

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA

FACULTAD DE AGRONOMÍA

**EVALUACIÓN DE LA GERMINACIÓN DE SEMILLAS
Y EL VIGOR DE PLÁNTULAS DE GENOTIPOS
NACIONALES DE ARROZ EN CONDICIONES DE FRÍO**

por

Fabián Leandro MAKOWSKI BOZZOLASCO

**Trabajo final de grado
presentado como uno de los
requisitos para obtener el
título de Ingeniero Agrónomo**

MONTEVIDEO

URUGUAY

2023

Trabajo final de grado aprobado por:

Director/a:

Lic. Bioquim. (PhD.) Nicolás Glison

Ing. Agr. (PhD.) Ana Laura Pereira

Tribunal:

Lic. Bioquim. (PhD.) Nicolás Glison

Ing. Agr. (PhD.) Ana Laura Pereira

Ing. Agr. (PhD.) Federico Molina

Fecha:

19 de diciembre de 2023

Estudiante:

Fabián Leandro Makowski Bozzolasco

AGRADECIMIENTOS

A mis tutores, Nicolás y Ana Laura, por su dedicación, paciencia y el conocimiento que compartieron conmigo. Ha sido un placer contar con su orientación durante esta última etapa.

A mis compañeros del laboratorio de INASE, Ana, Mónica, Santiago y Laura, por hacer fáciles los días difíciles, ustedes son parte de este trabajo. En especial a Vanessa, gracias por su apoyo constante y siempre confiar en mí.

A mis amigos y familia, quienes han sido un pilar esencial a lo largo de todos estos años, les estoy agradecido de corazón. En especial a Carla, por creer en mí, incluso cuando yo no lo hacía.

A Fede, por siempre estar, sin saberlo me dio el empujón que me faltaba.

A mis padres, porque con su gran esfuerzo me dieron la oportunidad de llegar hasta acá. Su ejemplo me ha enseñado a no aflojar nunca, sobre todo en los momentos más difíciles. Este logro es de ustedes.

TABLA DE CONTENIDO

PAGINA DE APROBACIÓN	2
AGRADECIMIENTOS	3
LISTA DE TABLAS Y FIGURAS	6
RESUMEN	7
ABSTRACT	8
1 INTRODUCCIÓN	9
2 OBJETIVOS.....	10
2.1 Objetivos generales:.....	10
2.2 Objetivos específicos	10
3 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	11
3.1 EL CULTIVO DE ARROZ EN EL MUNDO	11
3.2 DESCRIPCIÓN BOTÁNICA DEL ARROZ.....	11
3.3 SUBESPECIES DE ARROZ	13
3.4 EL CULTIVO DE ARROZ EN URUGUAY	14
3.5 EL FRÍO COMO LIMITANTE DEL CULTIVO DE ARROZ EN URUGUAY	16
3.5.1 Efectos del frío en la etapa vegetativa	17
3.5.2 Efectos del frío en la etapa reproductiva.....	18
3.6 GERMINACIÓN Y DORMANCIA EN SEMILLAS DE ARROZ	19
3.6.1 Germinación	19
3.6.2 Dormancia	22
3.7 CRECIMIENTO DE LAS PLÁNTULAS	25
4 MATERIALES Y MÉTODOS.....	27
4.1 MATERIAL VEGETAL.....	27

4.2 ENSAYOS DE GERMINACIÓN DE SEMILLAS Y VIGOR DE PLÁNTULAS	28
4.2.1 Ensayo de germinación con semillas con 1 mes de cosechadas.....	28
4.2.2 Ensayo de germinación con semillas con 4 meses de almacenamiento en seco en placa de Petri	29
4.2.3 Ensayo de germinación con semillas con 4 meses de almacenamiento en seco en rollo de papel	30
4.2.4 Ensayo de vigor en arena con semillas con 4 meses de almacenamiento en seco	30
4.2.5 Ensayo de crecimiento de raíces en rollo de papel.....	31
4.2.6 Análisis estadístico	32
5 RESULTADOS	33
5.1 ENSAYOS DE GERMINACIÓN EN PLACA DE PETRI CON SEMILLAS CON 1 MES DE COSECHADAS.....	33
5.2 ENSAYO DE GERMINACIÓN EN PLACA DE PETRI CON SEMILLAS CON 4 MESES DE ALMACENAMIENTO EN SECO	36
5.3 ENSAYO DE GERMINACIÓN EN ROLLO DE PAPEL.....	37
5.4 ENSAYO DE VIGOR EN ARENA.....	39
5.5 ENSAYO DE CRECIMIENTO DE RAÍCES EN ROLLO DE PAPEL.....	40
5.6 ANÁLISIS DE COMPONENTES VARIABLES Y MATRIZ DE CORRELACIÓN.....	41
6 DISCUSIÓN.....	43
7 CONCLUSIONES	45
8 BIBLIOGRAFÍA	46
9 ANEXOS.....	51

LISTA DE TABLAS Y FIGURAS

Tabla No.	Página
Tabla 1 Temperaturas críticas mínimas, máximas y óptimas (°C) en diferentes etapas de desarrollo del cultivo de arroz.....	17
Tabla 2 Lista de genotipos seleccionados según largo de grano, subtipo / origen y fecha de cosecha	27
Tabla 3 Proporción de viabilidad, germinación y vigor de los genotipos evaluados a diferentes temperaturas (15 y 25 °C), clasificadas por subtipo / origen	37
Tabla 4 Proporciones de plántulas emergidas y peso de las 10 plántulas más grandes de cada genotipo ensayado, clasificados por subtipo / origen.....	39
Figura No.	Página
Figura 1 Proporción de germinación de semillas con un mes de cosechadas incubadas a 15 °C con y sin preheating.....	33
Figura 2 Proporción de germinación de semillas con un mes de cosechadas incubadas a 25 °C con y sin preheating.....	34
Figura 3 Comparación de la proporción de semillas germinadas a 15 °C entre semillas con un mes de cosechadas y con cuatro meses de almacenamiento en seco	36
Figura 4 Crecimiento de la radícula principal en rollos de papel a los 10 días de incubación a 15 °C.....	40
Figura 5 Crecimiento de la radícula principal en rollos de papel a los 6 días de incubación a 25 °C.....	40

RESUMEN

El arroz ocupa una posición destacada entre los cultivos de Uruguay, destacando como un importante productor y exportador a nivel global. No obstante, el cultivo enfrenta desafíos significativos derivados de las condiciones climáticas del país, como las bajas temperaturas al momento de la siembra, lo cual impacta directamente en el rendimiento del cultivo. Este trabajo se centró en caracterizar genotipos de arroz según la respuesta germinativa y vigor de plántulas frente a condiciones de frío. Se evaluaron materiales de interés nacional de diferentes subespecies y subtipos con el objetivo de identificar aquellos más promisorios que permitan la implantación con temperaturas más bajas, para adelantar el inicio del ciclo del cultivo y lograr rendimientos superiores. Para ello, realizamos ensayos con semillas recién cosechadas y con cuatro meses de almacenamiento en seco donde se evaluó y comparó la viabilidad, la germinación, y también el vigor de las plántulas resultantes en dos temperaturas: una óptima (25 °C) y una fría (15 °C). Se observaron diferencias en la expresión de la germinación entre temperaturas, debido a la expresión de la dormancia de las semillas, la cual disminuyó tras el almacenamiento en seco. Se observó que la respuesta germinativa y el vigor de plántulas ante las bajas temperaturas está influenciada por el origen (definido por la subespecie y el subtipo), donde los genotipos de origen japónica templado fueron los que exhibieron una respuesta más favorable. No se observó diferencias a nivel de origen entre japónica tropical e índica, aunque si hubo diferencias a nivel de genotipo dentro de estos grupos. El genotipo SLI 17158 fue el que presentó un comportamiento más destacado, lo cual lo convierte en un material atractivo para siembras tempranas y futuros programas de mejoramiento.

