamente al azar. Los tratamientos consistieron en siete potenciales osmóticos con NaCl: -0.25, -0.50,

-0.75, -1.0, -1.25, -1.50 y un testigo en el que se utilizó agua destilada. La unidad experimental constó de un taco con 25 semillas.

Los potenciales osmóticos se calcularon según la fórmula de J. H. Van't Hoff (Salisbury y Ross, 1978): $Yos = -C i R T$; dónde: Yos = potencial osmótico; C = concentración de la solución, expresada como molaridad (moles de soluto por Kg de H₂O); i = constante que indica la ionización del soluto, para el NaCl (i = 1); R = constante de los gases (0.0831 Kg, bar mol⁻¹, K⁻¹); T = temperatura absoluta (°K).

La germinación se determinó mediante la prueba estándar (ISTA, 2009), con algunas modificaciones; las semillas se colocaron entre papel Anchor húmedo (de acuerdo con los tratamientos), enrollado en forma de tacos y colocado en una bolsa de plástico dentro de una cámara de germinación marca Termo Scientific, modelo Precision, a una temperatura de 25° C, durante siete días, con ocho horas de luz y 16 de oscuridad. Se llevaron a cabo dos conteos: el primero, considerado como una prueba de vigor, se hizo al cuarto día después de la siembra y se evaluó el número de plántulas normales; el segundo, en el que se contaron las plántulas normales, plántulas anormales y semillas sin germinar, se realizó al séptimo día.

Los resultados para ambos conteos se reportan en porcentajes. Se midió longitud de plúmula y de radícula en todas las plántulas normales y se expresó en milímetros. De todas las plántulas normales para cada uno de los tratamientos se obtuvo peso seco de plúmula y de radícula, por separado, para lo cual se introdujeron en bolsas de papel de estraza y se colocaron en una estufa de secado, a una temperatura de 75° C durante 24 horas y se pesaron en una balanza de precisión expresando los datos en miligramos por plántula (mg planta⁻¹).

El análisis de los datos para ambos estudios se realizó mediante un análisis de varianza, y se llevó a cabo una comparación de medias, a través de la prueba múltiple de Tukey ($\alpha = 0.05$).

Estudio II

Índice de velocidad de emergencia (IVE) en invernadero

El experimento se llevó a cabo en el área de invernadero del Departamento de Fitomejoramiento de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, en Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. Se estableció en un diseño completamente al azar, con tres repeticiones.

Los tratamientos fueron tres potenciales osmóticos: -1 MPa, -2 MPa, -3 MPa y un testigo en el que se utilizó agua destilada para el riego; como sal se usó NaCl y las concentraciones se calcularon de acuerdo con la ecuación de J. H. Van't Hoff (Salisbury y Ross, 1978) descrita en el Estudio I. Las unidades de muestreo corresponden a las plántulas emergidas en el momento de la evaluación, y para mayor precisión de la prueba, los conteos se realizaron a la misma hora.

Para establecer las unidades experimentales, la siembra se llevó a cabo en un suelo de textura pesada, previamente regado con agua destilada en el caso del testigo, y soluciones salinas ajustadas a los potenciales osmóticos de: -0.25, -0.50, -0.75, -1.00, -1.25 y -1.50 MPa. La siembra se realizó en una cama de concreto forrada con plástico, de 2.98 × 0.98 × 0.28 m de largo, ancho y alto, respectivamente, que se dividió en siete segmentos correspondientes a cada tratamiento, más el testigo; se formaron camas individuales de 32 cm, aislándolas con plástico y fibra de vidrio, en las que se colocaron 20 cm de suelo (textura pesada).

