

EFFECTO DE LA IRRADIACIÓN CON UV-C EN LA GERMINACIÓN Y VIGOR DE TRES ESPECIES VEGETALES

Effect of UV-C radiation on the germination and vigour of three plant species

¹Rahim Foroughbakhch-Pournavab, ¹Elly Bacópulos-Mejía, ^{2*}Adalberto Benavides-Mendoza

¹Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias Biológicas, Departamento de Botánica.

²Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Departamento de Horticultura, Calzada Antonio Narro 1923, Saltillo CP. 25315, Coahuila, México. *abenmen@uaaan.mx

Artículo científico recibido: 7 de marzo de 2014, **aceptado:** 03 de febrero de 2015

RESUMEN. En la presente investigación se estudió la respuesta de *Glycine max* L., *Triticum aestivum* L. y *Helianthus annuus* L., a diferentes dosis de radiación UV-C aplicada en la semilla, bajo la hipótesis de que es posible encontrar una dosis de UV-C que modifique de forma positiva la germinación y la tolerancia al estrés de alta temperatura y humedad. Los resultados de la prueba de germinación estándar indican que las variables asociadas con el vigor germinativo como el porcentaje de germinación, el número de plántulas normales y la biomasa no mostraron respuesta a la irradiación con UV-C en el trigo y el girasol, mostrando la soya respuestas negativas en estas variables. La longitud media de la plúmula disminuyó con la irradiación mientras que la longitud media de la radícula no mostró cambio en la soya y el trigo, presentando efecto positivo el girasol. Después de aplicar las condiciones de estrés de alta temperatura y humedad se obtuvo un efecto positivo de la radiación UV-C en las variables de vigor y germinación en girasol y soya, con las dosis de 2.88-43.2 kJ m⁻² y 57.6 kJ m⁻², respectivamente. En cambio, el número de plántulas normales, la biomasa y la longitud de la plúmula y la radícula así como la biomasa de las plántulas no mostraron ningún efecto.

Palabras clave: Inducción de tolerancia, fotoreceptores, choque térmico, tolerancia a UV, fotomorfogénesis

ABSTRACT. The responses of three plant species, *Glycine max* L., *Triticum aestivum* L. and *Helianthus annuus* L., exposed to different doses of UV-C radiation applied in the seed were studied. The objective was to test the hypothesis that it is possible to find a dose of UV-C that positively modifies seed germination and heat stress tolerance. The results of the standard germination test showed that the variables associated with the germination vigor and percentage, the number and biomass of normal seedlings exhibited no response to the UV-C radiation in wheat and sunflower; conversely, soybean showed a negative response to these variables. UV-C radiation decreased the average length of the plumule, while the radicle average length showed no change in soybeans and wheat, and a positive effect in sunflower. After applying stress conditions of high temperature and humidity, a positive effect of UV-C radiation was observed, but only for variables of vigor and germination in sunflower and soybeans, with UV-C doses of 2.88-43.2 kJ m⁻² and 57.6 kJ m⁻², respectively. Conversely, the number of normal seedlings, the plumule and radicle biomass and the length, as well as the seedling biomass showed no changes with UV-C radiation.

Key words: Tolerance induction, photoreceptors, heat stress, UV tolerance, photomorphogenesis

INTRODUCCIÓN

La radiación ultravioleta (UV) es el conjunto de radiaciones del espectro electromagnético con longitudes de onda desde los 150 hasta los 400 nm. Este espectro se divide en tres bandas denominadas UV-A (320 a 400 nm), UV-B (280 a 320 nm) y UV-C (menores a 280 nm). La radiación UV-C es

la porción más energética del espectro UV, no se encuentra de manera natural en la biosfera pero se utiliza de forma artificial por su importante acción bactericida y germicida (Ruiz-López *et al.* 2010).

Varios estudios han mostrado que la radiación UV-C causa respuestas negativas en los procesos celulares, el metabolismo y crecimiento (Rastogi *et al.* 2010; Ruiz-López *et al.* 2010; Sarghein *et*

al. 2011). A pesar de lo anterior, partiendo del conocimiento de que es posible obtener un efecto benéfico con la aplicación subletal de un agente capaz de inducir estrés físico o químico (Luckey 1980), se ha verificado que la irradiación controlada con UV-C, utilizando dosis entre 2 y 14 kJ m⁻², produce respuestas positivas en plántulas, frutos y otras estructuras vegetales en poscosecha (Costa et al. 2006; Andrade-Cuvi et al. 2010; Promyou y Supapvanich 2012). Además de la acumulación de fitoalexinas y la inducción de resistencia (Rivera-Pastrana et al. 2007). Mientras que la información referente a la irradiación de semillas con UV-C es muy escasa y se ha reportado solamente en lo referente a la inducción de tolerancia a patógenos (Brown et al. 2001), y la inducción de antioxidantes en plántulas (Kacharava et al. 2009), sin encontrarse información acerca del efecto de la irradiación sobre la capacidad de germinación y el vigor de la semilla. Por lo tanto, considerando la hipótesis de que es posible encontrar una dosis de irradiación de las semillas con UV-C que modifique de forma positiva el comportamiento germinativo y la tolerancia al estrés, el objetivo de este estudio fue determinar el impacto de la irradiación a semilla de girasol (*Helianthus annuus* L), trigo (*Triticum aestivum* L.) y soya (*Glycine max* L.) con diferentes dosis de radiación sobre la germinación y el vigor de semillas en condiciones estándar de germinación y bajo condición de estrés.