Palabras Clave: dormancia de semillas, subespecies japónica e índica, subtipo templado, subtipo tropical, mejoramiento en arroz, fecha de siembra, almacenamiento en seco

ABSTRACT

Rice holds a prominent position among the most relevant crops in our country, and it stands out as a significant producer and trader on a global scale. However, the crop faces significant challenges due to climatic conditions, especially low temperatures at the planting date, directly impacting crop yield. This research focuses on characterizing germinative response and plantlet vigor in cold temperatures for several national rice genotypes from different subspecies and subtypes. The aim is to identify the most promising genotype that would allow planting in low-temperature conditions, enabling an earlier start to the crop cycle to achieve higher yields. Several trials using freshly harvested (one month after harvest) and after-ripened (four months after harvest) seeds were conducted to measure and compare seed viability and germinability, and plantlet vigor at two temperatures: 25 (optimum) and 15 °C (cold). As expected, differences in germination between temperatures were observed because of the expression of seed dormancy in cold conditions, which decreased after four months of dry storage. Germinative responses and plantlet vigor at low temperatures conditions were influenced by origin (defined by subspecies and subtype), where temperate japonica genotypes showed a more favorable response to cold conditions. No differences at the origin level between the tropical japonica subtype and the indica subspecies were observed, although there were differences at the genotype level within these groups. Genotype SLI 17158 exhibited the most noteworthy germinative and plantlet performance in cold, making it an attractive plant material for future breeding programs.

Keywords: seed dormancy, japonica and indica subspecies, temperate subtype, tropical subtype, rice improvement, planting date, dry storage

1 INTRODUCCIÓN

El arroz, como uno de los cereales fundamentales para la alimentación humana a nivel global, despierta un gran interés dada su vital importancia en la seguridad alimentaria de las poblaciones especialmente en países en vías de desarrollo. Se ha convertido en una de las principales fuentes de energía en estas regiones, y su producción y consumo son cruciales en un contexto mundial en el que la demanda ha mantenido un crecimiento constante en las últimas décadas mientras que los rendimientos se han estancado, lo que plantea desafíos importantes para el futuro.

En este escenario global, Uruguay emerge como un actor destacado en la producción y exportación de arroz, ocupando el primer puesto en América Latina y el noveno a nivel mundial como país exportador. No obstante, el cultivo de arroz en Uruguay enfrenta desafíos relevantes, especialmente relacionados con las condiciones climáticas. La temperatura surge como uno de los factores limitantes principales en el ciclo de crecimiento del arroz. Las bajas temperaturas en la siembra, en particular, plantean un desafío ya que pueden limitar la germinación y el establecimiento de las plantas en siembras tempranas, así como la duración total de su ciclo de crecimiento lo que tiene un impacto negativo significativo en los rendimientos. El éxito de la germinación en bajas temperaturas puede estar asociado fuertemente a la dormancia de semillas que expresa cada variedad y a la tolerancia de las plántulas a las bajas temperaturas.

Por lo tanto, es imperativo identificar los materiales genéticos con mayor capacidad de germinar e implantarse en bajas temperaturas con el objetivo de mejorar la eficiencia y productividad del cultivo en el país. Esta necesidad es el motor que impulsa la presente investigación, la cual busca caracterizar el potencial germinativo de las semillas y el vigor de las plántulas de diferentes genotipos de arroz de interés nacional bajo condiciones de frío.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivos generales:

Caracterizar el potencial germinativo de las semillas y el vigor de las plántulas en frío de diferentes genotipos de arroz de interés nacional para conocer la variabilidad presente en estas características en busca de habilitar una mayor implantación en fechas más tempranas.

2.2 Objetivos específicos

i) Evaluar si existen diferencias entre los genotipos y sus orígenes en la dormancia de semillas expresada en temperaturas óptimas (25 °C) y frías (15 °C) usando semillas recién cosechadas.

ii) Evaluar el potencial germinativo de las semillas y el vigor de las plántulas emergidas en condiciones de frío usando semillas con cuatro meses de almacenamiento en seco dentro de un conjunto de genotipos seleccionados.

iii) Comprobar si hay asociación entre la dormancia, el potencial germinativo y el vigor de las plántulas en condiciones de frío al correlacionar los resultados obtenidos.

3 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

3.1 EL CULTIVO DE ARROZ EN EL MUNDO

El arroz es un cereal primario en la alimentación humana y el más importante en términos de seguridad alimentaria, porque es la base nutricional para más del 50% de la población mundial (Global Rice Science Partnership, 2013). El arroz es el segundo cultivo más importante del mundo en términos de producción y área cultivada, después del maíz. Se produce en más de 160 millones de hectáreas y alimenta a 9.000 millones de personas (FAOSTAT, Filtro: Arroz, Mundo, 2021).

Durante la segunda mitad del siglo XX, las aplicaciones de la tecnología de la *revolución verde*, junto con la introducción del arroz híbrido, mejoraron rápidamente la productividad del arroz. Sin embargo, en los últimos años los rendimientos de arroz no han aumentado al mismo ritmo de la demanda global, donde los consumidores también exigen granos de mayor calidad (Zader, 2011).

El Departamento de Agricultura de los Estados Unidos destaca que el crecimiento en el consumo de arroz está estrechamente relacionado con el aumento de la población, especialmente en aquellos países donde el arroz es un alimento fundamental, particularmente en Asia, África Subsahariana, América Latina y el Caribe (United States Department of Agriculture [USDA], 2023).

Si bien la producción de arroz se realiza en vastas partes del planeta, se concentra fuertemente en el continente asiático donde se produce el 91% del arroz del mundo. Con respecto a su consumo, el arroz presenta una característica particular que lo diferencia de los demás cereales, dado que es consumido en su gran mayoría por los mismos países productores. Tal distinción va de la mano de la seguridad alimentaria, ya que el arroz es la principal fuente de energía para la población local en la mayoría de los grandes productores y es sumamente importante para asegurar el suministro de alimento a la ciudadanía (FAOSTAT, Filtro: Arroz, Mundo, 2021).

3.2 DESCRIPCIÓN BOTÁNICA DEL ARROZ

La planta de arroz (*Oryza sativa* L.) pertenece a la familia de las Poáceas. Rosengurtt et al. (1970) la definen como una planta autógama anual que se adapta bien

a un hábitat acuático con temperaturas y humedades relativamente elevadas, que tiene un sistema de raíces fibrosas y una altura que puede variar entre 0,5 y 1,5 metros, dependiendo del genotipo. En relación con su morfología los autores indican que las hojas son alargadas y estrechas con una longitud entre 20 y 60 cm y un ancho entre 1 y 2 cm, formadas por vaina, lígula, dos aurículas y lamina, con tallos huecos que presentan nudos y entrenudos. Rosengurtt et al. (1970) mencionan que la espiguilla consta de seis estambres y un estigma de dos ramas protegidas por un lema y una palea, que luego serán la cáscara del grano. A su vez, los autores mencionan que la lema puede presentar una prolongación llamada arista y dos glumas estériles. El cariopse está formado por pericarpo, endospermo y embrión, estas espiguillas se encuentran unidas a las panojas por pedicelos, las panojas, además de las espiguillas, presentan un raquis principal y raquis primarios y secundarios (Rosengurtt et al., 1970).

