

## Aplicación de Campos magnéticos (CM) y su relación con la recuperación de la viabilidad y vigor en semillas envejecidas de *Lactuca sativa* L.

Application of magnetic fields (CM) and their relationship with recovery viability and vigor in aged seeds of *Lactuca sativa* L.

Acuña, R.<sup>a\*</sup>, Naguelquin, F.<sup>a</sup>, García, F.<sup>b</sup>, Torres, J.<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Austral de Chile, Chile.

<sup>b</sup> Lab. de Electrofísica Aplicada a la Agricultura, Universidad de Ciego de Avila, Cuba.

<sup>c</sup> Grupo de Investigación en Campos Electromagnéticos, Medioambiente y Salud Pública Universidad de Caldas, Manizales, Colombia.

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 13.08.2018

Accepted 18.02.2019

#### Keywords:

Magnetic fields

Aged seed

*Lactuca sativa*

Viability

Germination

Original Research Article,  
Crop Science

#### \*Corresponding author:

Rodrigo Acuña

E-mail address:

[rodrigoacuna@uach.cl](mailto:rodrigoacuna@uach.cl)

### ABSTRACT

Seed conditioning is a practice used to enhance the viability and vigor of the seeds in crops. The invigorating classical methodologies are environmentally questioned and complex, therefore their use has been abandoned with the consequent loss of their benefit. In order to evaluate a novel and environmentally sustainable technique, the effects of the application of uniform Magnetic Fields (CM) were studied on the viability and vigor of lettuce seeds previously aged rapidly (24, 48 and 72 h, 100% RH, 35 °C), in doses of 0, 6.4 and 25.5 kJ m<sup>-3</sup> s. Germination and its quality parameters were studied in four replicates (Test t, p < 0.05). Maximum germination (G<sub>max</sub> %), Germination Mean Time (TMG, h) and Vigor I (VI), among others, were evaluated. The variables and their sublevels were compared using the t test for G<sub>max</sub> and TMG. For VI, the variables aging and magnetic induction were analysed through ANOVA (p < 0.05). The parameters evaluated and the interactions between them were mostly significant, showing the effectiveness of the CMs on the quality variables. TMG was one of the variables that showed one of the most marked responses, with 13.5% less germination time respect to the control. In general, the seeds treated with CM were positively and significantly affected in all their quality parameters, which showed that magnetic induction can be used to reverse seminal deterioration processes.

### RESUMEN

El acondicionamiento de semillas es una práctica para potenciar la viabilidad y el vigor de las mismas en cultivos. Las metodologías clásicas vigorizantes son ambientalmente cuestionadas y complejas, por lo que se ha abandonado su uso con la pérdida del beneficio. Con el fin de evaluar una técnica novedosa y ambientalmente sostenible, se estudiaron los efectos de la aplicación de Campos Magnéticos (CM) uniformes sobre la viabilidad y el vigor de semillas de lechuga en dosis de 0; 6,4 y 25,5 kJ m<sup>-3</sup> s las que previamente fueron envejecidas aceleradamente (24, 48 y 72 h, 100% HR; 35 °C). La germinación y sus parámetros de calidad se estudiaron en cuatro réplicas (Test de t, p < 0,05). Se evaluó la Germinación máxima (G<sub>max</sub> %), Tiempo Medio de Germinación (TMG, h) y el Vigor I (VI), entre otros. Los factores y sus subniveles fueron comparados utilizando el Test de t para G<sub>max</sub> y TMG. Para VI, los factores envejecimiento e inducción magnética se analizaron a través de ANOVA (p < 0,05). Los parámetros evaluados, y las interacciones entre ellos fueron en su mayoría significativos, constando la efectividad de los CM sobre las variables de calidad. TMG fue una de las variables que mostró una de las respuestas más marcadas, con un 13,5% menos del tiempo de germinación comparado al control. En general, las semillas tratadas con CM fueron afectadas positiva y significativamente en todos sus parámetros de calidad, lo que demostró que la inducción magnética puede ser una herramienta para revertir procesos de deterioro seminal.

**Palabras clave:** Campos magnéticos, semillas envejecidas, *Lactuca sativa*, viabilidad, vigor.

### INTRODUCCIÓN

El éxito de la expresión de las semillas en post-siembra depende en gran medida de su calidad, la que se evalúa por la adaptabilidad, resistencia o tolerancia a determinadas condicionantes de suelo o clima

que afectan la germinación (Parera y Cantliffe, 1994; ODEPA, 2002; FAO, 2011). Lo anterior caracteriza al vigor de las mismas (Donato *et al.*, 1990), el que se define como la suma de las propiedades directas e indirectas que determinan la actividad y el comportamiento de un lote de semillas con aceptable

nivel germinación en un amplio rango de ambientes (ISTA, 2010).

En las semillas, el vigor se pierde incluso estando en las mejores condiciones de almacenamiento (Zhao *et al.*, 2018). En esta instancia, la viabilidad decae hasta niveles inaceptables en tiempos variables lo que implica la necesidad de renovación constante del lote de semillas, lo que es de cuidado para agricultores, bancos de germoplasma y la industria asociada (Walters *et al.*, 2005). En otras palabras, la pérdida de vigor o envejecimiento conducirá a plantas más vulnerables al estrés medioambiental (Ellis, 1989; Osburn y Schroth, 1989) o, por el contrario, cuando se le conserva o recupera, puede mantener o mejorar la germinación y el desarrollo de la plántula en favor del cultivo final (Roberts y Osei-Bonsu, 1988; Powell, 2009; Ghassemi-Golezani *et al.*, 2011).

Dada la importancia de mantener el vigor en semillas tan alto como sea posible, se deben minimizar al mismo tiempo los factores que promueven cambios físico-químicos y biológicos sobre de deterioro, envejecimiento o desvigorización de las mismas. Por ejemplo, se menciona a la temperatura y a la humedad ambiental de almacenamiento como los factores más importantes que afectan la fisiología y la expresión de calidad de la semilla (Robledo, 1986), pero otros autores han cuestionado lo anterior argumentando que sería más importante la concentración de oxígeno en la atmósfera de almacenamiento la principal causa de desvigorización, ya que promovería oxidaciones que atentarían contra el embrión (Groot *et al.*, 2015).

Para enfrentar la desvigorización, aparte de considerar las condiciones de almacenamiento, durante las últimas décadas se han desarrollado y usado técnicas acondicionadoras en semillas que son de tipo: a) químico, b) térmico, c) biológico y, d) físico, destacando en estos últimos los Campos Magnéticos (CM) (Bose *et al.*, 2018). En general estas técnicas intervienen en la mejora del vigor (tasa y uniformidad de emergencia) para muchos cultivos anuales y hortícolas, utilizándose el término *priming* ("cebado") desde inicios de los '70 para referirse a estos efectos (Parera y Cantliffe, 1994). La eficacia de la técnica de *priming* depende en gran medida de las especies/genotipos de las plantas, los parámetros morfológicos y fisiológicos de las semillas, así como de sus propias características. El problema con el acondicionamiento tradicional más común, el químico (*osmopriming*), es su dificultad para el uso a gran escala principalmente de cereales y hortalizas dado por lo complejo que resulta el tratamiento (Murungu *et al.*, 2004), pudiendo en ocasiones tener un impacto adverso en el medio ambiente (Dutta, 2018), afectando de paso el tiempo potencial de almacenamiento de las semillas tratadas (Tarquis y Bradford, 1992), el que se reduce en general a entre uno y seis meses, complicando por lo tanto su guarda, manejo y comercialización (Ozby, 2018).

## Protocolos para evaluar la calidad en semillas

Dada la importancia de la calidad de las semillas se han desarrollado diferentes protocolos para evaluar la viabilidad y vigor de las mismas (Contreras y Barros, 2005). Una de las formas de determinar la viabilidad es mediante la capacidad de germinación (%) en condiciones parametrizadas, mientras que el vigor puede ser evaluado por la tasa de crecimiento de la radícula ( $\text{mm día}^{-1}$ ) o por medio del envejecimiento acelerado, que mide el desempeño de germinación (%) cuando las semillas son sometidas a condiciones de deterioro artificial muy rápido (35 a 45 °C durante períodos variables según la especie y alta humedad ambiental). En este último test, se consideran más vigorosos aquellos lotes de semillas que son capaces de producir un mayor número de plántulas normales. Otros protocolos de menor uso son ensayos de frío (desarrollo en temperaturas subóptimas), y de conductividad eléctrica, que relacionan alteraciones en las membranas celulares que implica un lixiviado de compuesto solubles desde las semillas (Pérez y Pita, 2001).