MATERIALES Y MÉTODOS

Material Biológico

Se utilizaron semillas de girasol (*Helianthus annuus*) variedad Precoz UA. U.A.A.A.N. 2009, trigo (*Triticum aestivum*) variedad Gálvez y soya (*Glycine max*) variedad Huasteca.

Irradiación de las semillas con UV-C

Se colocaron 100 semillas en una bandeja plástica de forma que la superficie con mayor cercanía al embrión quedara expuesta a la fuente de radiación buscando así disminuir la posible interferencia por parte de los tejidos del endospermo. Se introdujo el material biológico en una

cámara para irradiación con una lámpara emisora de radiación UV-C (modelo UVM-225D marca UVP) a una irradiancia constante de 0.16 mW cm⁻² (equivalente a 1.6 W m⁻²). La irradiación se llevó a cabo durante el tiempo necesario para conseguir las dosis de UV-C (Tabla 1). La determinación de las dosis fue realizada en un trabajo experimental preliminar en donde se probaron diferentes tiempos de exposición de semillas de las especies bajo estudio. La dosis mínima para cada especie se definió como la que presentó el primer indicio de cambio o modificación en las estructuras de las plántulas provenientes de las semillas irradiadas; la dosis máxima fue aquella en donde los cambios en las estructuras de las plántulas fueron más visibles hasta en 80 % de los lotes de semillas; mientras que la dosis letal cincuenta (DL50) se marcó cuando 50 % ó más de las semillas no tuvieron capacidad para germinar (Tabla 1).

La irradiancia se mantuvo constante en 1.6 W m⁻² y las dosis aplicadas se obtuvieron variando el tiempo de exposición a la distancia fijada utilizando la expresión de Márquez-Villacorta y Pretell-Vásquez (2013):

$$D = \frac{I * t}{100}$$

En donde D = Dosis de radiación aplicada (kJ m⁻²), I = Irradiancia (W m⁻²) en donde $W = J s^{-1}$, y t = tiempo de exposición (en segundos).

Pruebas de germinación y envejecimiento acelerado

Prueba de germinación estándar (PGE). Después de la irradiación de la semilla, se llevó a cabo la evaluación de la PGE de acuerdo con Moreno (1996) e ISTA (1999). Para ello se colocaron 100 semillas, en cuatro repeticiones de veinticinco semillas, en papel seedburo k-22 para germinación previamente humedecido con agua destilada, se cubrieron las semillas con otro papel para luego formar rollos, que se colocaron en la cámara de germinación a temperatura constante de 25 °C, las evaluaciones se realizaron en tiempos determinados que dependieron de la especie. Durante la

Tabla 1. Tratamientos, dosis de radiación UV-C y tiempo de exposición de semillas de soya, trigo y girasol con irradiancia constante de 1.6 W m^{-2} .

Table 1. Treatments, UV-C radiation doses and exposition time of soybean, wheat and sunflower seeds using a constant irradiation of 1.6 W m^{-2} .

Especie	Tratamiento Testigo	Tratamiento de Dosis Mínima		Tratamiento de Dosis Máxima		Tratamiento de DL50	
		Kj m^{-2}	Tiempo (s)	Kj m^{-2}	Tiempo (s)	Kj m^{-2}	Tiempo (s)
Soya	Sin radiación	1.44	900*	43.20	27 000	57.60	36 000
Trigo	Sin radiación	2.88	1 800	17.28	10 800	43.20	27 000
Girasol	Sin radiación	2.88	1 800	8.64	5 400	43.20	27 000

*Los equivalentes en minutos para los tratamientos de dosis mínima son 15, 30 y 30 min de irradiación para la soya, trigo y girasol, respectivamente. Para los tratamientos de dosis máxima son 450, 180 y 90 min de irradiación para la soya, trigo y girasol, respectivamente. Para los tratamientos de DL50 son 600, 450 y 450 min de irradiación para la soya, trigo y girasol, respectivamente.

evaluación se registró el total de semillas para determinar la capacidad de germinación, con el número de plántulas normales, anormales y las semillas no germinadas (Moreno 1996). Para girasol y soya se realizaron los conteos iniciales al cuarto día, mientras que para el trigo el conteo inicial se realizó al quinto día, después de la siembra. El segundo conteo a los ocho días en girasol, a los 10 en soya y siete días después en el trigo para verificar la capacidad de germinación, además de la longitud media de plúmula y radícula, el peso fresco y seco se verificó en 10 plántulas por repetición.