La siembra se realizó en surcos de 25 semillas a 2 cm de profundidad, con una distancia de 3.5 cm entre plantas y 5 cm entre surcos, con tres repeticiones por tratamiento (cada surco se consideró como una unidad experimental). Una vez establecido el experimento, se evaluaron las siguientes variables: 1) tasa de emergencia, la cual se registró con el conteo diario de plántulas emergidas de acuerdo con la ecuación propuesta por Maguire (1962):

$$IVE = n_1/t_1 \dots n_7/t_7$$

donde n_1, n_2, \dots, n_7 son el número de semillas germinadas al t_1, t_2, \dots, t_7 (en días); una planta se consideró emergida cuando sobresalió a 2 mm del suelo; 2) cálculo de la emergencia total como el porcentaje absoluto, considerando el total del número de semillas incluidas desde el inicio del experimento en cada tratamiento; 3) pesos seco de plántulas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Estudio I

Efectos de la salinidad en la germinación y vigor de la semilla

Los resultados del análisis de varianza para este ensayo, con la aplicación de diferentes concentraciones de NaCl (Cuadro 1), muestran diferencias estadísticas ($p \leq 0.01$) entre tratamientos para todas las variables relacionadas con la capacidad germinativa y el vigor de la semilla. Lo anterior indica que los diferentes tratamientos afectaron los procesos relacionados con la imbibición, el metabolismo, y la emisión de la raíz y plúmula, además de modificar la acumulación de materia seca tanto en la plúmula como en la raíz, que está relacionada con la división celular y el llenado de las células.

La comparación de medias por concentración de NaCl en el agua de riego (Cuadro 2) muestra que la semilla tiene la capacidad de germinar normalmente hasta un PO de -0.875 MPa, lo que equivale a una conductividad eléctrica de 18.57 dS.m⁻¹. Sin embargo, la tasa de crecimiento y acumulación de materia

Cuadro 1. Cuadrados medios y nivel de significancia para variables evaluadas en el estudio de germinación y vigor en laboratorio bajo condiciones de salinidad.

FV	GI	PC (%)	G (%)	PA (%)	SSG (mm)	LP (mm)	LR (mm)	GI	PSP (mg)	PSR (mg)
Trats	9	2873.42**	2533.03**	2531.31**	1.24**	112538.47**	117211.51**	9	492.64**	244.46**
Error	20	5.33	36.26	32.00	1.6	414.62	1258.37	18	26.84	20.24
C.V (%)		2.62	7.11	37.88	316.22	28.38	20.42		17.35	14.06

*, **= Significativo al 0.05 y 0.01 de probabilidad, respectivamente; FV= Fuentes de Variación; GI= Grados de libertad; Trats= tratamientos; CV= Coeficiente de variación (%); PC= Primer conteo; G= Germinación; PA= Plántulas anormales; SSG= Semillas sin germinar; LP= Longitud de plúmula; LR= Longitud de raíz. PSP= Peso seco de plúmula; PSR= Peso seco de raíz.

seca de las plántulas (LP, LR, PSP y PSR), se reduce conforme se incrementa la concentración de sal. Este mismo comportamiento se ha observado en diferentes especies y variedades: garbanzo (Kaya, 2008), frijol (Franca *et al.*, 2007), pasto (Ruiz y Terenti, 2012), chícharo (Kaya *et al.*, 2008), maíz (Laynes *et al.*, 2008; Akram *et al.*, 2010).

Los resultados de este estudio pueden atribuirse a la disminución de la movilidad del agua, lo cual reduce su disponibilidad para los procesos que se llevan a cabo durante la germinación. Este fenómeno se llama “sequía fisiológica”, debido a que en suelos salinizados disminuye la velocidad de imbibición de las semillas, el cual es el primer evento con el que se inicia la germinación.

La siguiente etapa de la germinación es el rompimiento de las estructuras y la posterior emergencia de la plúmula y radícula, que se relaciona con el inicio de los procesos fisiológicos (mecanismos de arranque), probablemente relacionados con los primeros ciclos de división celular en el embrión, los cuales al parecer son menos afectados por el estrés salino que los procesos fisiológicos y bioquímicos que ocurren durante el crecimiento de las plántulas (González, 2001). Los sistemas enzimáticos de la glicólisis, así como el ciclo de Krebs son especialmente sensibles a la salinidad y dan como resultado una menor disponibilidad de energía y adquisición de nutrientes, además de la disminución de la capacidad germinativa y la reducción del crecimiento de la plántula (Mata-Fernández *et al.*, 2014).