El largo del ciclo de vida del arroz depende de diversos factores, como condiciones climáticas, genotipo, fecha de siembra, inicio de riego, malezas, fertilización, plagas y enfermedades, pero en general sigue un patrón estacional (Gamarra, 1996). El período de siembra se realiza cuando comienza la primavera. Continúa con el crecimiento vegetativo y la formación de la panoja, la floración y finalmente la maduración del grano, que se da finalizando el verano. La cosecha se lleva a cabo en otoño. La duración del ciclo de crecimiento de arroz está influenciada por la temperatura y el fotoperiodo, aunque es característico en los cultivares usados en la agricultura moderna que presenten insensibilidad al fotoperiodo. En consecuencia, la temperatura es el factor predominante que influye en la duración del ciclo de crecimiento de una variedad determinada de arroz (Yoshida, 1981).

La duración del cultivo puede variar ampliamente a nivel mundial, oscilando entre 80 y 280 días. En Uruguay, el ciclo de crecimiento de la planta de arroz oscila entre 120 y 150 días (Chebataroff, 2012). El ciclo de crecimiento de la planta se puede dividir en fase vegetativa y fase reproductiva. La fase vegetativa incluye procesos como la germinación, emergencia, desarrollo de estructuras foliares y macollaje (Counce et al., 2000). En esta fase se determina el número potencial de macollos, que posteriormente se corresponde con el número potencial de panojas (De Datta, 1981). Mientras que la fase reproductiva abarca la formación de los primordios florales, el

crecimiento del tallo hasta llegar al embuche, la emergencia de la inflorescencia, la antesis, y los diferentes estadios de crecimiento del grano: grano lechoso, grano pastoso y madurez completa de los granos o puntos de cosecha. Durante esta fase se determina el número, tamaño y peso de los granos (Porto & Castro, 1994), siendo la radiación y temperatura los factores críticos (Pérez de Vida & Macedo, 2010). Conocer estas etapas del crecimiento de la planta es fundamental para llevar a cabo prácticas agronómicas adecuadas en el cultivo del arroz.

3.3 SUBESPECIES DE ARROZ

Los genotipos de arroz se clasifican en dos subespecies principales: *índica* y *japónica*. A su vez, la subespecie *japónica* se divide en dos subtipos: *tropical* y *templado*. Las denominaciones de las subespecies y subtipos denotan el origen de cada uno. La subespecie *índica* se domesticó en las estribaciones del Himalaya, en el este de la India, y se dispersó por los trópicos y subtrópicos desde allí (Yoshida, 1981). Por otro lado, la subespecie *japónica* se domesticó inicialmente en el sur de China y se desplazó hacia el norte convirtiéndose en el subtipo *templado*, y también hacia el sur llegando al sudeste asiático, África Occidental y Brasil, donde se desarrolló el subtipo *tropical* (Yoshida, 1981). Estas dos subespecies de arroz presentan diferencias morfológicas, fisiológicas y genéticas. Sin embargo, ambas son adecuadas para las condiciones de clima y suelo en Uruguay.

Según Yoshida (1981) la subespecie *japónica* se caracteriza por tener granos anchos y gruesos, con una sección transversal redondeada, con hojas estrechas, de color verde oscuro, formando un ángulo amplio con el tallo. Este autor también indica que algunos genotipos de esta subespecie tienen aristas en los granos, mientras que otros no, a su vez, los pelos en la gluma son gruesos y relativamente largos. Por otro lado, Yoshida (1981) señala que la subespecie *índica* se distingue por tener granos delgados y algo planos, con hojas son amplias, de color verde claro, y formando un ángulo estrecho con el tallo. La mayoría de los genotipos de esta subespecie carecen de aristas en los granos, aunque algunas pueden tener aristas cortas, con pelos en la gluma delgados y cortos en comparación con los genotipos de la subespecie *japónica* (Yoshida, 1981).

Estas diferencias en la forma del grano, el ángulo de las hojas, el color y la presencia de aristas, así como la longitud y cantidad de pelos en la gluma, son características distintivas que permiten diferenciar entre el arroz japónica y el arroz indica.

Los genotipos de la subespecie japónica son generalmente más estables y resistentes a bajas temperaturas en comparación con los cultivares de la subespecie indica (Yoshida, 1981). La subespecie japónica mantiene altas tasas fotosintéticas incluso en bajas temperaturas e intensidades de luz, mientras que la subespecie indica es considerablemente más susceptible a las fluctuaciones climáticas, especialmente a las variaciones de temperatura y a las horas de sol (heliofanía). Además, cabe destacar que la distribución del parénquima clorofiliano difiere entre subespecies, donde el clorénquima es más compacto en la subespecie japónicas. Esta compactación contribuye a una mayor retención de temperatura, lo cual resulta crucial durante la etapa de plántula (Vergara, 1976, como se cita en Ferreira & Mountauban, 1998).

Se ha establecido el rango óptimo de temperaturas para la actividad fotosintética en cada subespecie y subtipo. En los genotipos de la subespecie indica, este rango se encuentra entre 25 y 35 °C, mientras que en los del subtipo japónica tropical está entre 18 y 33 °C. Es importante destacar que, en los genotipos de la subespecie indica, las temperaturas inferiores a 10 °C durante tres o más días pueden ocasionar daños durante el llenado y maduración de los granos. Sin embargo, los genotipos del subtipo japónica templado son capaces de soportar entre 2 y 3 °C menos (Stansel, 1980, como se cita en Ferreira & Mountauban, 1998).

3.4 EL CULTIVO DE ARROZ EN URUGUAY

Uruguay se destaca como el noveno país exportador de arroz a nivel mundial y el primero en América Latina. Este logro se debe, en primer lugar, a que Uruguay exporta entre el 90 y 95% de su producción, contrario a lo que ocurre con la producción de otros países del mundo. Esta particularidad, sumada a la concentración del comercio mundial de arroz en unos pocos países ha permitido que Uruguay se posicione en la cima del comercio mundial, representando aproximadamente el 2% de los volúmenes

comerciales, a pesar de su baja participación en la producción global, que ronda el 0,2% (FAOSTAT, Filtro: Arroz, Mundo, 2021).

Uruguay exporta este cereal a más de 60 países, generando más de USD 500 millones en exportaciones y 30.000 puestos de trabajo directos e indirectos. Estos datos resaltan la importancia del cultivo de arroz en Uruguay, no solo en términos de producción y comercio, sino también en términos de empleo y desarrollo económico (Sanguinetti, 2018).

El arroz uruguayo se distingue por su calidad y uniformidad en los mercados internacionales, lo que le permite acceder a precios superiores a los de sus competidores. Esto se logró a través del cuidado de varios aspectos, como la calidad de la semilla, el manejo agronómico del cultivo y la calidad molinera. Los resultados obtenidos son el fruto del trabajo conjunto entre la industria, los productores y la investigación, que han logrado adaptar el arroz uruguayo a las exigencias de los mercados más selectos. El sector arrocero uruguayo se destaca como uno de los sectores más exitosos e integrados del país, y es precisamente esta integración la base de los logros mencionados anteriormente (Sanguinetti, 2018).