Prueba de envejecimiento acelerado (PEA).

Se obtuvieron lotes de 200 semillas que fueron irradiadas de la misma forma que en la PGE, a las que se les indujeron condiciones de estrés con alta temperatura y humedad que aumentaron el deterioro fisiológico de la semilla (Moreno 1996, ISTA 1999). Se utilizó una cámara de envejecimiento artificial con condiciones de $45 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ y 100 % de humedad relativa (HR). Dentro de la cámara se colocó un vaso de precipitado de 500 ml conteniendo 250 ml de agua, colocándose encima del nivel del agua las 200 semillas de cada tratamiento, en una malla plástica sostenidas por un soporte en el interior y cubiertas con una película plástica, la unidad experimental fue de cuatro vasos por tratamiento. El tiempo de exposición aplicado fue de 64 h para la soya y de 48 h para el trigo y el girasol (Moreno 1996). Al finalizar el periodo de exposición a las condiciones de alta temperatura y humedad, las semillas se dejaron enfriar a temperatura ambiente

y se efectuó la PGE bajo un diseño completamente al azar. Para determinar el cambio porcentual observado entre las dos condiciones de PGE y PEA, se utilizó la siguiente fórmula:

$$\text{Cambio}(\%) = \frac{X_{PEA} - X_{PGE}}{X_{PGE}} * 1000$$

En donde X_{PEA} es el valor medio obtenido para cada variable en la condición de aplicación de estrés de alta temperatura y humedad para inducir el envejecimiento fisiológico acelerado y X_{PGE} es el valor medio obtenido para cada variable en la condición de germinación estándar en ausencia de estrés manifiesto.

Análisis estadístico Los datos de las variables evaluadas se analizaron con el paquete estadístico SAS/STAT (SAS. 2004), bajo un diseño completamente al azar con arreglo factorial con los siguientes factores: tres especies vegetales y cuatro dosis de irradiación con UV-C, lo que dio un total de 12 tratamientos con ocho repeticiones cada uno. Los resultados de cada variable se compararon con la prueba de medias de Tukey ($p \leq 0.05$).

RESULTADOS

Prueba de germinación estándar

El análisis de varianza detectó diferencias significativas ($p \leq 0.05$) entre tratamientos y especies para las variables evaluadas de vigor (%), germinación (Ger %), plántulas normales (PN), plántulas anormales (PA), semilla sin germinar (SSG), longi-

Tabla 2. Análisis de varianza de la prueba de germinación estándar realizada en semillas de soya, trigo y girasol.

Table 2. Variance analysis of the standard germination test conducted in soybean, wheat and sunflower seeds.

FV	GL	vigor %	Ger%	PN	PA	SSG	LMP	LMR	PF	PS
Trat	11	62.94**	91.91**	258.32**	59.93**	92.22**	90.28**	67.53**	756.68**	8.06**
Dosis	3	1.95ns	1.91ns	48.01**	52.26**	1.71ns	23.32**	14.13ns	41.84**	0.34**
ESPP	2	341.14**	496.57**	1325.34**	243.50**	498.64**	442.19**	305.47**	4033.65**	43.28**
Dosis x										
ESPP	6	0.71ns	2.02ns	7.80ns	2.58ns	1.99ns	6.45*	14.91*	21.78**	0.18**
EE	84	1.59	2.09	5.38	4.20	2.09	2.82	6.78	6.29	0.04
CV		5.51	6.46	14.25	33.64	54.91	17.88	16.62	20.85	19.69
Media		22.89	22.35	16.28	6.09	2.64	9.39	15.66	12.02	0.99

Vigor % = Vigor germinativo, Ger % = Capacidad de germinación (%), Plántulas normales (PN), Plántulas anormales (PA), Semilla sin germinar (SSG), Longitud media de plúmula (LMP), Longitud media de radícula (LMR), Peso fresco (PF) y Peso seco (PS). **= Significativo ($p < 0.01$), GL=Grados de libertad, EE= Cuadrado medio del error y CV= Coeficiente de variación.

Tabla 3. Valores promedio de las variables de la prueba de germinación estándar realizada en semillas de soya, trigo y girasol.

Table 3. Average values of variables in the germination standard test in soybean, wheat, and sunflower seeds.