## Campo Magnético (CM) como acondicionador físico de semillas

El CM es un factor ambiental ineludible sobre la superficie de la tierra (Pietruszewski, 2014). Durante los procesos de evolución, todos los organismos vivos de la tierra han experimentado sus efectos, variando la magnitud del mismo desde cerca de cero a 67  $\mu\text{T}$  (micro Tesla) entre el ecuador y los polos, respectivamente (Galland y Pazur, 2005; Maffei, 2014). Algunos autores han relacionado el efecto del CM en la célula vegetal centrando sus trabajos en las membranas, en sus corrientes iónicas (Belyaev *et al.*, 1994; García *et al.*, 2001; Teodori *et al.*, 2005; Cakmak *et al.*, 2012; Bhardwaj *et al.*, 2012; Reddy *et al.*, 2012), en su material genético (Binhi, 2001; Miyakoshi, 2005), o en la morfogénesis asociada a la inducción magnética (Kuznetsov y Hasenstein, 1997; Tkalec *et al.*, 2009), entre otros. En semillas, se han publicado trabajos sobre mejoras en sus parámetros de calidad fisiológica en diferentes especies (Maffei, 2014).

Zhao *et al.* (2018), afirman que las técnicas de acondicionamiento permiten revertir en parte la desvigorización de las semillas, por lo que con una mirada de sustentabilidad parece interesante incorporar estas *Aplicaciones Fundamentales de la Física* a la Agricultura (García y Martín, 2008) por medio del uso de CM, los que presentan como ventajas el nulo impacto medioambiental durante y postratamiento, bajo costo, sencillez de aplicación, posibilidad de ser utilizado en grandes volúmenes y sobre todo, que mantiene la vida útil de la semilla después de la inducción magnética (Bilalis *et al.*, 2012), ya que a diferencia del *osmopri-*

ming, no induce la pregerminación o germinación del embrión mientras no comience la imbibición.

Se ha reportado que el uso de CM intensos (>1 mT, *miliTesla*) mejora el vigor en semillas (Yaldagard, 2008; Hołubowicz *et al.*, 2014; Baser-Kouchebagh, 2014; Shekari, 2015; Bose *et al.*, 2018). En general, se ha observado un incremento en la tasa de germinación en semillas de especies importantes para la agricultura manteniéndose estos efectos vigorizantes durante el ciclo del cultivo (Wyjck, 1995; Nedialkov *et al.*, 1996; De Souza *et al.*, 1999; Carbonell *et al.*, 2000; Aladjadjyan, 2002; Soltani *et al.*, 2006; Flórez *et al.*, 2007; Poinapen *et al.*, 2013). En semillas de trigo mejoró la velocidad de germinación (Wyjck, 1995). En soya se observó una mejora en la tasa de absorción de agua, masa e índice de vigor (Shine *et al.*, 2011), destacando un aumento en la capacidad de adsorción de agua en la pared (Socorro *et al.*, 2013; Torres *et al.*, 2018).

Debido a la importancia de la lechuga (*Lactuca sativa* L.) a nivel mundial (1.223.407 ha, FAO, 2015), el presente estudio tuvo por objetivo evaluar el efecto de la exposición de semillas de lechuga avejentadas artificialmente bajo diferentes niveles de inducción de CM uniformes como técnica física de acondicionamiento o recuperación del vigor del material seminal deteriorado.

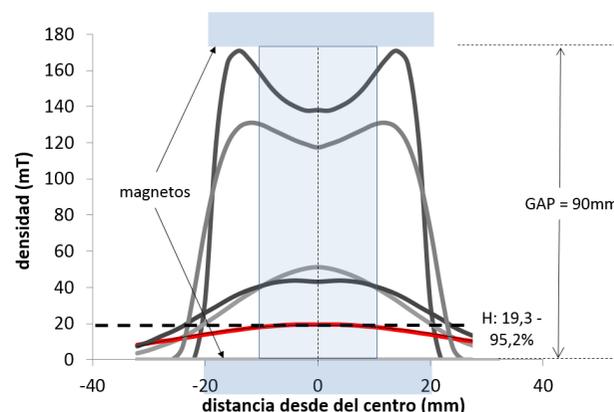
## MATERIALES Y MÉTODOS

Para llevar a cabo el experimento se utilizaron semillas de lechugas (*Lactuca sativa* L.) cv Trocadero Ribera (Fitó®) tipo mantecosas del año a las cuales se le aplicaron dos factores físicos. El primero, correspondió al envejecimiento acelerado (EA), que induciría deterioro en el vigor de la semilla, y el segundo, a la inducción o campo magnético (CM) que buscó promover la vigorización.

El EA se logró al disponer diferentes lotes de semillas por separado dentro de una placa Petri abierta ( $\varnothing=55$  mm; 14.2 mm de altura) sobre una rejilla al interior de un contenedor plástico de 1 L con 0.2 L de agua destilada para lograr una humedad atmosférica (HR) ~100%. La tapa del contenedor fue sellada con parafilm y se introdujo este recipiente en una estufa a  $35 \pm 0.5$  °C dejando allí por tiempos diferenciados (Li *et al.*, 1996; Contreras y Barros, 2005).

Una vez tratadas las semillas con EA, la dosis magnéticas se aplicaron a los sublotes de las mencionadas semillas (separadas previamente en pequeñas bolsas de papel), posicionándolas a tiempos variables entre dos magnetos de Neodimio ( $\varnothing=40$  mm; 0.25 T nominal) los cuales fueron dispuestos horizontalmente a una distancia determinada (Air-Gap= 90 mm, Wang *et al.*, 2003) para evitar la adhesión por atracción con ayuda de un cilindro no ferromagnético adaptado para tal efecto. Para asegurar la uniformidad de la dosis, el CM fue caracterizado posicionando los magnetos en

paralelo y midiendo la densidad magnética ( $\beta$ ) entre ellos enfrentando polos opuestos y registrando los valores de  $\beta$  con un teslametro (Mod. TM-801, Kanetec Co. Ltd., Japón) y una sonda de medición lateral (Mod. TM-801PRB, Kanetec Co. Ltd., Japón). La sonda fue desplazada sobre planos virtuales sucesivos y paralelos (cada dos mm) entre las caras de los imanes sobre dos líneas diametrales y perpendiculares entre si, las cuales coincidieron en el eje central de los magnetos para cada plano desde la cara superior del imán inferior hasta la cara inferior del otro superior (Figura 1). Los valores obtenidos fueron registrados con soporte del software asociado (TM-801Pro 1.0A, Kanetec Co. Ltd., Japón). Los datos permitieron determinar y caracterizar una red tridimensional del campo vectorial vertical de las líneas de flujo magnético. Se determinó que la mejor uniformidad del campo magnético (95,2%) fue lograda a una altura de 30 mm desde la base del imán inferior y con un radio de 10 mm con respecto al centro o eje del imán, lo que permitió obtener  $0,73 \text{ cm}^3$  uniformes con una intensidad de 19,3 mT. Mediciones posteriores en este volumen (V) arrojaron idénticos valores, el que al ser > 95%, fue considerado



**Figura 1.** Determinación de la homogeneidad del GAP. La figura muestra diferentes densidades magnéticas de acuerdo a la altura del plano de medición y su desviación desde el centro del magneto. La variación transversal se da por la desuniformidad en la fabricación del magneto. En línea roja se observa la variación cuando la medición se dispone a 30 mm desde la cara superior del imán inferior. La línea punteada horizontal determina la base del espacio útil de uso con radio de 10 mm.

**Figure 1.** Homogeneity GAP determination. The figure shows different magnetic densities according to height of the measurement plane and their deviation from the center of the magnet. The transverse variation is due to the disuniformity in the manufacture of the magnet. The red line shows the variation when the measurement is set to 30 mm from the upper face of the lower magnet. The horizontal dotted line determines the base of the useful space of use with 10 mm radius.

como uniforme. Las semillas fueron colocadas en V por tiempos variables en un plano alzado a 30 mm para obtener las dosis del ensayo (Kornarzynski y Pietruszewski, 1999), las que fueron establecidas en base a pruebas previas de germinación y literatura asociada (García y Pascual, 2001).

La combinatoria de cuatro niveles de envejecimiento (0; 24; 48 y 72 h) y tres de Dosis Magnéticas (0; 6,4; 25,5) originaron 12 tratamientos (Tabla 1). Cada tratamiento se ejecutó utilizando los sublotes antes individualizados que habían recibido independientemente la aplicación de los factores, dando origen a cuatro réplicas o placas Petri (Ø 90 mm, 95-100% HR), que fue considerada como la unidad experimental. Cada réplica contó con 50 semillas dispuestas a germinar sobre papel filtro de celulosa (Filter Lab, 516G) en cámara de cultivo (20 ± 0,1 °C; ISTA, 1985) durante seis días. Se definió a “0-0” como “control absoluto”, que correspondió a un lote de semillas que no recibió envejecimiento ni tampoco inducción magnética (Tabla 1).