Gamarra (1996) señala que el sistema de producción históricamente empleado en el país se basa en el riego continuo con inundación permanente. Esta práctica según este autor implica mantener una capa de agua en la superficie del campo, con una profundidad que varía entre 5 y 10 cm. La aplicación de riego por inundación comienza aproximadamente 30 días después de la emergencia de las plantas y se mantiene entre 15 a 20 días antes de la cosecha, lo que representa un período de alrededor de 90 a 100 días para los genotipos más comúnmente utilizados (Gamarra, 1996). Además, se realizan rotaciones con praderas con el objetivo de obtener beneficios económicos y ambientales, como contribuir a mejorar la estructura y el drenaje del suelo, así como ayudar a controlar eficazmente las malezas, lo que repercute en un mejor rendimiento del cultivo de arroz en el futuro (Gamarra, 1996).

La región este de Uruguay, que abarca los departamentos de Treinta y Tres, Rocha, Lavalleja y parte de Cerro Largo es la más adecuada para el cultivo del arroz debido a su topografía favorable y la presencia de cursos de agua durante todo el año.

Otros departamentos, como Tacuarembó, Rivera, Artigas y Durazno, también cultivan arroz aunque en menor medida y con características diferentes (Chebataroff, 2012). Los genotipos de la subespecie indica son los más cultivados en el país, representados por variedades como INIA Merín, Gurí INTA CL e INIA Olimar, que fueron las más sembradas durante la cosecha de 2021-2022 (Oficina de Estadísticas Agropecuarias [DIEA], 2022). Por otro lado, este autor indica que INIA Tacuarí es el genotipo más común de la subespecie japónica cultivada en Uruguay.

Es importante destacar que el éxito del cultivo de arroz en Uruguay depende, en gran medida, de la inversión en tecnología y la utilización de variedades adaptadas a las condiciones climáticas y edáficas locales (Chebataroff, 2012).

3.5 EL FRÍO COMO LIMITANTE DEL CULTIVO DE ARROZ EN URUGUAY

El cultivo de arroz en Uruguay se enfrenta a diversas limitaciones que impactan en su producción. Entre estas, las condiciones climáticas juegan un papel fundamental, ya que el arroz requiere de un clima cálido y húmedo para su crecimiento óptimo. De hecho, eventos como sequías, heladas y períodos prolongados de lluvias pueden afectar significativamente su rendimiento.

La temperatura se posiciona como el factor climático más influyente en el ciclo de cultivo del arroz. Cada evento fenológico específico requiere una acumulación de unidades de calor determinada, y las diferentes variedades presentan requisitos específicos en este aspecto (Yoshida, 1981). En este contexto y para este trabajo, resulta relevante destacar el efecto que las bajas temperaturas pueden tener en el cultivo del arroz.

La tolerancia al frío durante la etapa de germinación del arroz es un factor crucial en nuestro país, donde las temperaturas inferiores a los 15 °C pueden impedir o reducir la germinación y el establecimiento de las plantas en siembras tempranas. Las bajas temperaturas representan la principal limitación en regiones de clima templado, como el nuestro, afectando tanto el área de cultivo del arroz como la duración total del ciclo (A. L. Pereira, comunicación personal, 18 de octubre, 2023). Además, cabe destacar que las bajas temperaturas impactan directamente en la floración del cultivo,

lo que genera una disminución significativa en los rendimientos obtenidos (De Datta, 1981). Yoshida (1981) proporcionó información sobre las temperaturas críticas mínimas, máximas y óptimas para el crecimiento y desarrollo adecuado del arroz (Tabla 1).

Tabla 1

Temperaturas críticas mínimas, máximas y óptimas (°C) en diferentes etapas de desarrollo del cultivo de arroz

Etapas del cultivo de arroz	Temperaturas medias diarias (°C)		
	Mínima	Máxima	Óptima
Germinación	10	45	20 – 35
Emergencia e implantación	12 – 13	35	25 – 30
Desarrollo de raíz	16	35	25 – 28
Diferenciación de hoja	7 – 12	45	31
Macollaje	9 – 16	33	25 – 31
Diferenciación de primordio	15	-	-
Diferenciación de panoja	15 – 20	38	-
Antesis	22	35	30 - 33
Llenado de grano	12 – 18	30	20 – 25

Nota. Adaptado de Yoshida (1981).

3.5.1 Efectos del frío en la etapa vegetativa

Las bajas temperaturas junto a las altas humedades del suelo durante el período de la siembra representan desafíos significativos, ya que dificultan la implantación temprana del cultivo. Es importante lograr una alta proporción de germinación de las semillas en el suelo para garantizar un establecimiento rápido y un cultivo uniforme (Krishnasamy & Seshu, 1989). El cultivo de arroz se ve afectado por el frío durante las etapas tempranas, lo que incluye el fracaso en la germinación, el

retraso en la emergencia de las plántulas y su crecimiento, y la decoloración de las hojas (Yoshida, 1981).

Es importante destacar que existen diferencias entre los cultivares en cuanto a las temperaturas mínimas que pueden tolerar para su crecimiento (Tabla 1). Estas temperaturas mínimas varían en un rango de 9 a 18 °C, según el genotipo.

Durante investigaciones realizadas en la Estación Experimental INIA Treinta y Tres en 1996, se observó que, en siembras tempranas, con temperaturas del suelo de 16-17 °C, el genotipo El Paso 144 (subespecie índica) presentó porcentajes de germinación y emergencia significativamente más bajos en comparación con INIA Caraguatá (subespecie japónica), y esta última a su vez mostró porcentajes inferiores a INIA Tacuarí (subespecie japónica). Estos resultados coinciden con la conocida sensibilidad al frío de las variedades índicas y evidencian las diferencias en la respuesta de los genotipos de arroz al frío (Macedo, 2014). En estudios realizados en el país, se observó que incluso entre variedades de origen templado consideradas tolerantes al frío como (INIA Tacuarí) se exhiben mecanismos diferentes para hacer frente al estrés por enfriamiento en etapas vegetativas (Bonnecarrère et al., 2011).

3.5.2 Efectos del frío en la etapa reproductiva

El periodo reproductivo del arroz abarca una primera etapa que va desde el desarrollo de la panícula hasta la antesis, donde se determina el potencial de rendimiento del cultivo, y luego la etapa de llenado de granos donde se concreta el rendimiento (Pérez de Vida & Macedo, 2010). La radiación disponible durante el llenado de grano fue la variable climática con mayor efecto directo en el rendimiento durante un estudio de 15 años realizado para los cultivares más utilizados en Uruguay. Mientras que la ocurrencia de bajas temperaturas (< 15 °C) durante floración resultó ser el segundo factor determinante (Pérez de Vida & Macedo, 2010). Resulta clave para el manejo del cultivo hacer coincidir estas etapas con condiciones ambientales óptimas y esto tiene mayor probabilidad de ocurrencia sembrando en el periodo de fecha óptima (Pérez de Vida & Macedo, 2010). Los episodios de frío durante la etapa reproductiva son frecuentes en la zona este de Uruguay, donde se concentra la mayor parte del cultivo, y se han identificado como una de las principales causas de la variabilidad en

los rendimientos del país, restringiendo el uso de variedades de origen tropical (Pérez de Vida & Macedo, 2010).

Se ha determinado que el periodo más sensible a las bajas temperaturas es de 14 a 7 días previos a antesis, seguido por el período de floración en sí (Yoshida, 1981). Estudios revelaron claras diferencias entre los genotipos en cuanto a su tolerancia a las bajas temperaturas. Se observó que temperaturas de 14 °C durante cinco días previos a antesis ocasionaron un 40% de esterilidad en variedades tolerantes, mientras que los genotipos susceptibles experimentaron entre un 80% y 100% de esterilidad de espiguillas. La esterilidad causada por el frío se debe a su efecto sobre la meiosis que ocurre en las células madre del polen o, también, sobre el polen maduro (Sasaki & Wada, 1980, como se cita en Yoshida, 1981). Además, se ha observado una respuesta diferencial entre los genotipos según su origen, donde los de la subespecie japónica muestran mayor tolerancia al frío en comparación con los de la subespecie índica (Chebataroff, 2012).