Especie	Tratamiento	Vigor % (Pc)	Ger % (Sc)	PN (%)	PA (%)	SSG (%)	LMP (cm)	LMR (cm)	PF (g)	PS (g)
Soya	Testigo	100 ^a	100 ^a	86.5 ^b	13.5 ^{ef}	0 ^b	15.7 ^a	19.1 ^a	28.3 ^a	2.74 ^a
	D. mín.	100 ^a	100 ^a	72.5 ^{bc}	27.5 ^{bcd}	0 ^b	14.0 ^{ab}	18.7 ^{abc}	23.4 ^b	2.25 ^b
	D. máx.	100 ^a	99.0 ^a	74.5 ^{bc}	24.0 ^{bcde}	1.0 ^b	12.5 ^b	18.9 ^{ab}	23.9 ^b	2.21 ^b
	DL50	100 ^a	98.5 ^a	70.0 ^c	28.5 ^{bc}	1.5 ^b	12.2 ^b	20.1 ^a	22.8 ^b	2.15 ^b
Trigo	Testigo	96.5 ^a	96.0 ^a	91.5 ^a	6.0 ^f	3.5 ^b	8.6 ^c	14.0 ^{de}	3.3 ^e	0.32 ^c
	D. mín.	98.5 ^a	97.0 ^a	81.0 ^{abc}	16.0 ^{cdef}	3.0 ^b	7.8 ^c	14.5 ^{cde}	2.9 ^e	0.28 ^c
	D. máx.	99.0 ^a	98.5 ^a	83.0 ^{abc}	14.5 ^{def}	1.5 ^b	7.7 ^c	14.7 ^{bcde}	3.1 ^e	0.31 ^c
	DL50	98.5 ^a	99.0 ^a	79.5 ^{abc}	19.0 ^{cdef}	1.0 ^b	8.1 ^c	14.4 ^{cde}	3.0 ^e	0.29 ^c
Girasol	Testigo	73.0 ^b	68.5 ^b	39.0 ^d	29.5 ^{bc}	31.5 ^a	7.4 ^{cd}	11.2 ^e	9.0 ^{cd}	0.42 ^c
	D. mín.	77.5 ^b	75.0 ^b	41.0 ^d	34.0 ^{ab}	25.0 ^a	7.5 ^{cd}	13.9 ^{de}	9.6 ^c	0.43 ^c
	D. máx.	77.5 ^b	72.5 ^b	37.0 ^d	36.0 ^{ab}	27.5 ^a	6.5 ^{cd}	16.3 ^{abcd}	9.3 ^{cd}	0.36 ^c
	DL50	78.0 ^b	69.0 ^b	26.0 ^d	44.0 ^a	31.0 ^a	4.7 ^d	12.2 ^{de}	5.1 ^{de}	0.19 ^c

Vigor % = Vigor germinativo, Ger % = Capacidad de germinación (%), Plántulas normales (PN), Plántulas anormales (PA), Semilla sin germinar (SSG), Longitud media de plúmula (LMP), Longitud media de radícula (LMR), Peso fresco (PF) y Peso seco (PS). Pc= Primer conteo; Sc= Segundo conteo. Letras diferentes en columnas indican diferencias significativas de acuerdo con Tukey ($p \leq 0.05$).

tud media de plúmula (LMP), longitud media de radícula (LMR), peso seco (PS), peso fresco (PF) (Tabla 2). En la Tabla 3 se encuentran las comparaciones múltiples de medias de Tukey para estas variables.

Prueba de envejecimiento acelerado

El análisis de varianza mostró diferencias significativas ($p \leq 0.05$) entre especies y tratamientos para las variables de vigor, germinación, PN, PA, SSG, LMP, LMR, PF y PS (Tabla 4). Mientras que en la Tabla 5 se presentan las comparaciones de medias de estas variables.

Cambio observado entre los las variables en la PGE y PEA

Los valores porcentuales de cambio se encuentran en la Tabla 6. Los datos indican la magnitud por efecto del estrés de alta temperatura y humedad en la PEA para cada combinación de especie y dosis de UV-C tomando como referencia lo observado en la PGE. La PEA tuvo efecto negativo en el vigor y la germinación de la soya y el trigo (Tabla 5). Al aplicar la radiación UV-C hubo efecto positivo en el vigor y germinación en el girasol con las dosis de 2.88 a 43.2 kJ m^{-2} ; en la soya se presentó un cambio positivo al aplicar la dosis de 57.6 kJ m^{-2} . En cuanto a las PN se presentaron efectos negativos en las tres especies, sin cambio atribuible

a las diferentes dosis de UV-C. La PA aumentó en las tres especies al aplicar la PEA. El número de semillas sin germinar (SSG) aumentó en la soya y el trigo bajo la PEA, en cambio en el girasol se encontró una disminución en el número de SSG. La LMP y LMR disminuyó en las tres especies en la PEA, sin observarse efecto de la UV-C en la soya y el trigo. En el caso del girasol la irradiación de la semilla con UV-C tuvo un efecto negativo, disminuyendo aún más la LMP y LMR después de la PEA. En cuanto al PF y PS estos disminuyeron en las tres especies. Para las variables de LMP, LMR, PF y PS el trigo fue la especie menos sensible a los efectos del proceso de envejecimiento acelerado.