La dinámica de germinación se determinó mediante fotografía *Time-Lapse* registrando una imagen cada 30 min con una cámara digital (Powershot SX120, Cannon, JP) la cual fue ubicada dentro de la cámara de germinación. Los valores de germinación fueron corregidos de acuerdo al modelo de Hill para dinámicas sinusoidales en semillas (El-Kassaby et al., 2008), desde donde se obtuvieron los parámetros de vigor comparativos: Germinación máxima ( $a = G_{max}$  %) o Máxima germinación acumulada; índice entre inicio y germinación máxima ( $b$ , cuanto mayor es el parámetro  $b$ , más pronunciado es el ascenso hacia la asíntota  $a$ , y menor es el tiempo entre el inicio de la germinación y la máxima germinación); nivel de activación medio máximo ( $c = T_{50}$ , h); uniformidad de germinación ( $U_{60-40}$ , h); el tiempo medio de germinación del lote estudiado (TMG) y el tiempo de germinación para diferentes porcentajes ( $T_1, T_{10}, T_{25}, T_{90}$ , h).

### Análisis estadístico

El diseño experimental para los parámetros germinativos analizó todos los tratamientos comparados todos entre sí por medio del Test de  $t$  ( $p < 0,05$ ), estudiando además las medias de los factores para el Vigor I,  $V_i$  (Abdul-Baki y Anderson, 1973) en forma independiente por medio de ANOVA ( $p < 0,05$ ) que consideró los supuestos del mismo. Cuando se observaron diferencias estadísticamente significativas fueron sometidos a una prueba de separación de medias de Tukey ( $\alpha = 0,05$ ). El  $V_i$  se analizó en peso fresco con ayuda de los modelos corregidos de germinación de la función de Hill (El-Kassaby et al., 2008) de acuerdo a:

$$\text{Vigor I } (V_i) = \text{largo radícula (cm)} \times \text{germinación (\%)} \quad (\text{Abdul-Baki y Anderson, 1973})$$

Los datos fueron contrastados estadísticamente con ayuda del software Statgraphics Centurion XVI®.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Germinación

Germinación máxima ( $G_{max}$ ): Las Figuras 2A y 2B muestran las dinámicas germinativas medias corregidas por el modelo de Hill de los factores envejecimiento e inducción magnética. Para esta variable, no se observaron diferencias significativas entre los factores EA ni Dosis notándose en general valores mayores al 95% para  $G_{max}$  (Tabla 2), esta condición pudo deberse al alto vigor de las semillas utilizadas en el ensayo, y a que también el nivel de temperatura aplicado en el envejecimiento (35 °C) pudo no ser el más adecuado para inducir el desgaste fisiológico esperado para las semillas que fueron sometidas a mayor nivel de estrés (48 o 72 h). Cabe destacar que los datos corresponden a las medias de las interacciones, lo que habría enmascarado resultados más concretos. Sin embargo, al ana-

**Tabla 1.** Combinatoria de tratamientos físicos de EA y CM aplicados a semillas. Cada combinatoria contó con cuatro réplicas siendo esta una placa Petri, la cual a su vez, contó con 50 semillas. La combinatoria “0-0” se entiende como control absoluto, la cual no recibió EA ni Dosis magnética.

**Table 1.** Physical treatments combinatory for EA and CM applied to seeds. Each combinatory had four replicas, this being a Petri dish which in turn had 50 seeds. The “0-0” combinatory was an absolute control, which did not receive EA or magnetic dose.

		Envejecimiento acelerado (EA), horas (h)			
		0	24	48	72
Dosis Magnética (kJ m <sup>-3</sup> s)	0	0 - 0	24 - 0	48 - 0	72 - 0
	6,4	0 - 6,4	24 - 6,4	48 - 6,4	72 - 6,4
	25,5	0 - 25,5	24 - 25,5	48 - 25,5	72 - 25,5

lizar cada combinatoria por separado (EA x Dosis), se distinguen tendencias en los envejecimientos mayores aunque no todas significativas y que muestran el comportamiento esperado (menor germinación) después del estrés dado por el tratamiento de envejecimiento con una capacidad germinativa para el control absoluto (0-0) de 98,5 vs. 89,0; 96,0 y 95,0% para 24, 48 y 72 h de EA, respectivamente (Tabla 2).

Siguiendo con  $G_{max}$  y respecto a las dosis del CM, tampoco se observaron diferencias estadísticas dentro del factor, donde se esperaban resultados más favora-

bles a los CM más altos, pero al igual que lo anterior, esto estaría dado por la variabilidad otorgada por las medias del factor EA y el vigor original de las semillas. Sin embargo para este caso, el estudio de la interacción muestra leves variaciones en las tendencias con comportamiento no directamente lineal asociado al aumento del estrés térmico y/o al aumento de las dosis magnéticas. Para la  $G_{max}$  llama la atención la diferencia significativa lograda con la interacción EA-CM: 24-6,4, donde se observó un 99,5% de germinación que resultó estadísticamente diferente con respecto a

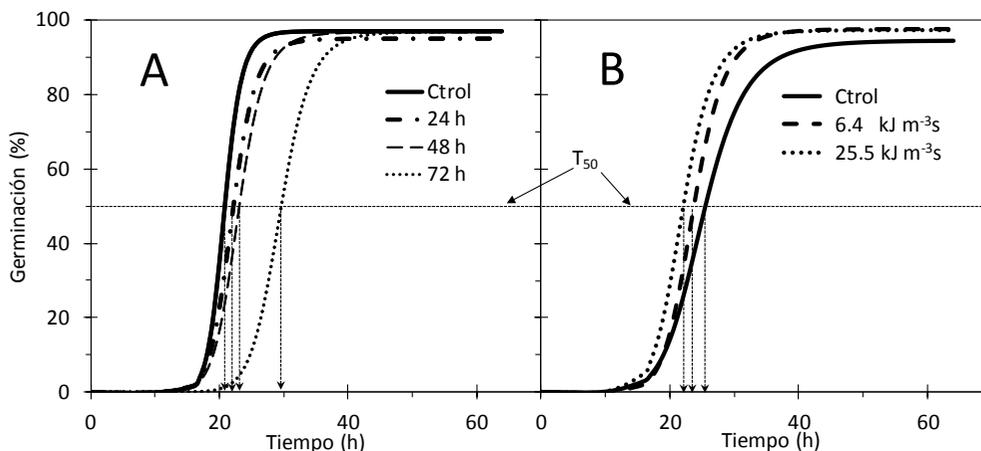
**Tabla 2.** Variables de germinación para semillas de lechuga como respuesta al envejecimiento acelerado y exposición a Campos Magnéticos ( $G_{max}$ : Germinación máxima; a: Porcentaje de germinación acumulativo máximo; b: Parámetro matemático, cuanto mayor es el valor, menor es el tiempo desde inicio germinación a  $G_{max}$ ;  $T_{10} G_{max}$ : tiempo 10% germinación;  $T_{50} G_{max}$ : tiempo 50% germinación;  $U_{84-16}$ : Uniformidad de Germinación (tiempo) entre el 60 y 40%;  $T_1, T_{10}, T_{25}, T_{50}, T_{75}, T_{90}$ : tiempo para que germine el 1, 10, 25, 50, 75 y 90% del total de semillas estudiadas. Letras diferentes indican diferencias significativas ( $\alpha = 0,05$ ) entre las medias de los factores y sus combinatorias.

**Table 2.** Germination variables for lettuce seeds in response to accelerated aging and exposure to Magnetic Fields ( $G_{max}$ : Maximum germination, a: Percentage of maximum cumulative germination, b: Mathematical parameter, the higher the value, the shorter the time from germination start to  $G_{max}$ ;  $T_{10} G_{max}$ : time 10% germination,  $T_{50} G_{max}$ : time 50% germination,  $U_{60-40}$ : Uniformity of Germination (time) between 60 and 40%;  $T_1, T_{10}, T_{25}, T_{50}, T_{75}, T_{90}$ : germination time for 1, 10, 25, 50, 75 and 90% of total seeds studied. Different letters indicate significant differences ( $\alpha = 0.05$ ) between the factors means and their combinatories.