Las variables relacionadas con la acumulación de materia seca (LP, LR, PSP, PSR) registraron diferencias entre el testigo y los tratamientos salinos; las sales afectaron el crecimiento, respuesta que pudo deberse a una menor absorción de agua por las raíces. El efecto osmótico generado por altas concentraciones de sal aumentan la presión osmótica de la solución, por lo que las células sufren una adaptación que requiere mayor consumo de energía (Aiazzi *et al.*, 2005) para activar los mecanismos de adaptación, que se reflejan fenotípicamente con un menor crecimiento, modificación de la relación parte aérea/raíz, y la limitación de la expansión foliar (Leidi y Pardo, 2002).

El efecto de las sales en la germinación y crecimiento de las plántulas está estrechamente relacionado con la tolerancia varietal (González, 2001). La tolerancia salina es una habilidad relativa de las plantas para producir rendimientos satisfactorios o para sostenerse bajo estas condiciones. Esta tolerancia va-

ría a lo largo de las distintas fases de desarrollo de la planta (Mata-Fernández *et al.*, 2014).

Munns (2002) dio a conocer que el efecto de la sal sobre el crecimiento de las plantas de maíz se da en dos fases. La primera fase, la reducción del crecimiento, se da a unos cuantos días de exposición de la planta a la sal, la cual es aparentemente rápida y causada por la sal fuera de las raíces (estrés hídrico). Las plantas sometidas al estrés salino presentan un tamaño más pequeño, resultado de cambios en la elongación y división celular. Estos cambios presumiblemente son regulados por señales hormonales procedentes de las raíces. La segunda fase de reducción del crecimiento registra mayor tiempo para desarrollarse como resultado de la lesión interna, debido a un periodo prolongado de exposición a este tipo de estrés (Cuadro 2).

Estudio II

Índice de velocidad de emergencia (IVE) en invernadero

Los resultados de este estudio muestran que existen diferencias significativas ($p \leq 0.01$) entre los tratamientos aplicados en la prueba de vigor a la que se sometieron las semillas (Cuadro 3). Las diferencias se pueden atribuir a que el incremento de la concentración de NaCl en la solución del suelo, incrementa las fuerzas potenciales que retienen el agua y hacen más difícil la absorción (Mata-Fernández *et al.*, 2014). Debido a la disminución de la movilidad del agua en los suelos salinizados, la germinación se ve reducida, lo que da como resultado la emergencia no uniforme de las plántulas (González, 2001).

La comparación de medias por concentración de NaCl aplicado en la prueba de vigor (IVE) se presenta en el Cuadro 4. Los resultados reflejan un cambio en la dinámica de germinación: al reducirse el potencial osmótico se incrementó el tiempo para el inicio del proceso, que consiste en la imbibición de la semilla y la posterior activación del metabolismo para dar lugar a la emergencia de la radícula y plúmula. Estos resultados concuerdan con lo observado por otros investigadores (Camejo y Torres, 2000; Meza *et al.*, 2004), quienes mencionan que este retraso puede deberse a la disminución de la capacidad de las semillas para la absorción de agua y/o un efecto tóxico de los iones, los cuales afectan a enzimas y hormonas que retrasan o inhiben el proceso de germinación. El porcentaje de germinación final se ve afectado por el incremento en la concentración salina, lo cual puede ser atribuido a que el estrés salino causa inhibición de la elongación celular.

Cuadro 2. Comparación de medias para las variables de germinación y vigor de la semilla bajo estrés salino en laboratorio.