DISCUSIÓN

Prueba de germinación estándar

En las variables de vigor, germinación y PN, la soya y el trigo fueron estadísticamente iguales y superiores al girasol, sin encontrarse diferencias atribuibles a los tratamientos salvo en el caso de la última variable en las semillas de soya en donde se tuvo una respuesta inversamente proporcional a la dosis de UV-C. Al respecto Torres *et al.* (1991) reportaron que las semillas de girasol irradiadas durante tiempos de cinco a 60 min con UV-C dieron lugar a menor cantidad de PN, por lo que en este experimento obtuvimos resultados distintos para esta especie. No sabemos la razón de porqué solamente la soya mostró esta respuesta negativa, por lo que suponemos que se trata de una respuesta intrínseca de la especie (Sarghein *et al.* 2011), que se relaciona con la concentración de flavonoides en la semilla (Choudhury y Mandi 2012); asociada a su vez con la mayor producción de radicales libres (Kacharava *et al.* 2009), que causan cambios negativos en los embriones y disminuyen la cantidad de PN.

En cuanto al número de PA los valores más bajos se detectaron en el trigo, especie que tiene buena tolerancia a la radiación UV (Kanash y Savin 1991), siendo iguales en el girasol y la soya; en este caso se observó un efecto de la irradiación con UV-C que aumentó la cantidad de PA al elevarse la do-

sis. Esta respuesta por lo general es el resultado de la producción inducida por la UV-C de radicales libres promotores de estrés oxidativo (Kacharava *et al.* 2009).

En el número de SSG no hubo diferencias entre tratamientos, pero sí entre especies, siendo el girasol el que presentó el mayor valor. Este efecto es el resultado del color oscuro del pericarpio de la semilla del girasol que tiene acumulación de fitome-lanina (Franchini y Hernández 2006), lo que aumentaría la absorción efectiva de UV-C. En las variables de LMP y LMR la soya tuvo los mayores valores. En la LMP se encontró una tendencia de disminuir con el aumento de la dosis de UV-C. Al respecto Magerøy *et al.* (2010) encontraron que las respuestas a la UV-C fueron mediadas de forma parcial por las fototropinas. Mientras que la LMR no mostró respuesta frente a la irradiación en la soya y el trigo pero sí tuvo respuesta positiva frente a la dosis de UV-C en las semillas de girasol. Al respecto Zhang *et al.* (2008) reportaron resultados similares con pretratamientos químicos. Lo que es un indicador del potencial del uso de la radiación UV-C como pretratamiento físico de las semillas.

El PF y PS fueron distintos entre las tres especies, siendo mayor en la soya, mientras que el PS fue mayor en la soya (Tabla 3). Las diferencias del PF y PS pueden deberse a las diferencias intrínsecas en las semillas. Es difícil elucidar el porqué solo una de las especies mostró respuesta en el PF y PS frente a las diferentes dosis de UV-C, tal vez sea un efecto que tenga que ver con los cambios en los potenciales de las membranas, por la presencia de los radicales libres generados por la irradiación (Kacharava *et al.* 2009).

Prueba de envejecimiento acelerado

La PEA al igual que la PGE mostró diferencias entre las especies. La PEA es una prueba que muestra la capacidad de la semilla para germinar y establecerse bajo condiciones adversas, por lo que la condición de alta temperatura y humedad relativa es un desencadenante de estrés oxidativo y de la desnaturalización de proteínas y membranas (Walters *et al.* 2005; Kotak *et al.* 2007). En el vigor, germinación, LMR, PF y PS la soya mostró los

Tabla 4. Análisis de varianza para la prueba de envejecimiento acelerado en semillas de soya, trigo y girasol.

Table 4. Variance analysis of the accelerated aging test in soybean, wheat and sunflower seeds.

FV	GL	vigor %		Ger %		PN		PA	
Trat	11	51.0785	**	47.2149	**	466.8939	**	48.7398	**
Dosis	3	5.2326	ns	7.1215	ns	37.0277	**	7.8185	**
ESPP	2	248.7916	**	236.0104	**	2486.3854	**	253.611	**
Dosis x									
ESPP	6	8.0972	ns	4.3298	ns	8.6631	*	0.9098	ns
Error	84	4.7872		4.1294		4		1.493	
C.V.		10.0260		9.3654		22.3255		30.1569	
Media		21.8229		21.6979		8.9583		4.0517	

Vigor % =Vigor germinativo, Ger %=Capacidad de germinación (%), Plántulas normales (PN), Plántulas anormales (PA). Letras diferentes en columnas indican diferencias significativas de acuerdo con Tukey (p < 0.05).

Tabla 4. Continúa.

Table 4. Continue.