	Tto	Variables de germinación					T(h) para germinación del 1, 10, 25, 75 y 90%				
		a= $G_{max}$ (%)	b	c= $T_{50}$ (h)	$U_{60-40}$ (h)	TMG (h)	$T_1$	$T_{10}$	$T_{25}$	$T_{75}$	$T_{90}$
EA (h)	Ctrol	97,3 a	16,1 b	20,8 a	4,36 a	20,9 a	15,8 a	18,3 a	19,5 a	22,4 a	24,4 a
	24	95,0 a	12,9 ab	22,0 b	5,82 b	22,3 b	16,7 a	19,4 ab	20,8 b	24,5 b	27,7 a
	48	96,8 a	12,0 a	23,1 b	6,46 b	23,5 b	16,9 a	19,9 b	21,5 b	25,6 c	28,6 b
	72	97,0 a	13,2 ab	29,4 c	7,64 b	30,1 c	24,2 b	26,9 c	28,3 c	32,3 d	35,7 c
Dosis ( $kJm^{-3}s$ )	Ctrol	94,6 a	7,7 a	25,1 c	2,65 b	26,0 c	20,3 c	23,0 c	24,5 c	29,9 c	37,0 c
	6,4	97,7 a	10,0 b	23,6 b	1,93 a	24,1 b	18,2 b	20,9 b	22,3 b	26,6 b	30,2 b
	25,5	97,2 a	9,4 b	22,0 a	1,90 a	22,5 a	16,7 a	19,4 a	20,8 a	25,0 a	28,7 a
EA x Dosis	Ctrol abs 0-0	98,5 ab	18,9 b	20,8 a	0,91 a	20,8 a	16,4 ab	18,6 abc	19,7 a	22,2 a	23,8 a
	0-6,4	96,0 a	18,0 ab	21,1 a	1,00 ab	21,2 a	16,4 ab	18,8 abc	20,0 a	22,7 a	24,6 a
	0-25,5	97,5 ab	14,6 a	20,4 a	1,14 b	20,5 a	14,9 a	17,6 a	19,0 ab	22,2 a	24,2 a
	24-0	89,0 ab	16,7 b	24,3 b	1,18 b	24,7 b	18,6 bc	21,5 cd	23,0 cd	26,9 bc	**
	<b>24-6,4</b>	99,5 b	16,5 ab	21,4 a	1,10 abc	<b>21,6 a</b>	16,2 ab	18,7 abc	20,0 ab	22,9 ab	24,6 a
	24-25,5	96,5 ab	15,3 ab	20,8 a	1,12 abc	20,9 a	15,4 ab	18,1 ab	19,4 a	22,6 a	24,8 ab
	48-0	96,0 ab	16,5 ab	24,4 b	1,24 abc	24,7 b	18,2 ab	21,4 c	23,0 cd	26,9 cd	29,7 c
	48-6,4	97,5 ab	14,7 a	24,3 b	1,34 c	24,7 b	17,8 ab	21 bc	22,6 bc	26,4 cd	28,8 bc
	<b>48-25,5</b>	97,0 ab	13,9 a	20,4 a	1,21 bc	<b>20,6 a</b>	14,7 a	17,5 a	19,0 a	22,4 a	24,7 ab
	72-0	95,0 ab	25,2 c	33,5 d	1,09 ab	34,7 d	28,0 e	30,8 f	32,2 f	35,3 f	37,6 d
	72-6,4	98,0 a	20,8 bc	28,3 c	1,14 abc	28,9 c	22,7 d	25,5 e	26,9 e	29,9 e	31,8 c
	<b>72-25,5</b>	98,0 ab	25,6 abc	27,1 c	1,02 abc	<b>27,8 c</b>	22,7 cd	24,9 de	26,0 de	28,4 de	29,8 c

\*: Letras distintas en columna, indican diferencias significativas sólo dentro de cada sección coloreada ( $p < 0,05$ )

\*\* : Tratamiento no superó el 90% de germinación



**Figura 2.** Dinámica de germinación para los factores de envejecimiento e inducción magnética. A: Germinación media para envejecimiento de 24, 48 y 72 h. B: Germinación media para inducción magnética de 0 a 25,5  $\text{kJ m}^{-3}\text{s}$ . Línea media punteada indica el tiempo que tarda para que germine el 50% de las semillas.

**Figure 2.** Germination dynamics for the aging and magnetic induction variables. A: Average germination for 24, 48 and 72 h aging. B: Average germination for magnetic induction from 0 to 25.5  $\text{kJ m}^{-3}\text{s}$ . Medium dotted line indicates the time it takes for 50% of the seeds to germinate.

0-6,4 y 72-6,4, mientras que el resto de los tratamientos mostró desviaciones estandar altas en las unidades experimentales que invalidaron otras diferencias estadísticas. Una vez más, los resultados de germinación máxima no diferenciados estadísticamente, pudieron estar influenciados por el nivel de temperatura dados en tratamiento térmico (35 °C) que fue más bajo que los 41 a 45 °C recomendados por otros autores (Salinas *et al.*, 2001). Por esta razón, y ya que las semilla poseía un vigor alto (> 97%, Salinas *et al.*, 2001), no se habrían observado diferencias más consistentes, lo que es concordante con lo hallado por Hacisalihoglu *et al.* (1999), quienes sometieron semillas de lechuga a condiciones de envejecimiento, bajo 45 °C y 50% de HR durante 0, 7, 14 y 21 días observándose valores de germinación en todos los tratamientos en torno a 98%, lo cual estaría relacionado a la calidad genética y vigorosidad de las simientes, o a que el nivel de estrés por humedad no haya sido lo suficientemente alto.

**Índice b:** A mayor valor de *b*, menor es el tiempo desde inicio de germinación a  $G_{\text{máx}}$ . En el estudio de los factores por separado, las semillas sin EA presentaron los menores tiempos, diferenciándose EA48 significativamente en un 34,1% con respecto al control dando una idea del efecto de deterioro de la técnica del envejecimiento, mientras que para EA 24 y 72 h, los valores fueron no significativos pero con una tendencia de mostrar precisamente el deterioro al ser comparados con en el control. Lo anterior sugiere que el tratamiento de envejecimiento tuvo una interferencia parcial sobre el vigor en la germinación de este grupo de

semillas y probablemente pudo ser más concreto si el estrés hubiera sido mayor. Desde el punto de vista de la inducción magnética, el índice *b* muestra diferencias significativas a favor de los CM, los cuales para 6,4 y 25,5 superaron en un 28,9 y 22,0% al control. En general, el índice *b*, no es considerado dentro de las publicaciones u otros estudios, no existiendo por tanto puntos referenciales para alimentar esta discusión, pero el modelo de Hill, lo considera explícito en las dinámicas comparativas de germinación (El-Kassaby *et al.*, 2008). Siguiendo con el índice *b*, al observar la interacción de factores para cada uno de los tratamientos, sorprende observar al tratamiento 72-0 (y en general el lote tratado con EA = 72) con valor más alto y por tanto, como el tiempo más corto entre el inicio de la germinación y la  $G_{\text{máx}}$ , diferenciándose estadísticamente de todas las combinatorias con respecto al Control (0-0), 48-0 y 24-0. La razón de este comportamiento pudo ser dada por el menor porcentaje de humedad promedio del tratamiento EA72 (11,4%, Tabla 3) que supondría un diferencial de potencial hídrico ( $\Psi_w$ ) mayor (más negativo) en ese lote de semillas y por lo tanto existiese una mayor capacidad de absorción de agua. La explicación para que ocurriese lo anterior puede deberse a que las semillas de lechuga por su tamaño, y al igual que la mayoría de las hortalizas, presentan menores cantidades de reservas almacenadas y poseen por tanto, mayor propensión al deterioro (Panobianco y Filho, 2001). De esta manera, cuando fueron retiradas del estrés de envejecimiento y guardadas por 10 horas en bolsas plásticas para coordinar la ejecución múltiple del ensayo, se habrían estabilizado en la microatmósfera de

la bolsa pero no habrían tenido una estructura física de pared y/o membrana como las otras para mantener en condiciones propias la humedad higroscópica. Esta explicación se ve reforzada al observar los valores de humedad promedio para 72, 48 y 24 horas de estrés de envejecimiento (Tabla 3) de 11,40; 28,84 y 32,27%, respectivamente, donde el valor para 24 horas obtiene el mayor nivel de humedad por tener teóricamente menor deterioro y absorber más agua del ambiente de ~100% de humedad que dicta el protocolo de envejecimiento. Esto cobra mayor sentido si se piensa en la relación área/volumen propia de la semilla habría significado una menor cantidad de puntos de adsorción higroscópica dado probablemente y como se indicó, por contar con paredes y membranas deterioradas al momento del equilibrio del contenido de humedad de la semilla (Torres *et al.*, 2018) al momento del inicio de la imbibición. Esta condición hipotética habría traído como consecuencia que al inicio de la Fase I de la imbibición, la molécula de agua no se adhiriera a los tejidos de la semilla alterados como son las membranas celulares por el desprendimiento en la matriz de la pared de compuestos solubles (lixiviados) desde las semillas (Parrish y Leopold, 1978; Pérez y Pita, 2001). Dicha condición, naturalmente produce un  $\Psi_w$  más negativo que habría incorporado el agua a la matriz celular en forma más acelerada como resultado del gradiente de potencial (Salisbury y Ross, 2000; Hill *et al.*, 2004), lo que se relaciona con lo expuesto por Radhakrishnamn (2018), que afirma que la aplicación de CM en semillas promueve la acumulación de proteínas y ácidos grasos

en la célula, lo cual disminuye el  $\Psi_w$  celular. En estas condiciones, la interfaz o membrana está en directa relación con el medio y es afectada por él para efectos de movimientos iónicos (Stange *et al.*, 2002), lo que aborda también a los parámetros de  $U_{60-40}$  (h) y TMG (h) que serán analizados más adelante. Para apoyar lo anterior, conviene relacionar  $b$  con el estado hídrico de las semillas al momento del inicio de los ensayos, lo cual puede ser visto en la Tabla 3.