Tratamientos (PO)	PC (%)	Germinación (%)	LP (mm)	LR (mm)	PSP (mg plántula ⁻¹)	PSR (mg plántula ⁻¹)
0.000 MPa	100.00 a	100.00 a	136.29 a	229.10 a	46.00 ab	43.20 a
-0.025 MPa	97.33 a	97.33 a	120.86 a	204.29 ab	47.51 a	41.10 a
-0.250 MPa	98.66 a	98.66 a	100.45 b	209.21 ab	42.62 ab	38.03 ab
-0.375 MPa	98.66 a	98.66 a	81.86 c	194.63 b	35.70 abc	38.07 ab
-0.500 MPa	97.33 a	98.66 a	60.86 d	179.58 bc	30.38 bcd	36.37 ab
-0.625 MPa	100.00 a	97.33 a	40.78 e	160.72 cd	22.60 cde	32.62 abc
-0.750 MPa	94.66 a	88.00 ab	36.81 ef	147.19 d	20.47 cde	26.09 bcd
-0.875 MPa	98.66 a	89.33 ab	24.01 efg	107.34 e	14.76 de	20.38 cd
-1.000 MPa	93.33 a	73.33 b	21.55 fg	104.75 e	13.54 e	18.13 d
-1.250 MPa	0.00 b	5.33 c	18.00 g	91.75 e	15.00 de	17.50 d
Media	87.86	84.66	71.73	173.70	29.85	32.12
Tukey ($\alpha=0.05$)	6.67	17.48	17.83	31.07	16.61	14.49

Medias con letras iguales en cada columna no son estadísticamente diferentes (Tukey, $\alpha = 0.05$).

PO= Potencial osmótico; PC= primer conteo; LP= longitud plúmula; LR= longitud de radícula, PSP= peso seco de plúmula, PSR= peso seco de radícula.

Cuadro 3. Cuadrados medios y nivel de significancia para variables evaluadas en el estudio del índice de velocidad de emergencia en invernadero, bajo condiciones de salinidad.

FV	GI	IVE (%)	ET (%)	PS (mg plántula ⁻¹)
Tratamientos	6	18.80 **	4706.01 **	14949.26**
Error	12	0.17	79.55	530.11
CV (%)		12.30	14.50	18.16

*, **= Significativo al 0.05 y 0.01 de probabilidad, respectivamente; FV= Fuentes de Variación (%); GI= Grados de libertad; CV= Coeficiente de variación, IVE= Índice de velocidad de emergencia; ET= Emergencia Total; PS= Pesos seco de plántulas.

Cuadro 4. Comparación de medias del análisis de varianza para las variables vigor.

Tratamientos (PO)	IVG	ET (%)	PS (mg plántula ⁻¹)
0.000 MPa	6.26 a	100.00 a	214.35 a
-0.250 MPa	6.31 a	97.33 a	209.70 a
-0.500 MPa	4.45 b	90.66 ab	154.32 ab
-0.750 MPa	3.11 c	66.00 bc	83.92 bc
-1.000 MPa	2.57 c	62.00 c	85.29 bc
-1.250 MPa	0.50 d	13.33 d	34.88 c
-1.500 MPa	0.09 d	2.66 d	51.50 c
Media	3.38	61.47	126.73
Tukey ($\alpha= 0.05$)	1.27	27.24	2.47

PO= Potencial osmótico; IVE= Índice de velocidad de emergencia; ET= Emergencia total; PS= Pesos seco de plántulas. Medias con letras iguales en cada columna no son estadísticamente diferentes [Tukey, $\alpha = 0.05$].

Al registrarse una baja acumulación de materia seca con el incremento de la concentración de sal, se observaron los efectos adversos de las sales sobre el crecimiento, consecuencia de las alteraciones en el metabolismo de las plantas, causadas por un aumento en la presión osmótica, que a su vez genera un desbalance energético (Mata-Fernández *et al.*, 2014).