FV	SSG	LMP		LMR		PF		PS		
Trat	384.178	**	27.6695	**	305.6521	**	88.5364	**	1.4211	**
Dosis	52.5694	**	4.5381	ns	12.383	ns	9.3283	*	0.1482	**
ESPP	2006.3854	**	130.4479	**	1642.4934	**	459.7394	**	7.2943	**
Dosis x										
ESPP	9.2465	ns	4.9756	*	6.6728	ns	4.4062	ns	0.0999	*
Error	5.75		2.4032		10.6927		3.2371		0.0357	
C.V.	19.0247		57.4609		28.6698		44.7318		44.977	
Media	12.6041		2.6979		11.4056		4.0221		0.4206	

Semilla sin germinar (SSG), Longitud media de plúmula (LMP), Longitud media de radícula (LMR), Peso fresco (PF) y Peso seco (PS). Letras diferentes en columnas indican diferencias significativas de acuerdo con Tukey (p < 0.05).

Tabla 5. Comparaciones múltiples de las medias de las variables determinadas en la prueba de envejecimiento acelerado.

Table 5. Multiple comparisons of the variable means in the accelerated aging test in soybean, wheat, and sunflower seeds.

Especie	Tratamiento	Vigor % (Pc)	Ger % (Sc)	PN (%)	PA (%)	SSG (%)	LMP (cm)	LMR (cm)	PF (g)	PS (g)
Soya	Testigo	99.5 ^a	954 ^{ab}	34 ^c	61 ^a	5 ^{cd}	5.61 ^{ab}	17.3 ^{ab}	9.6 ^a	1.10 ^{ab}
	D. mín.	99.0 ^a	96 ^{ab}	24.48 ^c	71.48 ^a	4 ^{cd}	3.62 ^b	16.1 ^{ab}	6.8 ^a	0.77 ^c
	D. máx.	97.5 ^{ab}	98 ^{ab}	36 ^c	62 ^a	2 ^{cd}	5.16 ^{ab}	18.6 ^a	9.4 ^a	1.16 ^a
	DL50	99.5 ^a	99 ^a	23.48 ^c	75.48 ^a	1d	3.99 ^b	16.8 ^{ab}	7.2 ^a	0.79 ^{bc}
Trigo	Testigo	87.0 ^{abc}	87.5 ^{abc}	84.48 ^a	3 ^c	12.48 ^{bcd}	7.01 ^a	13.4 ^{ab}	2.7 ^b	0.28 ^d
	D. mín.	84.5 ^c	86.5 ^{abc}	72.48 ^{ab}	14.48 ^{bc}	12.48 ^{bcd}	6.20 ^a	12.6 ^b	2.5 ^b	0.23 ^d
	D. máx.	92.0 ^{abc}	93.5 ^{ab}	74 ^{ab}	19 ^{bc}	7 ^{cd}	6.83 ^a	13.7 ^{ab}	2.7 ^b	0.25 ^d
	DL50	820.0 ^{cd}	84.5 ^{bc}	64.48 ^b	20 ^b	15.48 ^{bc}	6.16 ^a	14.3 ^{ab}	2.5 ^b	0.2 ^d
Girasol	Testigo	69.5 ^d	70 ^d	8.48 ^d	61.48 ^a	30 ^a	1.49 ^c	5.2 ^c	1.5 ^b	0.05 ^d
	D. mín.	77.5 ^{cd}	78 ^{cd}	4.48 ^d	73.48 ^a	22 ^{ab}	0.71 ^c	2.4 ^c	0.83 ^b	0.02 ^d
	D. máx.	80.0 ^{cd}	77 ^{cd}	4.00 ^d	73 ^a	23 ^{ab}	1.05 ^c	3.1 ^c	1.06 ^b	0.05 ^d
	DL50	79.5 ^{cd}	76.5 ^{cd}	3.48 ^d	73 ^a	23.12 ^{ab}	0.75 ^c	2.7 ^c	0.89 ^b	0.05 ^d

Vigor % =Vigor germinativo, Ger %=Capacidad de germinación (%), Plántulas normales (PN), Plántulas anormales (PA), Semilla sin germinar (SSG), Longitud media de plúmula (LMP), Longitud media de radícula (LMR), Peso fresco (PF) y Peso seco (PS). Pc= Primer conteo; Sc= Segundo conteo. Letras diferentes en columnas indican diferencias significativas de acuerdo con Tukey (p < 0.05).

Tabla 6. Valores del cambio porcentual observado entre los valores de las diferentes variables al comparar la prueba de envejecimiento acelerado versus la prueba de germinación estándar.

Table 6. Percent change values observed between the different variables when comparing the accelerated aging test versus the standard germination test.