En la interacción, y desde el punto de las dosis magnéticas, se observó una relación no lineal entre el porcentaje de humedad de las semillas tratadas después del EA y la inducción magnética con medias de 20,8; 28,4 y 23,3% para 0; 6,4 y 25,5  $\text{kJ m}^{-3}\text{s}$ , respectivamente, donde resulta interesante observar que la mayor velocidad fue obtenida en general en los tratamientos  $D = 25.5$  cuando el EA fue igual o menor a 48 h, destacando también el grupo 6,4 que salvo para el nivel de envejecimiento más alto (72 h), no se diferenció del control. En otras palabras, la magnitud de humedad de partida de las semillas puede ser un condicionante para la obtención de resultados más deseables. En general, estos resultados sugieren que algunos tratamientos con CM inducirían una variabilidad que no muestra diferencias significativas para semillas envejecidas con respecto al control, lo que significa que la aplicación CM promovió la recuperación de este parámetro de calidad.

**c:  $T_{50}$ .** Parámetro clave para determinación del tiempo de germinación del 50% de las semillas del lote estudiado. El resultado del factor EA para este parámetro

**Tabla 3.** Humedad (H,%) promedio de las semillas para los distintos tratamientos al inicio del ensayo.

**Table 3.** Average humidity content (H,%) of seeds for the different treatments at the beginning of the test.

Tiempo de envejecimiento (EA, h)	Dosis ( $\text{kJ m}^{-3}\text{s}$ )	H (%)	H (%) promedio (EA)	H (%) promedio (CM)
0	0			CM = 0,0
0	6,4		5,02	20,80
0	25,5			
24	0	32,18		
24	6,4	32,50	32,27	CM = 6,4
24	25,5	32,11		28,39
48	0	18,92		
48	6,4	39,86	28,84	
48	25,5	27,72		CM = 25,5
72	0	11,25		23,32
72	6,4	12,81	11,40	
72	25,5	10,14		

demuestra una vez más el efecto progresivo del deterioro en la medida que aumenta el tiempo de estrés en las semillas desde 0 a 72 horas (Tabla 2), observándose diferencias significativas del 41,3; 11,1 y 5,8% para 72, 48 y 24 h con respecto al control, respectivamente. Respecto al factor dosis, la misma tabla muestra por el contrario, que a mayor dosis los tiempos fueron significativamente menores en un 6,0 y 8,8% para 6,4 y 25,5  $\text{kJ m}^{-3} \text{s}$ , respectivamente, lo que da indicios sobre el efectos vigorizante de la técnica. En los resultados de interacción, llama la atención la robustez de los datos asociados a los grupos de mayor envejecimiento que llegaron a mostrar hasta tres niveles de sigificancia con respecto al control, eso sí, asociado a TMGs más lentos o velocidades menores. Esta situación de retardo ha sido descrita en otras investigaciones con CM (Pietruszewski y Martínez, 2017). En general la tendencia para los tratamientos magnéticos es promover una aceleración de la velocidad del  $T_{50}$  no diferenciándose en algunos casos con el control absoluto aunque hayan sido degradados fisiológicamente en diferentes magnitudes por medio del EA.

**$U_{60-40}$ :** Asumiendo que el lote de semillas provino de una fracción aleatoria de la población, y que la germinación se distribuyó normalmente, se planteó el estudio en base una distribución geométrica que define el tiempo de germinación del 40 al 60% de las semillas, lo que se relaciona con la uniformidad o concentración de la germinación deseable para el mejor establecimiento de los cultivos (Parera y Cantliffe, 1994). En la Tabla 2, se observa en los factores por separado que EA se diferenció estadísticamente del control, destacándose dentro de este grupo una tendencia al aumento en el TMG, lo que nuevamente es una señal de que este tratamiento cumplió con su objetivo. Por el contrario, el factor dosis disminuyó significativamente el tiempo para lograr la uniformidad de los tratamientos hasta en un 28,3%, lo que promovería interés por ejemplo, para la industria cervecera (BMBRI, 2016). Este comportamiento ya se ha observado en otras especies de interés industrial como la cebada (Acuña y Moncada, datos no publicados), entre otras tantas. En la interacción se advierte que el tratamiento 24-0 mostró diferencias significativas en la uniformidad con respecto al control absoluto, tardando casi un 30% más de tiempo para completar el rango, lo que significa que el daño fisiológico causado por el envejecimiento afectó a la semilla, pero al aplicar la inducción magnética (24-6,4 y 24-25,5) se produjo una variabilidad mayor que no les diferenció del control, observándose errores estandar de 0,04; 0,10 y 0,11 para 24-0, 24-6,4 y 24-25,5. Lo anterior quiere decir que algunas semillas habrían sido recuperadas como efecto de la inducción magnética mostrando tiempos mayores o similares al control absoluto. Para el grupo de EA48 (48-0, 48-6,4, 48-25,5), se advierte

que algunas medias aumentaron significativamente el tiempo  $U_{60-40}$  en uno y hasta en dos grados de significancia, pero algunos resultados no son concordantes con lo esperado, ya que 48-0 consideró un amplio rango de respuesta. Finalmente, EA72 mostró valores medios que no se diferenciaron del control absoluto. Respecto a las dosis magnéticas, 25,5  $\text{kJ m}^{-3} \text{s}$ , mostró un efecto negativo para este parámetro al contrastarla con el control absoluto (0-0) y una tendencia similar tuvo 6,4, lo que sugiere un efecto físico aun no determinado. Por el contrario, cuando las semillas deterioradas (EA24 y 72) fueron sometidas a inducción 25,5, estas recuperaron el nivel de uniformidad mostrado por el control absoluto (0-0), lo que puede ser interpretado como una mejora de la inducción magnética. Esta dinámica de aumento de dosis magnética y mejora del vigor también ha sido reportada en otras especies (Carbonell et al., 2005; Domínguez et al., 2010).

**TMG:** Este es probablemente uno de los factores más importantes a la hora de interpretar los resultados del ensayo. Los resultados para esta variable expuestos en la misma Tabla 2, permiten una vez más constatar el efecto del EA que disminuyó el vigor hasta en dos niveles de significancia, observándose un 44% más de tiempo en EA72 con respecto al control, mostrando a los envejecimientos 24 y 48 posicionados en valores intermedios con 22,3 y 23,5 h, respectivamente. Los efectos medios del factor de inducción magnética mostraron una disminución sostenida y estadísticamente significativa para las dosis, es decir, el TMG mejoró a medida que la dosis aumentó, observándose un 13,5 y 9,3% menos de tiempo para las dosis 25,5 y 6,4, respectivamente. En los tratamientos con interacción se observó una tendencia a que las dosis disminuyen el TMG de acuerdo a la magnitud de deterioro de las semillas, aunque las mejoras no siempre van de la mano con el aumento de las dosis (Haq et al., 2012). Esta situación se observó para los diferentes tiempos asociados a magnitud de germinación (1, 10, 25, 50, 75 y 90%). Estos datos también sugieren que el tratamiento magnético constituyó una mejora del vigor en el desempeño del TMG germinativo de la semilla.