El estrés hídrico que genera la alta concentración salina provoca que las células de la planta sufran una adaptación osmótica que genera, a su vez, un mayor consumo de energía; la inversión de la mayor parte de ésta en los procesos de adaptación osmótica de las células para la absorción de agua conlleva una menor disponibilidad de energía para otras funciones, lo que repercute en la tasa de crecimiento (Aiazzi *et al.*, 2005). Otra de las causas de las afectaciones al crecimiento es el retraso que se produce en la división celular, que resulta ser la más afectada por la salinidad. Además, las altas concentraciones de sal en la célula inhiben los procesos de síntesis (González, 2001), debido principalmente a que en estas condiciones de estrés, la cantidad de energía adquirida se ve reducida y/o se redistribuye desde el crecimiento (Munns y Matthew, 2015).

En este estudio es evidente el efecto negativo de la salinidad en el proceso germinativo y en la acumulación de materia seca, lo que confirma que el estrés causado por el NaCl altera el metabolismo celular,

que se refleja en un menor IVE, con una reducción de poco más de seis unidades, registrado para el tratamiento con menor potencial osmótico (-1.500 MPa), cuyo IVE es 0.09, valor muy inferior al 6.26 del testigo. Asimismo, al reducirse la acumulación de materia seca se hace evidente el efecto negativo de la sal, tanto en la división celular como en el depósito de reservas y nutrientes en las células, que finalmente constituyen la biomasa de las plantas.

CONCLUSIONES

El genotipo en estudio posee habilidad para germinar en un medio caracterizado por un bajo potencial osmótico (PO) (-1 MPa), producto del efecto que genera el NaCl. Asimismo, los iones Na⁺ y Cl⁻ aportados por la sal, perturban el metabolismo celular, sin que sea suficiente para afectar en términos significativos la germinación. En cambio, cuando el PO se reduce a valores menores de -1 MPa, las semillas presentan una disminución significativa en la capacidad germinativa y en el vigor inicial.

Potenciales osmóticos muy negativos (-1.250 MPa) causaron la afectación del metabolismo durante el proceso germinativo, lo que redujo el suministro de energía, necesario para llevar a cabo la emergen-

cia y desarrollo de la plúmula y la radícula, lo que comprometió el porcentaje de germinación final.

Reducciones en el potencial osmótico de la solución del suelo alteran tanto el metabolismo como la división celular, lo que se refleja en disminuciones significativas del índice de velocidad de emergencia.

El desequilibrio energético generado por la reducción del potencial osmótico fuera de las raíces, promovió el retraso de la división y la diferenciación celular resultado del estrés hídrico, toxicidad iónica e inestabilidad nutricional, lo que afectó la emergencia total de plántulas.

El presente estudio establece las bases para profundizar en investigaciones sobre los mecanismos fisiológicos y bioquímicos que la variedad de maíz amarillo presenta, bajo estrés hídrico, en las etapas iniciales y durante el desarrollo vegetativo.