Especie	Tratamiento	Vigor % (Pc)	Ger % (Sc)	PN (%)	PA (%)	SSG (%)	LMP (cm)	LMR (cm)	PF (g)	PS (g)
Soya	Testigo	-0.5	-5.0	-60.7	+351.9	-	-64.3	-9.4	-66.1	-59.9
	D. mín.	-1.0	-4.0	-66.2	+159.9	-	-74.1	-13.9	-70.9	-65.8
	D. máx.	-2.5	-1.0	-51.7	+158.3	+100	-58.7	-1.6	-60.7	-47.5
	DL50	-0.5	+0.5	-66.5	+164.8	-33.3	-67.3	-16.4	-68.4	-63.3
Trigo	Testigo	-9.8	-8.9	-7.7	-50.0	+256.6	-18.6	-4.3	-18.2	-12.5
	D. mín.	-14.2	-10.8	-10.5	-9.5	+316.0	-20.5	-13.1	-13.8	-17.9
	D. máx.	-7.1	-5.1	-10.8	+31.0	+366.7	-11.8	-6.8	-12.9	-19.4
	DL50	-16.8	-14.6	-18.9	+5.3	+1448.0	-24.3	-0.7	-16.7	-31.0
Girasol	Testigo	-4.8	+2.2	-78.3	+108.4	-4.8	-79.8	-53.6	-83.8	-88.1
	D. mín.	0	+4.0	-89.1	+116.1	-12.0	-90.5	-82.9	-91.4	-95.3
	D. máx.	+3.2	+6.2	-89.2	+102.8	-16.4	-83.7	-81.1	-88.6	-86.1
	DL50	+1.9	+10.9	-86.6	+65.9	-25.4	-83.9	-77.9	-82.5	-73.7

Vigor % =Vigor germinativo, Ger %=Capacidad de germinación (%), Plántulas normales (PN), Plántulas anormales (PA), Semilla sin germinar (SSG), Longitud media de plúmula (LMP), Longitud media de radícula (LMR), Peso fresco (PF) y Peso seco (PS). Pc= Primer conteo; Sc= Segundo conteo.

promedios más altos. Mientras que el trigo tuvo el mayor valor de PN, en cuanto a la PA la soya y el girasol no mostraron diferencias pero fueron mayores al trigo. En cambio en la SSG el girasol mostró los mayores valores. Para la LMP la especie menos afectada por la condición de estrés fue el trigo. Las respuestas descritas derivan de factores intrínsecos de las semillas, así como su composición en el contenido de lípidos y de antioxidantes. Se sabe que los lípidos en las semillas son sensibles a la peroxidación en presencia de radicales libres (Kacharava *et al.* 2009; Baud y Lepiniec 2010). Esto pudiera explicar en parte la mayor cantidad de PA y SSG en las semillas de girasol.

Cambio observado entre la PGE y PEA

Las condiciones de alta temperatura y humedad de la PEA disminuyeron el vigor y germinación en la soya y el trigo, este último exhibió menos vigor y germinación después de la PEA al compararlo con la PGE. En cuanto al efecto positivo de la aplicación de la radiación UV-C en el girasol y la soya, puede deberse al mecanismo de tolerancia inducido por la irradiación, que puede estar relacionado con la acción de antioxidantes (Kacharava *et al.* 2009) en particular flavonoides que se

mantienen activos en las semillas (Choudhury y Mandi 2012).

En cuanto a las PN el efecto negativo de la alta temperatura y humedad de la PEA fue alto en la soya y el girasol, siendo amplificado este cambio negativo de 6 a 8 % al irradiar las semillas con UV-C. En el caso del trigo este fue menos sensible a las condiciones de la PEA, pero la aplicación de UV-C aumentó la respuesta negativa en esta variable. Esta respuesta diferencial se puede atribuir a la composición de lípidos de las tres especies (Kacharava *et al.* 2009, Baud y Lepiniec 2010) e indica que la aplicación de UV-C contribuyó de forma negativa al estrés inducido.

El aumento en el número de SSG en la soya y el trigo bajo la PEA puede ser resultado del incremento del estrés oxidativo en los tejidos (Kacharava *et al.* 2009), la disminución en las SSG en el girasol pudiera parecer positiva, pero en realidad lo que ocurrió fue que la disminución de SSG originó mayor cantidad de PA. Del mismo modo, la disminución en la LMP, LMR, PF y PS se puede deber a la inducción de estrés en la PEA (Walters *et al.* 2005; Kotak *et al.* 2007).

En la PGE las variables de vigor, germinación, SSG, PN, PF y PS no mostraron respuesta a la

irradiación con UV-C, con excepción de la PN, PF y PS en la soya que mostraron respuesta negativa. La PA incrementó de acuerdo con el aumento con la dosis de UV-C, mientras que la LMP disminuyó con la irradiación. La LMR no cambió al aplicar las diferentes dosis de UV-C salvo en el girasol en donde mostró respuesta positiva frente a la UV-C.

CONCLUSIONES

Al examinar el cambio porcentual observado entre los valores de las variables en la PGE y la PEA, se encontró un efecto positivo de la radiación UV-C en las variables de vigor y germinación en girasol y soya. En las variables PN, LMP, LMR, PF y PS el efecto de la PEA fue negativo en las tres especies. Sin embargo, la exposición al estrés en la PEA incrementó el número de PA y SSG.