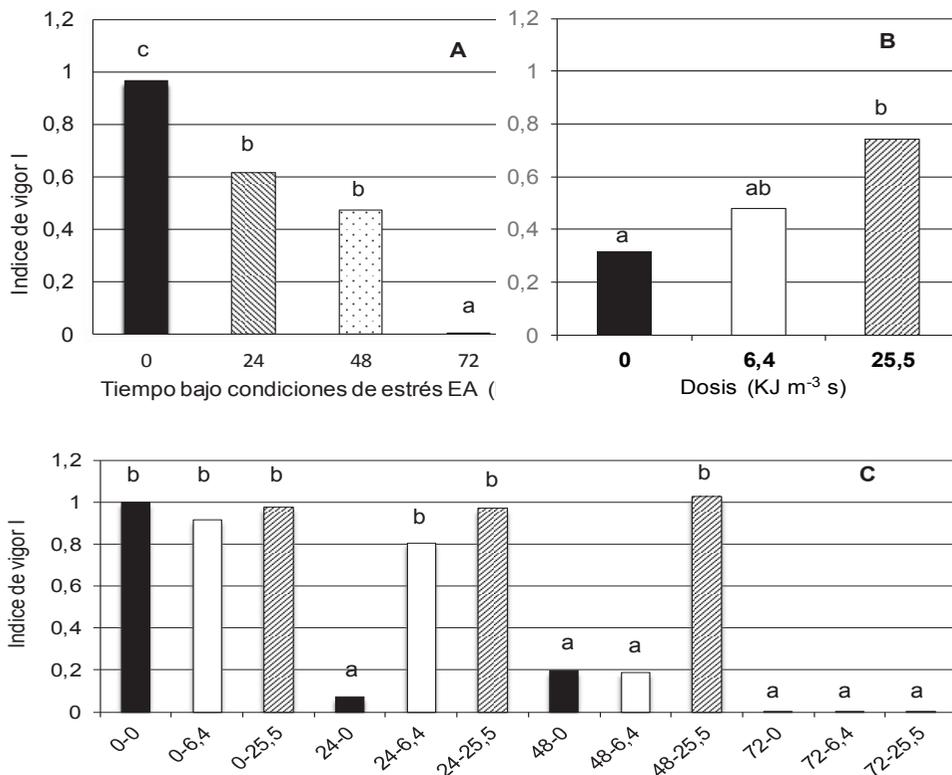
**Índice de vigor (V):** La Figura 3A muestra la respuesta media del vigor de semillas bajo EA de 0, 24, 48 y 72 h, y CM después de 24 horas de establecido el ensayo. Se observaron diferencias significativas a medida que aumentó el tiempo de estrés, demostrando que las semillas sometidas a EA disminuyeron en 36, 51 y 99% el factor estudiado para 24, 48 y 72 h respecto del control, respectivamente, lo que demostró la efectividad del tratamiento de envejecimiento. Comportamientos de esta naturaleza a han sido descritos con anterioridad para los mismos tiempos de EA. La pérdida de vigor para los tiempos 0, 24, 48 y 72 de EA se asimiló

a la respuesta de *Impatiens wallerana* bajo los mismos tiempos de EA (Li *et al.*, 1996). Por otra parte, el factor Dosis Magnética (Figura 3B) evidenció el efecto positivo promedio del CM más alto, con un 35 y 57% de mayor vigorosidad por sobre los tratamientos con 0 y 6,4 kJ m<sup>-3</sup>s, respectivamente, lo que evidencia la capacidad restauradora media de la técnica.

Al evaluar los factores en conjunto, se evidenció el efecto del deterioro y la recuperación significativa de semillas estresadas cuando fueron tratadas con CM, aunque este efecto no fue transversal a todos los niveles de EA (Figura 3C). Resulta interesante observar que la recuperación se logra de acuerdo a la magnitud del deterioro. Para el caso de la dosis menor (6,4 kJ m<sup>-3</sup>s), esta logra recuperar el V<sub>i</sub> de las semillas para 24 horas de EA, siendo necesario una mayor dosis para niveles de estrés mayores. De esta manera, el estrés medio EA48 fue plenamente revertido cuando se trató con la máxima dosis propuesta, sin embargo no fue posible recuperar el comportamiento de vigor cuando el estrés alcanzó a 72 h, debido a que podría actuar como un fac-

tor que induce una respuesta de estrés positiva (Ruzic y Jerman, 2002), lo que podría estar relacionado con el aumento de la enzima alfa-amilasa la cual aumenta su contenido en la semilla al ser sometidas a CM, permitiendo la hidrólisis del almidón durante la germinación (Vashisth y Nagarajan, 2010; Pérez *et al.*, 2013).

En general, las variables expuestas (b; G<sub>máx</sub>; TMG; T1-T90; U<sub>60-40</sub>) son indicadores de vigorosidad, en donde semillas bajo tratamiento magnético presentaron tendencias concretas y muchas veces determinantes de menores tiempos (h), los cuales pueden evaluarse a nivel de factor dosis o en las interacciones. Los resultados concuerdan con Mahajan y Pandey (2014), quienes trabajaron con 87 a 226 mT por 100 minutos donde disminuyó el TMG; tiempo de inicio germinación a G<sub>máx</sub> y los TMG a medida que la intensidad del CM aumenta para *Vigna radiata*. Del mismo modo, Naz *et al.* (2012), expusieron semillas a 99 mT por 3 y 11 minutos, obteniendo un 32 y 33% de incremento en la germinación comparada con control y una disminución de 24 h en el tiempo de germinación para semillas de *Abelmoschus esculentus*. Garcia y Pascual (2001), mencionan que uno



**Figura 3.** Índice de Vigor (V<sub>i</sub>) en respuesta al Envejecimiento Acelerado EA (h) (A), Dosis (kJ m<sup>-3</sup>s) (B) y su interacción (C) para semillas de lechuga a las 24 h de establecimiento del ensayo. Letras diferentes indican diferencias significativas (α = 0,05) entre las medias de los factores y sus combinatorias.

**Figure 3.** Vigor index (V<sub>i</sub>) in response to Accelerated Aging EA (h) (A), Dosage (kJ m<sup>-3</sup>s) (B) and their interaction (C) for lettuce seeds 24 h after trial establishment. Different letters indicate significant differences (α = 0.05) between the factors means and their combinatories.

de los efectos del CM es el aumento y aceleración en los procesos de germinación, lo cual puede deberse a variaciones en las corrientes iónicas a través de la membrana celular. Resultados similares expusieron Carbonell *et al.* (2000), donde el TMG de semillas de *Oryza sativa* expuestas a 125 y 250 mT para tiempos distintos se redujo significativamente en comparación con los controles.

A medida que aumentaron los tiempos de EA se expresó la pérdida de vigor dado el aumento del estrés. Resultados similares obtuvieron Hacisalihoglu *et al.* (1999), con semillas de lechuga en que al aumentar el tiempo de EA aumentó el  $T_{50}$  (h), resultados que concuerdan con los obtenidos en este ensayo. Al evaluar las interacciones, se observó un efecto del CM debido a que siempre que fueron comparadas con aquellas tratadas que presentaron mayor tiempo, demostrando un efecto positivo de los CM sobre las variables evaluadas en las pruebas de germinación. Si bien los resultados no son comparables dado la metodología y variables evaluadas en la prueba de germinación, Ruzic y Jerman (2002) sometieron semillas *Lepidium sativum* a 42 y 45 °C por 45 minutos con aplicación de CM pre y post estrés térmico y mantenidas a 1 °C. Los resultados mostraron un efecto estimulante entre 11 y 14% para el crecimiento de las plántulas cuando el CM es aplicado antes del estrés térmico, sin diferencia respecto del control cuando es aplicado post-estrés. Al comparar la técnica de la aplicación de los CM con otros tipos de *priming*, se puede advertir que al menos es igualmente eficiente o quizás superior que los tratamientos clásicos (Jett *et al.*, 1996), o cuando se trata de estimulación de semillas envejecidas por medios osmóticos (Singh, 2016), observándose variaciones propias de las diferentes técnicas, debiéndose tomar con precaución los resultados debido a la diferencia de los ensayos, aunque se le podría dar mayor interés en el análisis al Índice de germinación con respecto a los controles, ya que esto podría determinar el efecto de los tratamientos.

## CONCLUSIONES

Los resultados de este estudio demostraron que la técnica del acondicionamiento con campo magnético puede ser una alternativa simple y eficiente para potenciar la expresión de semillas desvigorizadas, observándose en varios casos que los atributos de calidad de las mismas fueron recuperados e igualados al control luego del deterioro inducido.

Estos resultados sugieren la necesidad de potenciar la profundización de la investigación y el uso de esta técnica acondicionadora física de campo magnético que es inocua y de nula residualidad, a modo de contribuir a la sustentabilidad de ciertas prácticas agro-nómicas. Se requieren más estudios sobre los factores que son alterados por el uso de CM para ajustar niveles de densidades magnéticas que induzcan la mejor ex-

presión fenotípica en esta y otras especies de semillas deterioradas o simplemente desvigorizadas por causas desconocidas.

## AGRADECIMIENTOS

Los resultados presentados en esta investigación se enmarcan en el Proyecto DID 2017-01 el cual fue financiado por la Dirección de Investigación y Desarrollo, Universidad Austral de Chile.