LITERATURA CITADA

- ATAZZI, M.T., P. Carpane y C. Deza. 2005. Efecto de la salinidad, sobre el crecimiento de plantas de *Atriplex cordobensis* Gandoger et Stuckert originadas de semillas de distintas procedencias. *Multequina* 14: 39-46.
- AKRAM, M., M. Yasin, R. Ahmad, E. Ahmed, J. Iqbal and M. Mohsan. 2010. Screening for salt tolerance in maize (*Zea mays* L.) hybrids at an early seedling stage. *Pak. J. Bot.* 42(1): 141-154.
- ARGENTEL, L. y M. González. 2006. Respuesta interespecífica a la salinidad en dos especies del género *Triticum*. *Cultivos Tropicales* 27(2): 51-52.
- ARGENTEL, L., R.D. López, L.M. González, R.C. López, E. Gómez y I. Fonseca 2010. Evaluación de la tolerancia a la salinidad en estadios tempranos y finales del desarrollo en triticales (*X Triticum secale*). *Cultivos Tropicales* 31(1): 48-53.
- CAMEJO, D. y W. Torres. 2000. La salinidad y su efecto en los estadios iniciales del desarrollo de dos cultivares de tomate (*Lycopersicon esculentum*, Mill). *Cultivos tropicales* 21(2): 23-26.
- COPELAND, L. G. 1976. Principles of the seed science and technology. Burgess Publishing Company. Minneapolis, Minnesota, USA. 369 p.
- FRANCA, B., L. De Sa Ribeiros y C. Aragao. 2007. Germination, initial growth and cotyledon protein content of bean cultivars under salinity stress. *Revista Brasileira de Sementes* 29(2): 106-110.
- GARCÍA, A. y J.M. Lasa, 1991. Ensayos de vigor de nacimiento: revisión bibliográfica, Estación experimental Zaragoza de Aula DEL, Boletín N. 14.
- GONZÁLEZ, L.M. 2001. Apuntes sobre la fisiología de las plantas cultivadas en condiciones salinas. *Cultivos Tropicales* 23(4): 47-57.
- INTERNATIONAL SEED TESTING ASSOCIATION (ISTA). 1976. International rules for seed testing. *Seed Sci. Technol.* 4: 3-177.
- INTERNATIONAL SEED TESTING ASSOCIATION (ISTA). 2009. International Rules for Seed Testing. Chapter 5: The germination test. ISTA. Bassersdorf, Switzerland.
- KAYA, M., G. Kaya, M.D. Kaya, M. Atak, S. Saglam, K.M. Khawar and C.Y. Ciftci. 2008. Interaction between seed size and NaCl on germination and early seedling growth of some Turkish cultivars of chickpea (*Cicer arietinum* L.). *Journal of Zhejiang University Science B.* 9(5): 371-377.
- LÄUCHLI, A. and S.R. Grattan. 2007. Plant growth and development under salinity stress. In *Advances in molecular breeding toward drought and salt tolerant crops*. Springer Netherlands. p. 1-32. doi: <https://dx.doi.org/10.1007/978-1-4020-5578-2>
- LAYNEZ, J., J.R. Méndez, y J. Mayz. 2008. Efecto de la salinidad y del tamaño de la semilla sobre la germinación y crecimiento de plántulas de maíz (*Zea mays* L.) bajo condiciones de laboratorio. *TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas* 11(1): 17-25.
- LEIDI, E. y J. Pardo. 2002. Tolerancia de los cultivos al estrés salino: qué hay de nuevo. *Revista de Investigaciones de la Facultad de Ciencias Agrarias* 2 (2): 69-90.
- MAGUIRE, J.D. (1962) Speed of Germination-Aid in Selection and Evaluation for Seedling Emergence and Vigor. *Crop Science*, 2, 176-177. doi: <http://dx.doi.org/10.2135/cropsci1962.0011183X000200020033x>
- MATA-FERNÁNDEZ I., M.L. Rodríguez-Garmino, J. López-Blanco, G. Vela-Correa. 2014. Dinámica de la salinidad en los suelos. *Revista Digital del Departamento El Hombre y su Ambiente. Universidad Autónoma Metropolitana-Xochimilco* 1(5): 26-35.
- MCDONALD, M. B. Jr. 1980. Assessment of seed quality. *HortScience*. 15(6): 784-788.
- MUNNS, R. and G. Matthew 2015. Salinity tolerance of crops-what is the cost? *New Phytologist* 208:668-673.
- NICASIO, S., E. Sánchez, A. Orozco y A. Gamboa. 2011. Efecto del precondicionamiento y el sustrato salino en la germinación y crecimiento de plántulas de maíz (*Zea mays*) raza Chalqueño. *Agrociencia* 45 (2): 195-205
- RUIZ, M. y O. Terenti. 2012. Germinación de cuatro pastos bajo condiciones de estrés salino. *Phyton, Argentina* 81: 169-176.
- SALISBURY, F. y C. Ross. 1992. Fisiología de las plantas. Thomson Learning, España, p. 69-70.