LITERATURA CITADA

- Andrade-Cuvi MJ, Moreno-Guerrero C, Henríquez-Bucheli A, Gómez-Gordillo A, Concellón A (2010) Influencia de la radiación UV-C como tratamiento postcosecha sobre carambola (*Averrhoa carambola* L.) mínimamente procesada, almacenada en refrigeración. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha* 11: 18-27.
- Baud S, Lepiniec L (2010) Physiological and developmental regulation of seed oil production. *Progress in Lipid Research* 49: 235-249.
- Brown JE, Lu TY, Stevens C., Khan VA, Lu JY, Wilson CL, Collins DJ, Wilson MA, Igwegbe ECK, Chalutz E, Droby S (2001) The effect of low dose ultraviolet light-C seed treatment on induced resistance in cabbage to black rot (*Xanthomonas campestris* pv. *campestris*). *Crop Protection* 20: 873-883.
- Choudhury SS, Mandi SS (2012) Natural ultra violet radiation on field grown rice (*Oryza sativa* L.) plants confer protection against oxidative stress in seed during storage under subtropical ambience. *Environment & Pollution* 1: 21-32.
- Costa L, Vicente AR, Civello PM, Chaves AR, Martínez GA (2006) UV-C treatment delays postharvest senescence in broccoli florets. *Postharvest Biology and Technology* 39: 204-210.
- Franchini MC, Hernández LF (2006) Las ceras en el aceite de girasol (*Helianthus annuus* L.). Su origen y desarrollo en el fruto. *Aceites y grasas* 64: 476-484.
- International Seed Testing Association (1999) International rules for seed testing 1999. *Seed Science and Technology* 27, Supplement. Handbook of vigor test methods. 2nd Ed. Zurich. 117 p.
- Kacharava N, Chanishvili Sh, Badridze G, Chkhubianishvili E, Janukashvili N (2009) Effect of seed irradiation on the content of antioxidants in leaves of Kidney bean, Cabbage and Beet cultivars. *Australian Journal of Crop Science* 3: 137-145.
- Kanash EV, Savin VN (1991) The sensitivity of agricultural plants to short-term UV-stress. *Kosmicheskaia Biologiia i Aviakosmicheskaia Meditsina* 25: 18-20.
- Kotak S, Larkindale J, Lee U, von Koskull-Döring P, Vierling E, Scharf KD (2007) Complexity of the heat stress response in plants. *Current Opinion Plant Biology* 10: 310-316.
- Luckey TD (1980) *Hormesis with ionizing radiation*. CRC Press, Boca Raton, FL, USA. 222 p.
- Magerøy MH, Kowalik EH, Folta KM, Shinkle J (2010) Evidence of physiological phototropin1 (phot1) action in response to UV-C illumination. *Plant Signaling and Behavior* 5: 1204-1210.
- Márquez-Villacorta L, Pretell-Vásquez C (2013) Irradiación UV-C en frutas tropicales mínimamente procesadas. *Scientia Agropecuaria* 4: 147-161.

- Moreno ME (1996) Análisis físico y fisiológico de semillas agrícolas. Tercera edición, UNAM. Ciudad Universitaria, México, D.F. 393 p.
- Promyou S, Supapvanich S (2012) Effect of ultraviolet-C (UV-C) illumination on postharvest quality and bioactive compounds in yellow bell pepper fruit (*Capsicum annuum* L.) during storage. *African Journal of Agricultural Research* 7: 4084-4096.
- Rastogi RP, Kumar A, Tyagi MB, Sinha RP (2010) Molecular mechanisms of ultraviolet radiation-induced DNA damage and repair. *Journal of Nucleic Acids* 2010: 592980.
- Rivera-Pastrana DM, Gardea-Bejar AA, Martínez-Tellez MA, Rivera-Domínguez M, González-Aguilar GA (2007) Efectos Bioquímicos postcosecha de la irradiación UV-C en frutas y hortalizas. *Revista Fitotecnia Mexicana* 30: 361-372.
- Ruiz-López GA, Qüesta AG, Rodríguez S del C (2010) Efecto de luz UV-C sobre las propiedades antioxidantes y calidad sensorial de repollo mínimamente procesado. *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha* 11: 101-108.
- Sarghein SH, Carapetian J, Khara J (2011) The effects of UV radiation on some structural and ultrastructural parameters in pepper (*Capsicum longum* A.DC.). *Turkish Journal of Biology* 35: 69-77.
- SAS Institute Inc. (2004) SAS/STAT[®] 9.1 User's Guide. Cary, NC USA. 5136p.
- Torres M, Frutos G, Duran JM (1991) Sunflower seed deterioration from exposure to UV-C radiation. *Environmental Experimental Botany* 31: 201-207.
- Walters C, Wheeler LM, Grotenhuis JM (2005) Longevity of seeds stored in a gene bank, species characteristics. *Seed Science Research* 15: 1-20.
- Zhang H, Hu LY, Hu KD, He YD, Wang SH, Luo JP (2008) Hydrogen sulfide promotes wheat seed germination and alleviates oxidative damage against copper stress. *Journal of Integrative Plant Biology* 50: 1518-1529.