## REFERENCIAS

- Abdul-Baki A., Anderson J., 1973. Vigor determination in soybean seeds by multiple criteria. *Crop Science* 13, 630-633.
- Aladadjijyan, A., 2002. Study of the influence of magnetic field on some biological characteristics of Zea mais. *Journal of Central European Agriculture* 3 (2), 89-94.
- Belyaev, I., Matronchik, A., Alipov, Y., 1994. The effect of weak-static magnetic and alternating magnetic fields on the genome conformational state of E. coli cells: the evidence for model of phasemodulation of high frequency oscillations, in: Allen, M.J. (Ed.), *Charge and field effects in biosystems*, Vol 4. World Scientific, Singapore, pp. 174-184.
- Bhardwaj, J., Anand, A., Nagarajan, S., 2012. Biochemical and biophysical changes associated with magnetopriming in germinating cucumber seeds. *Plant Physiology and Biochemistry* 57, 67-73.
- Baser-Kouchebagh, S., Dadash, N., Hossein, A., Ahmadi, V., 2014. Response of sunflower (*Helianthus annuus* L. var. Hyson) under laboratory condition to priming techniques. *International Journal Bioscience* 5 (9), 360-365.
- Bilalis, D.J., Katsenios, N., Efthimiadou, A., Karkanis, A., Efthimiadis, P., 2012. Investigation of pulsed electromagnetic field as a novel organic pre-sowing method on germination and initial growth stages of cotton. *Electromagnetic Biology and Medicine* 31, 143-150. <https://doi.org/10.3109/15368378.2011.624660>
- Binhi, V., 2001. Theoretical concepts in magnetobiology. *Electro-And Magnetobiology* 20 (1), 43-58.
- Brewing and Malting Barley Research Institute (BMBRI), 2016. Strategic Goals and Targets for Malting Barley Breeding and Research 2018-2028. <http://bmbri.ca/wp-content/uploads/2016/10/BMBRI-Strategic-Goals-and-Targets-for-Malting-Barley-Breeding-and-Research-2018-2028-Final-from-Nov2016-TC-Meeting.pdf>. (access, 12.07.2018).
- Bose, B., Kumar, M., Sighal, R., Mondal, S., 2018. Impact of seed priming on the modulation of physico-chemical and molecular processes during germination, growth, and development of crops, in: Rakshit, A., Singh, A.B. (Eds.), *Advances in seed priming*. Springer Nature Singapore Pte Ltd. Pp. 2, 33-40. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-0032-5>
- Cakmak, T., Cakmakb, Z., Dumlupinar, R., Tekinayd, T., 2012. Analysis of apoplastic and symplastic antioxidant system in shallot leaves: Impacts of weak static electric and magnetic field. *Journal of Plant Physiology* 169, 1066-1073.

- Carbonell, A., Martínez, E., Amaya, J., 2000. Stimulation of germination in rice (*Oryza sativa* L.) by a static magnetic field. *Electro- and Magnetobiology* 19 (1), 121-128.
- Carbonell, A., Martínez, E., Florez, M., Amaya, J., 2005. Influencia de campos magnéticos estacionarios de 125 mT y 250 mT en la germinación de semillas de girasol. *Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente* 3, 34-40.
- Contreras, S., Barros, M., 2005. Pruebas de vigor en semillas de lechuga y su correlación con emergencia. *Ciencia e Investigación Agraria* 32 (1), 3-11.
- Donato, P., Nicolosi, W., Hasegawa, M., 1990. Produção de sementes de hortaliças. Es. Fundacao de Estudos e Pesquisas em Agronomia, Medicina Veterinaria e Zootecnia. SAV-FCAV/UNESP. Campinas, Brasil.
- De Souza, A., Porras, E., Casate, R., 1999. Efecto del tratamiento magnético de semillas de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) sobre la germinación y el crecimiento de las plántulas. *Investigación Agraria. Producción y Protección Vegetal* 14 (3), 437-444.
- Domínguez, A., Hernández, C., Cruz, A., Carballo, A., Zepeda, R., Martínez, E., 2010. Semilla de maíz bajo la influencia de irradiación de campos electromagnéticos. *Revista Fiotecnica Mexicana* 33 (2), 183-188.
- Dutta, P., 2018. Seed Priming: New Vistas and Contemporary Perspectives, in: Rakshit, A., Singh, H.B. (Eds.), *Advances in seed priming*. Springer Nature Singapore Pte Ltd., pp. 1, 3-22. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-0032-5>
- Ellis, R.H., 1989. The effects of differences in seed quality resulting from priming or deterioration on the relative growth rate of onion seedlings. IV International Symposium on Seed Research in Horticulture 253, September 5, 1989, Angers, France, pp. 203-212. [https://www.actahort.org/books/253/253\\_21.htm](https://www.actahort.org/books/253/253_21.htm)
- El-Kassaby, Y., Moss, I., Kolotelo, D., Stoehr, M., 2008. Seed Germination: Mathematical representation and parameters extraction. *Forest Science* 54 (2), 220-227.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2011. Semillas en emergencia. Manual Técnico. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Roma, Italia.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2015. The State of Agricultural Commodity Markets. Trade and food security: achieving a better balance between national priorities and the collective good 2015-2016. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- Flórez M., Carbonell M., Martínez E., 2007. Exposure of maize sedes to stationary magnetic fields: Effects on germination and early growth. *Environmental and Experimental Botany* 59, 68-75.
- Galland, P., Pazur, A., 2005. Magnetoreception in plants. *Journal of Plant Research* 118, 371-389.
- García, F., Arza, L., Almanza, I., 2001. Influence of a stationary magnetic field on water relations in lettuce seeds. Part II: experimental results. *Bioelectromagnetics* 22, 596-602.
- García F., Pascual, L., 2001. Influence of a stationary magnetic field on water relations in lettuce seeds. Part I: Theoretical considerations. *Bioelectromagnetics* 22(8), 589-595.
- García, M., Martín, A., 2008. La Física Nuclear en otras ciencias, la industria y la tecnología. *Revista Española de Física* 22(1), 37-44.
- Ghassemi-Golezani, K., Dalil, B., Moghaddam, M., Raey, Y., 2011. Field performance of differentially deteriorated seed lots of maize (*Zea mays*) under different irrigation treatments. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca* 39, 160-163.
- Groot, S., de Groot, L., Kodde, J., van Treuren, R., 2015. Prolonging the longevity of ex situ conserved seeds by storage under anoxia. *Plant Genetic Resources* 13 (1), 18-26. <https://doi.org/10.1017/S1479262114000586>
- Hacisalihoglu, G., Taylor, A., Paine, D., Hilderbrand, M., Khan, A., 1999. Embryo elongation and germination rates as sensitive indicators of lettuce seed quality: priming and ageing studies. *HortScience* 34 (7), 1240-1243.
- Haq, Z., Jamil, Y., Irum, S., Randhawa, M., Iqbal, M., Amin, N., 2012. Enhancement in germination, seedling growth and yield of radish (*Raphanus sativus*) using seed pre-sowing magnetic field treatment. *Polish Journal of Environmental Studies* 21 (2), 369-374.
- Hill, H., Bradford, K., Cunningham, J., Taylor, A., 2004. Primed lettuce seeds exhibit increased sensitivity to moisture during aging. *Acta Horticulturae* 782, 135-142.
- Hołubowicz, R., Kubisz, L., Gauza, M., Tong, Y., Hojan-Jezierska, D., 2014. Effect of Low Frequency Magnetic Field (LFMF) on the Germination of Seeds and Selected Useful Characters of Onion (*Allium cepa* L.). *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca* 42 (1), 168-172.
- International Seed Testing Association (ISTA), 2010. Woody plant seed manual complete. United States Department of Agriculture. [https://www.nsl.fs.fed.us/nsl\\_wpsm.html](https://www.nsl.fs.fed.us/nsl_wpsm.html) (access, 23.05.2018).
- Jett, L., Welbaum, G., Morse, M., 1996. Effects of Matrix and Osmotic Priming Treatments on Broccoli Seed Germination. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 121(3), 423-429.
- Kornarzynski, K., Pietruszewski, S., 1999. Effect of the stationary magnetic field on the germination of wheat grain. *International Agrophysics* 13, 457-461.
- Kuznetsov, O.A., Hasenstein, K.H., 1997. Magnetophoretic induction of curvature in coleoptiles and hypocotyls. *Journal of Experimental Botany* 48 (11), 1951-1957.
- Li, A., Herrera, J., Barboza, R., 1996. Efecto del envejecimiento acelerado sobre la germinación y el vigor de la semilla de china sultani (*Impatiens wallerana*) en almácigo. *Agronomía Costarricense* 20 (2), 173-180.
- Maffei, M., 2014. Magnetic field effects on plant growth, development, and evolution. *Frontiers in Plant Science* 5, 1-15.
- Mahajan, T., Pandey, O., 2014. Magnetic-time model at off-season germination. *International Agrophysics* 28, 57-62.
- Miyakoshi, J., 2005. Effects of static magnetic fields at the cellular level. *Progress in biophysics and molecular biology* 87 (2-3), 213-23.
- Murungu, F., Chiduzza, C., Nyamuga, P., Clark, L., Whalley, W., Finch, W., 2004. Effects of on-farm seed priming on consecutive daily sowing occasion on the emergence and growth of maize in semi-arid Zimbabwe. *Field Crop Research* 89, 49-57.
- Naz, A., Jamil, Y., Haq, Z., Iqbal, M., Ahmad, M., Ashraf, M., Ahmad, R., 2012. Enhancement in the germination, growth and yield of Okra (*Abelmoschus esculentus*) using pre-sowing magnetic treatment of seeds. *Indian Journal of*