Para los productores arroceros uruguayos, uno de los factores más importantes para la obtención de altos rendimientos es la fecha de siembra. Al sembrar en una fecha óptima, se logra que la etapa donde se define el potencial de rendimiento coincida con los días de máxima radiación solar, horas de sol y temperaturas óptimas. Cuanto más se atrase la fecha de siembra, los rendimientos comenzarán a disminuir gradualmente, dependiendo de cada variedad. Para INIA Merín, dado el largo de su ciclo, las siembras posteriores al 20 de octubre reducen sus rendimientos potenciales, y no es aconsejable sembrar esta variedad luego del 10 de noviembre. Esta necesidad ha sido la motivación para llevar a cabo la presente investigación. La mayoría de los materiales utilizados en el país se ven limitados por la duración del ciclo, y no se logra coincidir la época del año de mayor heliofanía con el periodo donde se determina el rendimiento (A. L. Pereira, comunicación personal, 18 de octubre, 2023).

3.6 GERMINACIÓN Y DORMANCIA EN SEMILLAS DE ARROZ

3.6.1 Germinación

La germinación, en el sentido más estricto y como la abordaremos en este trabajo, se inicia con la absorción de agua de la semilla (imbibición) y se culmina con

la emergencia del embrión de sus tejidos circundantes, donde la radícula es la primera estructura en aparecer en la mayoría de las especies. Por tanto, la germinación no incluye el crecimiento posterior de la plántula. Este proceso implica la ruptura física de los tejidos que lo envuelven, como el endospermo y las cubiertas. Por ende, la finalización de la germinación depende de que la fuerza expansiva generada por el embrión supere a las restricciones físicas de los tejidos circundantes, que también experimentan cambios tras la imbibición (Bewley et al., 2013). Es un proceso fisiológico crucial que está directamente influenciado por factores externos como la temperatura, el agua, el oxígeno, la luz y otros factores del suelo (Bewley et al., 2013).

Para que se produzca la germinación, las semillas en estado de latencia simplemente necesitan hidratarse en condiciones de temperatura adecuada y con la presencia de oxígeno (Bewley et al., 2013). Es importante no confundir la latencia con la dormancia, proceso que abordaremos más adelante. Cuando las semillas secas y viables absorben agua, se desencadenan una serie de eventos que culminan en la emergencia del embrión, indicando que la germinación ha sido exitosa (Bewley et al., 2013). Los cambios celulares que tienen lugar durante la germinación son complejos, ya que tras la imbibición es necesario reiniciar el metabolismo para permitir la recuperación de los daños estructurales y moleculares causados por el secado durante la maduración y los procesos de oxidación mientras están secas (Bewley et al., 2013). En resumen, se deben restablecer las actividades celulares básicas principalmente en el embrión. Sin embargo, aunque se logre todo lo mencionado anteriormente, algunas especies no logran germinar hasta que superen la dormancia (Bewley et al., 2013).

En semillas que se deshidratan en la madurez como las de arroz y las de otros cultivos agrícolas, la tasa inicial de imbibición estará determinada principalmente por la permeabilidad de la cubierta de la semilla, el área de contacto semilla/sustrato y la conductividad hidráulica del suelo o del medio. Esta tasa es importante, ya que la imbibición muy rápida de las semillas secas puede ser dañina en sí misma, especialmente a bajas temperaturas para cultivos de verano (Bradford, 1995).

A medida que el potencial hídrico de la semilla aumenta durante el proceso de imbibición, simultáneamente el gradiente para la absorción de agua experimenta una

disminución, pasando a la segunda etapa de la germinación (Bewley & Black, 1982). En esta etapa, el contenido de agua de la semilla se acerca asintóticamente a un nivel de meseta o equilibrio. Durante esta fase el contenido de agua de la semilla experimenta un aumento muy gradual o incluso permanece constante, para luego experimentar un incremento abrupto en conjunto con la absorción de agua asociada al crecimiento de la radícula emergente una vez que se alcanza la germinación (Bewley & Black, 1982). Esta fase de meseta puede ser considerada como el periodo de preparación para la germinación en sentido estricto, culminando con el inicio del crecimiento del embrión (Bewley & Black, 1982).

La mayoría de las semillas exhiben temperaturas mínimas, óptimas y máximas para la germinación. En el rango de temperatura subóptima (entre la mínima y la óptima), se espera que el 100% de las semillas logre germinar, pero mostrando diferentes tasas según la temperatura. En temperaturas más frías el tiempo requerido será mayor que en temperaturas más cálidas. Puede ocurrir que a bajas temperaturas no se logre la germinación del 100% aunque el tiempo de incubación sea muy prolongado (Yoshida, 1981). En estos casos, estamos evidenciando la expresión de la dormancia.

En general, la germinación de las semillas de arroz se produce en unos pocos días a una temperatura entre 25 y 30 °C. En cambio, las temperaturas bajas pueden retrasar la emergencia de las plántulas (Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria [INIA], s.f.). Para obtener un 90% de germinación en el arroz se necesitan seis días de incubación a 15°C, tres días a 25°C o dos días a 31 o 36°C. Incluso, es posible germinar semillas a temperaturas entre 0 y -5 °C si se prolonga la incubación más de un mes (Yoshida, 1981).

Además de influir en la tasa de germinación, las bajas temperaturas generan otras consecuencias en esta etapa, donde los efectos más significativos se observan principalmente durante la imbibición que se considera especialmente sensible (Blum, 1988). Las membranas de una semilla seca estarán principalmente en estado de gel, que no es una buena barrera para la fuga de los contenidos celulares. Si las semillas se exponen rápidamente al agua durante la imbibición, el agua entra antes de que las membranas puedan revertir al estado cristalino líquido, lo que provoca fugas y daños

celulares (Bewley et al., 2013). La transición entre los estados de gel y el cristalino líquido depende de la temperatura, donde a bajas temperaturas esta transición será más lenta y el daño será mayor (Bewley et al., 2013). El tipo y cantidad de ácidos grasos que componen la membrana influye en esta transición, como también algunos azúcares que pueden sustituir al agua durante la deshidratación al interpolarse entre los grupos polares de cabeza de los fosfolípidos y mantienen la estructura del estado cristalino líquido (Bewley et al., 2013). Estas características pueden estar involucradas en la prevención del daño en la imbibición a bajas temperaturas en los genotipos más tolerantes (Bewley et al., 2013).

3.6.2 Dormancia

La dormancia de las semillas es definida como un impedimento interno para la germinación en condiciones de temperatura, humedad y oxígeno que la promueven (Benech-Arnold et al., 2000). La dormancia se establece durante la maduración de la semilla en la planta madre y está determinada por factores genéticos y ambientales (Buijs, 2020). Es importante destacar que existen diferentes tipos de dormancia de semillas, como la fisiológica, morfológica, física y combinacional. La dormancia fisiológica, especialmente la no profunda, es la forma más común en especies cultivadas como es el caso del arroz. Este tipo de dormancia se caracteriza por mecanismos fisiológicos de inhibición del crecimiento del embrión que impiden la emergencia de la radícula, y en su expresión participan tanto el embrión como las cubiertas de la semilla (Baskin & Baskin, 2004).