- Biochemistry and Biophysics 49, 211-214.
- Nedialkov, N., Nenov, S., Parmakov, D., 1996. Pre-sowing treatment of seeds by magnetic field. Zemes Ukio Inzinerija, Nokslo Darbai 27, 141-150.
- Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA), 2002. "El mercado de la semilla". <http://www.odepa.gob.cl/publicaciones/articulos/mercado-de-semillas-2>. (acceso, 14.06.2018).
- Osburn, R., Schroth, M., 1989. Effect of osmopriming sugar beet seed on germination rate and incidence of *Pythium ultimum* damping-off. Plant Disease 73, 21-24.
- Ozbay, N., 2018. Studies on seed priming in pepper (*Capsicum annum* L.), in: Rakshit, A., Singh, H.B. (Eds.), Advances in Seed Priming. Springer Nature, Singapore Pte Ltd., pp. 209-240. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-0032-5>
- Panobianco, M., Filho, J., 2001. Envelhecimento acelerado e deterioração controlada em sementes de tomate. Scientia Agricola 58 (3), 525-531.
- Parera, C., Cantliffe, D., 1994. Presowing seed priming. Horticultural Reviews 16 (16), 109-141.
- Pérez, F., Pita, J., 2001. Viabilidad, vigor, longevidad y conservación de semillas. Hojas divulgativas N° 2112 HD. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente Ed. Madrid, España.
- Pérez, M., Salinas, D., Rigo M., 2013. Viabilidad de semillas de arroz provenientes de plantas obtenidas in vitro. Acta agronómica 62 (2), 114-119.
- Pietruszewski, P., 2014. Electromagnetic fields, impact on seed germination and plant growth, in: Glinski, J., Horabik, J., Lipiec, J. (Eds.), Encyclopedia of Agrophysics. Encyclopedia of Earth Sciences. Springer, Netherlands, pp. 267-269.
- Pietruszewski, S., Martínez, E., 2017. Magnetic field as a method of improving the quality of sowing material: a review. International Agrophysics 29, 377-389.
- Parrish, D., Leopold, C., 1978. On the mechanism of aging soybean seeds. Plant Physiology 61, 365-368.
- Poinapen, D., Brown, D., Beeharry, G., 2013. Seed orientation and magnetic field strength have more influence on tomatoseed performance than relative humidity and duration of exposure to non-uniform static magnetic fields. Journal of Plant Physiology 170, 1251-1258.
- Powell, A., 2009. What is seed quality and how to measure it?. Second World Seed Conference, Food and Agriculture Organization (FAO) 8-10 September, Rome, Italy, pp. 142-149.
- Radhakrishnan, R., 2018. Seed pretreatment with magnetic field alters the storage proteins and lipid profiles in harvested soybean seeds. Physiology and Molecular Biology of Plants 24 (2), 343-347. <https://doi.org/10.1007/s12298-018-0505-8>
- Reddy, K., Reshma, R., Jareena, S., Nagaraju, N., 2012. Exposure of Greengrass Seeds (*Vigna radiata* var. *radiata*) to Static Magnetic Fields: Effects on Germination and a-amylase Activity. Research Journal of Seed Science 5 (3), 106-114.
- Roberts, E., Osei-Bonsu, K., 1988. Seed and seedling vigor, in: Summerfield, R.J. (Ed.), World crops: cool season food legumes. Kluwer Academic Publishers, London, pp. 897-910.
- Robledo, E., 1986. Procesos deteriorativos en granos y semillas. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, La Plaitina (IPA-INIA), Santiago, Chile, pp. 34, 31-38.
- Ruzic, R., Jerman, I., 2002. Weak magnetic field decreases heat stress in cress seedlings. Electromagnetic biology and medicine 21 (1), 69-80.
- Salinas, A., Yoldjian, A., Cravio, R., Bisaro, V., 2001. Pruebas de vigor y calidad fisiológica de semillas de soja. Pesquisa Agropecuária Brasileira 36(3), 371-379.
- Salisbury, F., Ross, C., 2000. Fisiología de las plantas: Thomson Editores Spain Paraninfo S.A., Madrid, España.
- Shekari, F., Mustafavi, S., Abbasi, A., 2015. Sonication of seeds increase germination performance of sesame under low temperature stress. Acta Agriculturae Slovenica 105 (2), 203-212.
- Shine, M., Guruprasad, K., Anand, A., 2011. Enhancement of germination, growth and photosynthesis in soybean by pre-treatment of seeds with magnetic field. Bioelectromagnetics 32, 474-484.
- Singh, N., 2016. Study of natural ageing and seed priming on seed quality in onion (*Allium cepa* L.). Tesis Doctoral. College of Agriculture. CCS Haryana Agricultural University Hisar. India. 120 p.
- Socorro, A., García, F., Pino, Y., Díaz, D., 2013. Stimulation of germination and growth in soybean seeds by stationary magnetic field treatment. Asian Journal of Agriculture and Biology 1 (2), 85-90.
- Soltani, F., Kashi, A., Arghavani, M., 2006. Effect of magnetic field on *Ocimum basilicum* seed germination and seedling growth. I International Symposium of the Labiatae: Advances in Production, Biotechnology and Utilisation, Acta Horticulturae 723, November 30, 2006, Sanremo, Italy, pp. 279-282. [https://www.actahort.org/books/723/723\\_37.htm](https://www.actahort.org/books/723/723_37.htm)
- Stange, B., Rowland, R., Rapley, B., Podd, J., 2002. ELF Magnetic fields increase amino acid uptake into *Vicia faba* L. roots and alter ion movement across the plasma membrane. Bioelectromagnetics 23, 347-354.
- Tarquis, A., Bradford, K., 1992. Prehydration and priming treatments that advance germination also increase the rate of deterioration of Lettuce seed. Journal of Experimental Botany 43, 307-317.
- Teodori, L., Albertini, M., Ugucioni, F., Falcieri, E., Rocchi, M., Battistelli, M., Coluzza, C., Piantanida, G., Bergamaschi, A., Magrini, A., Mucciato, R., Accorsi, A., 2005. Static Magnetic Fields Affect Cell Size, Shape, Orientation, and Membrane Surface of Human Glioblastoma Cells, as Demonstrated by Electron, Optic, and Atomic Force Microscopy. Cytometry Part A: The Journal of the International Society for Analytical Cytology 69 (2), 75-85.
- Tkalec, M., Malaric, K., Pavlica, M., Pevalek-Kozlina, B., Vidakovic-Cifreka, Z., 2009. Effects of radiofrequency electromagnetic fields on seed germination and root meristematic cells of *Allium cepa* L. Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis 672 (2), 76-81.
- Torres, J., Socorro, A., Hincapié, E., 2018. Effect of Homogeneous Static Magnetic Treatment on the Adsorption Capacity in Maize Seeds (*Zea mays* L.). Bioelectromagnetics 39 (5), 343-351. <https://doi.org/10.1002/bem.22120>
- Vashisth, A., Nagarajan, S., 2010. Effect on germination and early growth characteristics in sunflower (*Helianthus annuus* L.) seeds exposed to static magnetic field. Jour-

- nal of Plant Physiology 167 (2), 149-156.
- Walters, C., Wheeler, L., Grotenhuis, J., 2005. Longevity of seeds stored in a genebank: species characteristics. *Seed Science Research* 15 (1), 1-20. <https://doi.org/10.1079/SSR2004195>
- Wang, X., Li, Q., Wang, S., Li, Q., 2003. Analytical Calculation of Air-Gap Magnetic Field Distribution and Instantaneous Characteristics of Brushless DC Motors. *IEEE Transactions on Energy Conversion* 18 (3), 424-432.
- Wyjck, S., 1995. Effect of pre-sowing magnetic biostimulation of the buckwheat seeds on theyield and chemical composition of buckwheat grain. *Current Advances in Buckwheat Research* 93, 677-674.
- Yaldagard, M., Mortazavi, S., Tabatabaie, F., 2008. Application of Ultrasonic Waves as a Priming Technique for Accelerating and Enhancing the Germination of Barley Seed: Optimization of Method by the Taguchi Approach. *Journal of the Institute of Brewing*. 114 (1), 14-21.
- Zhao, Y., Hub, M., Gaob, Z., Chenb, X., Huang, D., 2018. Biological mechanisms of a novel hydro-electro hybrid priming recovers potential vigor of onion seeds. *Environmental and Experimental Botany* 150, 260-271.