La dormancia es una característica que muchas especies han adquirido durante una intensa selección natural que les permite la capacidad de detener su desarrollo en una etapa temprana, evaluar el entorno y sobrevivir en condiciones desfavorables, como el calor, la sequía y el frío (Huang et al., 2010). Un alto nivel de dormancia puede retrasar la germinación y acortar la temporada de crecimiento, mientras que niveles bajos de dormancia pueden llevar a una germinación prematura y, en última instancia, a la mortalidad de las plántulas antes de la llegada de una temporada de crecimiento favorable (Donohue et al., 2010).

Las especies silvestres emplean la dormancia como un mecanismo para reconocer la estación y permitir la germinación bajo condiciones ambientales óptimas. Por el contrario, las plantas cultivadas durante el proceso de domesticación a través de la selección han perdido en gran medida este rasgo de dormancia presente en sus contrapartes silvestres (Kilian et al., 2009). Para las especies domesticadas, la dormancia de semillas se considera desfavorable, ya que se busca lograr una germinación uniforme y rápida después de la siembra (Kilian et al., 2009). La variación en los patrones de dormancia entre diferentes especies se atribuye a una combinación de factores ambientales y genéticos heredables que ejercen su influencia en la adaptación de las diferentes poblaciones y especies (Baskin & Baskin, 2014).

El nivel de dormancia presente en las semillas está estrechamente relacionado con su capacidad para germinar en un rango específico de temperatura (Batlla & Benech-Arnold, 2015). Si las semillas incubadas no alcanzan la germinación máxima bajo un cierto rango de temperaturas, mientras no haya muerte de las semillas, podemos sospechar que la dormancia se expresa en esas condiciones (Batlla & Benech-Arnold, 2015). A medida que las semillas son liberadas de la dormancia, el rango de temperaturas permisivo para la germinación de las semillas se amplía hasta que es máximo, mientras que, durante un aumento de la dormancia, el rango se estrecha hasta que la germinación ya no es posible en algunas temperaturas (Batlla & Benech-Arnold, 2015). Especies con ciclo de vida en estival como es el caso del arroz tienden a expresar dormancia a bajas temperaturas de incubación (Batlla & Benech-Arnold, 2015).

Bewley et al. (2013) mencionan que, a medida que las semillas con dormancia se almacenan en condiciones secas, pierden gradualmente su dormancia a través de un proceso llamado post-maduración. Según este autor, durante este período, las semillas experimentan cambios que determinan si exhibirán o no dormancia en una posterior imbibición. Bewley et al. (2013) señalan que esta pérdida de dormancia generalmente se ve impulsada por los mismos factores que afectan al envejecimiento de las semillas; es decir, la post-maduración se acelera a temperaturas más elevadas. La post-maduración ocurre a contenidos de humedad relativamente bajos en las semillas. Durante este proceso, se sugiere que ciertos cambios químicos y bioquímicos, como la oxidación de componentes celulares y reacciones de Maillard pueden alterar la

estructura o función de las proteínas (Bewley et al., 2013). Qué cambios ocurren es ciertamente uno de los misterios clave que quedan en la biología de las semillas. Por lo tanto, lo que ocurre durante el almacenamiento en seco permite que, al embeber las semillas, resulte en un patrón de expresión génica asociado con la germinación en lugar de con la dormancia (Bewley et al., 2013).

Una alta proporción de especies, posiblemente la mayoría de las no tropicales tiene la capacidad de superar la dormancia cuando, en condiciones hidratadas, se exponen a temperaturas relativamente bajas, generalmente dentro del rango entre 1 y 10 °C, y en algunos casos, hasta 15 °C (Bewley et al., 2013). La relevancia en la naturaleza de esta respuesta conocida como estratificación en frío es evidente, ya que la dormancia de las semillas hidratadas se pierde gradualmente durante el invierno, especialmente en regiones templadas. El enfriamiento resulta efectivo en semillas con dormancia embrionaria o aquellas que experimentan dormancia impuesta por sus cubiertas (Bewley et al., 2013). Se ha observado que el frío acumulado induce la expresión de genes responsables de la síntesis de giberelinas (GAs) cuando las semillas pasan a temperaturas que conducen a la germinación, mientras que al mismo tiempo inhiben la producción de ácido abscísico (ABA) (Bewley et al., 2013). Estas dos hormonas son cruciales en los procesos de germinación y dormancia (Bewley et al., 2013).

Para el caso del arroz, se ha observado que genotipos de la subespecie japónica puede germinar mejor a bajas temperaturas que los de origen índica, debido a una posible selección natural causada por prácticas culturales y manejos locales que pueden haber favorecido la adaptación a temperaturas más frías, y dentro de estas, el subtipo templado presenta un mejor comportamiento que el tropical (Yoshida, 1981). Por este motivo, Jiang et al. (2006), con el objetivo de localizar regiones del ADN con efecto cuantitativo asociadas a la característica fenotípica de tolerancia a bajas temperaturas, utilizó poblaciones de mapeo diseñadas a partir de cruzamientos donde un parental pertenecía a la subespecie japónica subtipo templado adaptado a regiones frías, para así obtener una progenie variable y con presencia de esta característica.

Se sabe que el ácido abscísico (ABA) inhibe la germinación, se ha propuesto que el contenido de ABA durante la germinación de semillas se mantiene a un nivel más alto bajo condiciones no óptimas que bajo condiciones normales de germinación. Niveles altos de ABA durante la germinación de arroz a 15 °C y una alta sensibilidad a esta hormona pueden ser las determinantes principales de la variación en la respuesta al frío entre genotipos de arroz (Jiang et al., 2006).

3.7 CRECIMIENTO DE LAS PLÁNTULAS

Como se mencionó previamente, la señal inequívoca de la finalización de la germinación en sentido estricto se evidencia cuando la radícula (u otro tejido embrionario) emerge de los tejidos circundantes. Este momento marca el punto en el que concluye la germinación y comienza el crecimiento de la plántula. Durante el crecimiento, la plántula es influenciada por diversos factores ambientales que determinan su capacidad para crecer y desarrollarse de manera óptima. Estos factores abarcan la temperatura, la disponibilidad de oxígeno, la luz y la cantidad de agua en el suelo. La eficacia de la plántula para emerger exitosamente del suelo también va a depender de las características fisiológicas y bioquímicas de las semillas, así como de la eficiente utilización de las reservas durante este proceso (Bewley et al., 2013).

La temperatura juega un papel crucial para desencadenar las reacciones enzimáticas necesarias para la descomposición de las reservas. En esta etapa inicial, el 70% de las reservas soportan el crecimiento, siendo el rango óptimo de temperatura para el arroz entre 20 y 30 °C, y una temperatura crítica superior de 40 °C. La temperatura crítica inferior para la elongación de la parte aérea es de 12 °C, y de 14 °C para las raíces, pero estas temperaturas pueden variar según el genotipo (Yoshida, 1981).

La presencia de temperaturas bajas o estrés por frío afecta el crecimiento y el establecimiento de las plántulas. Los síntomas comunes de daño por frío son un crecimiento reducido y lento de la plántula, necrosis del tejido justo detrás de la punta de la radícula y una síntesis pobre de clorofila en la plúmula. Se ha observado que la variedad japónica tiende a mostrar un mayor grado de tolerancia al frío en etapa de plántula en comparación con la índica (Mahender et al., 2015). Da Cruz y Milach

(2004) sugirieron que la reducción en la longitud de la radícula y el porcentaje de germinación eran rasgos destacados para diferenciar genotipos tolerantes al frío en la etapa de crecimiento de plántula. Sthapit y Witcombe (1998) mencionaron que la germinación y el vigor de la plúmula a una temperatura de 17 °C eran características con una alta heredabilidad. Por lo tanto, estos rasgos podrían utilizarse durante la germinación y el crecimiento temprano de las plántulas para la selección bajo temperaturas frías. Coincidiendo con Jiang et al. (2006) que indicó que la tolerancia al frío es una característica heredable y que la capacidad de germinación a bajas temperaturas está regulada por cuatro o más genes dominantes. En cambio, el vigor de plántulas está determinado por otro grupo de genes diferentes (Mahender et al., 2015).

En estudios realizados en Uruguay, se encontró variabilidad en la tolerancia al frío entre genotipos de arroz en la etapa de crecimiento de la plántula, tanto de subespecie indica como japónica cuando se sembraron bajo temperaturas frías en comparación con las temperaturas óptimas (Pérez de Vida & Macedo, 2010). Durante esta etapa de plántula, el crecimiento del coleóptilo es una de las características que permiten diferenciar entre genotipos tolerantes y sensibles al frío. Se observó una reducción de la longitud del coleóptilo debido a las bajas temperaturas. Si bien la velocidad de germinación es importante para el establecimiento del cultivo, no se observó una relación entre este indicador y la capacidad de un genotipo para elongar el coleóptilo y la radícula bajo temperatura fría (Pereira da Cruz et al., 2006).

4 MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 MATERIAL VEGETAL

Se seleccionaron para los ensayos doce genotipos de interés de arroz provenientes de INIA Treinta y Tres. Siete genotipos correspondían a variedades comerciales en Uruguay, INIA Merín, INIA Tacuarí, INIA Cuareim, INIA Olimar, CL1202, CL1294 y SLI09193 los cinco restantes son líneas experimentales promisorias (Tabla 2). Las semillas se cosecharon en otoño de 2022, se limpiaron a mano para descartar semillas vacías, y luego se almacenaron en seco dentro de sobres de papel a temperatura ambiente.

Tabla 2

Lista de genotipos seleccionados según largo de grano, subtipo / origen y fecha de cosecha

Genotipo	Tipo de grano	Subtipo / Origen	Fecha de cosecha
INIA Merín	Largo fino	Índica	13 de abril
INIA Olimar	Largo fino	Índica	20 de abril
INIA Cuareim	Largo fino	Índica	6 de abril
SLI 09193	Largo fino	Índica	31 de marzo
SLF 16007	Largo fino	Índica	20 de abril
CL 1202	Largo fino	Índica	11 de abril
CL 1294	Largo fino	Índica	21 de abril
CL 19231	Largo fino	Índica	11 de abril
SLI 17158	Medio	Japónica templada	13 de abril
SLI 17144	Medio	Japónica templada	13 de abril
INIA Tacuarí	Largo fino	Japónica tropical	20 de abril
L 12148	Largo fino	Japónica tropical	20 de abril

4.2 ENSAYOS DE GERMINACIÓN DE SEMILLAS Y VIGOR DE PLÁNTULAS

Se realizaron ensayos en dos periodos diferentes en el tiempo, el primer ensayo se realizó con semillas de aproximadamente un mes de cosechadas, utilizando los doce materiales presentados anteriormente (Tabla 2). Para los restantes ensayos, se seleccionaron siete genotipos de los evaluados en la etapa anterior: INIA Merín, INIA Tacuarí, INIA Cuareim, SLI 09193, L 12148, SLI 17158 y SLI 17144. Se usaron semillas de estos materiales almacenados en seco durante cuatro meses en condiciones de temperatura ambiente en el Laboratorio de Fisiología Vegetal (Facultad de Agronomía, Sayago).

4.2.1 *Ensayo de germinación con semillas con 1 mes de cosechadas*

Para el primer ensayo, se tomaron muestras de semillas de cada uno de los doce genotipos. De cada genotipo, una parte al azar se sometió a un tratamiento de pre-heating para reducir la dormancia, que consistió en colocar los sobres de papel que contenían las semillas en una estufa a 50 °C durante 48 horas en oscuridad. Las restantes semillas permanecieron ese tiempo a temperatura ambiente (sin pre-heating). Las semillas de cada tratamiento y genotipo se pusieron a germinar a 15 y 25 °C, generando cuatro réplicas de 50 semillas para cada combinación de tratamientos. La germinación se realizó utilizando papel de filtro humedecido con 5 mL de agua destilada. Se sembró en placas de Petri de plástico esterilizadas de 10 cm de diámetro donde las semillas se distribuyeron homogéneamente. Las placas se envolvieron en nylon film y se colocaron en cámaras de incubación a la temperatura correspondiente, con un fotoperiodo de 12 horas de luz y 12 horas de oscuridad. La duración del periodo de germinación fue de 28 días para el grupo incubado a 15 °C y de 14 días para el grupo incubado a 25 °C. El experimento consistió en un diseño factorial $12 \times 2 \times 2 \times 4$.

Se realizó un conteo de germinadas dentro de cada réplica cada dos días. Para los propósitos de estos ensayos, se estableció que una semilla ha germinado cuando se observó una radícula claramente visible, independientemente de su capacidad para desarrollar una plántula normal, su longitud o grado de desarrollo. Después de

transcurridos los 14 y 28 días del período de germinación, las semillas que no germinaron se sometieron a una prueba de tetrazolio para evaluar la cantidad de semillas no germinadas viables.

Para el análisis de tetrazolio, se siguió la metodología establecida en las reglas ISTA (International Seed Testing Association [ISTA], 2023). Se realizó un corte longitudinal en aproximadamente tres cuartos de la semilla que luego se sumergieron en una solución de tetrazolio al 1% durante 2 horas a una temperatura de 30°C en completa oscuridad. La viabilidad se determinó observando los embriones teñidos de color rojo.

Se estimó la proporción de semillas germinadas acumuladas para cada día de conteo en función de las semillas viables. Además, se calculó el índice de Maguire, el cual se obtuvo sumando las proporciones de semillas germinadas dividido el número de días en cada conteo multiplicado por cien, estimando una medida relativa de la velocidad de germinación de las semillas.

4.2.2 Ensayo de germinación con semillas con 4 meses de almacenamiento en seco en placa de Petri

El ensayo consistió en una prueba de germinación en papel en placa de Petri, similar al ensayo anterior. Se sembraron y pusieron a incubar a 15 °C cuatro réplicas de 50 semillas cada uno de los siete genotipos elegidos. La germinación se realizó utilizando papel de filtro humedecido con 5 ml de agua destilada. Se sembró en placas de Petri de plástico esterilizadas de 10 cm que contenía de manera homogéneamente distribuidas las cincuenta semillas. Las cuatro réplicas se envolvieron en nylon film y se colocaron en cámaras de incubación a 15 °C, con el mismo fotoperiodo reportado anteriormente. La duración del periodo de germinación fue de 28 días.

Se realizó un conteo al final del periodo para determinar la cantidad de semillas germinadas con relación al total. Se consideró como semillas germinadas aquellas que mostraron la emergencia de la radícula.

4.2.3 Ensayo de germinación con semillas con 4 meses de almacenamiento en seco en rollo de papel

El ensayo consistió en una prueba de germinación en rollo. Se sembraron los siete genotipos escogidos en dos tratamientos diferentes: incubación a 15 y a 25 °C, con el mismo fotoperiodo reportado anteriormente. Los tratamientos a 25 °C tuvieron una duración de 14 días, mientras que los tratamientos a 15 °C se prolongaron por 28 días. En cada réplica se utilizaron 50 semillas, con un total de tres réplicas por tratamiento.

Las semillas se sembraron en una hoja de papel filtro de 20 × 30 cm, distribuyéndolas de manera homogénea, y se humedecieron con 20 mL de agua destilada. Luego de sembrar las semillas, se enrolló el papel y las tres réplicas se colocaron juntas en bolsas de nylon herméticas. Los rollos fueron llevados a la incubadora y se colocaron de forma horizontal.

Se realizó un primer conteo de cada rollo a los 4 días para el tratamiento a 25°C y a los 10 días para el tratamiento a 15°C, además de un conteo final al término de cada período de incubación. Al finalizar el análisis, las plántulas se clasificaron en las siguientes categorías: plántulas normales, semillas germinadas (sólo radícula visible) y semillas no germinadas. Para las semillas que no germinaron, se llevó a cabo un análisis de tetrazolio siguiendo la metodología detallada anteriormente para cuantificar semillas viables y no viables.

La viabilidad se determinó como la suma de plántulas normales, semillas germinadas y semillas viables por tetrazolio. El poder germinativo (germinación) se determinó como la suma de plántulas normales y semillas germinadas. El vigor se determinó sólo con las plántulas normales. Las proporciones de cada una de las variables determinadas se obtuvieron al dividir por el número de semillas totales.

4.2.4 Ensayo de vigor en arena con semillas con 4 meses de almacenamiento en seco

Este ensayo se llevó a cabo con el objetivo de evaluar el vigor en arena, considerando el potencial de germinación y el crecimiento inicial a temperaturas de 15 y 25 °C. Se tomaron muestras de semillas de cada uno de los siete genotipos escogidos

para generar tres réplicas de 50 semillas para dos temperaturas de incubación diferentes: 15 y 25 °C, con un ciclo de 8 horas de luz y 16 horas de oscuridad. Los tratamientos a 25°C tuvieron una duración de 14 días, mientras que los tratamientos a 15 °C se prolongaron por 28 días.

Las semillas se sembraron en bandejas de plástico de 15 × 20 cm sobre una capa de 2 cm de arena esterilizada, distribuyéndolas de manera homogénea. Posteriormente, se humedecieron con 15 mL de agua destilada. Después de la siembra, se cubrieron las semillas con una capa de 1 cm de arena seca.

Se realizó un único conteo al final de cada tratamiento para determinar la cantidad de plántulas emergidas en relación con el total sembrado. Además, se registró el peso total de las plántulas emergidas y el peso de las 10 plántulas más grandes de cada réplica.

4.2.5 Ensayo de crecimiento de raíces en rollo de papel

El ensayo se llevó a cabo para evaluar el crecimiento de la radícula en extensión de forma independiente al tiempo de germinación. Antes de iniciar el ensayo, se tomaron 120 semillas con cuatro meses de almacenamiento de cada uno de los siete genotipos escogidos y se las colocó en hojas de papel filtro humedecidas a una temperatura de 25 °C durante dos días para hacerlas germinar. Después de este período, se seleccionaron 60 semillas germinadas para generar tres réplicas de 10 semillas germinadas por cada una de las dos temperaturas de incubación (15 y 25 °C). A cada semilla seleccionada se le midió y registró la longitud inicial de la radícula emergida. Cada semilla fue numerada y colocada en línea en una hoja de papel filtro de 20 × 30 cm previamente humedecida. A continuación, se enrolló el papel y se almacenaron las tres réplicas juntas en bolsas de nylon herméticas, colocándolas de forma vertical en las incubadoras. La incubación duró hasta 10 días con el mismo fotoperíodo mencionado anteriormente.

Se realizaron mediciones de la longitud de la radícula a los 2, 4, 6 y 10 días (final) para determinar la elongación de la radícula durante el período evaluado, calculando la diferencia entre la longitud final e inicial.

4.2.6 Análisis estadístico

Las diferentes variables se analizaron con análisis de varianza utilizando modelos lineales, utilizando la función lme en el programa R. Los datos de germinación, viabilidad y vigor fueron transformados a logit ($y = \ln(p / (1 - p))$) ya que eran proporciones. Se realizaron análisis usando como factor los genotipos o los orígenes como síntesis de subespecies y subtipos (índica, japónica templada y japónica tropical).

Se estimaron las medias ajustadas y los intervalos de confianza al 95% de cada variable para cada combinación de tratamientos y genotipos u origen usando la función emmeans en R. Para analizar las diferencias entre distintos niveles de un factor, se construyeron contrastes ortogonales o se analizaron con el test de Tukey ($\alpha = 0,05$).

Se realizó el análisis de componentes principales (PCA) usando la función PCA del paquete FactoMineR en R. Se utilizaron como variables los resultados de germinación de todos los ensayos, el índice Maguire obtenido en el primer ensayo, el crecimiento de radículas y el peso de plántulas del ensayo con arena, mientras que los factores fueron los genotipos y los orígenes.

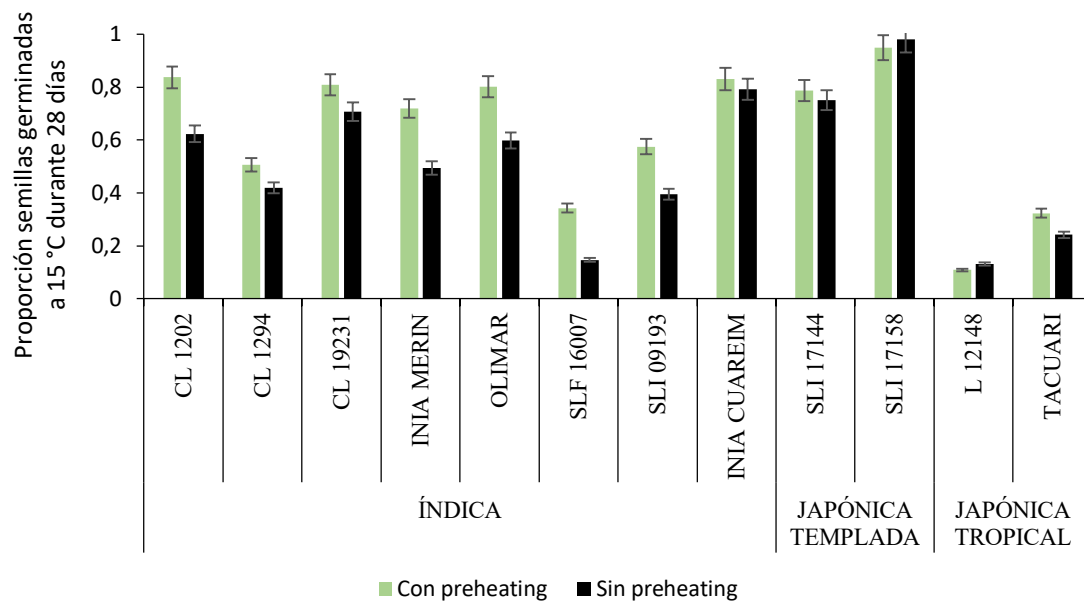
La matriz de correlaciones y la significancia de cada correlación se realizó utilizando la función corrplot del paquete del mismo nombre en R. El nivel de significancia fue de $\alpha = 0,05$.

5 RESULTADOS

5.1 ENSAYOS DE GERMINACIÓN EN PLACA DE PETRI CON SEMILLAS CON 1 MES DE COSECHADAS

Figura 1

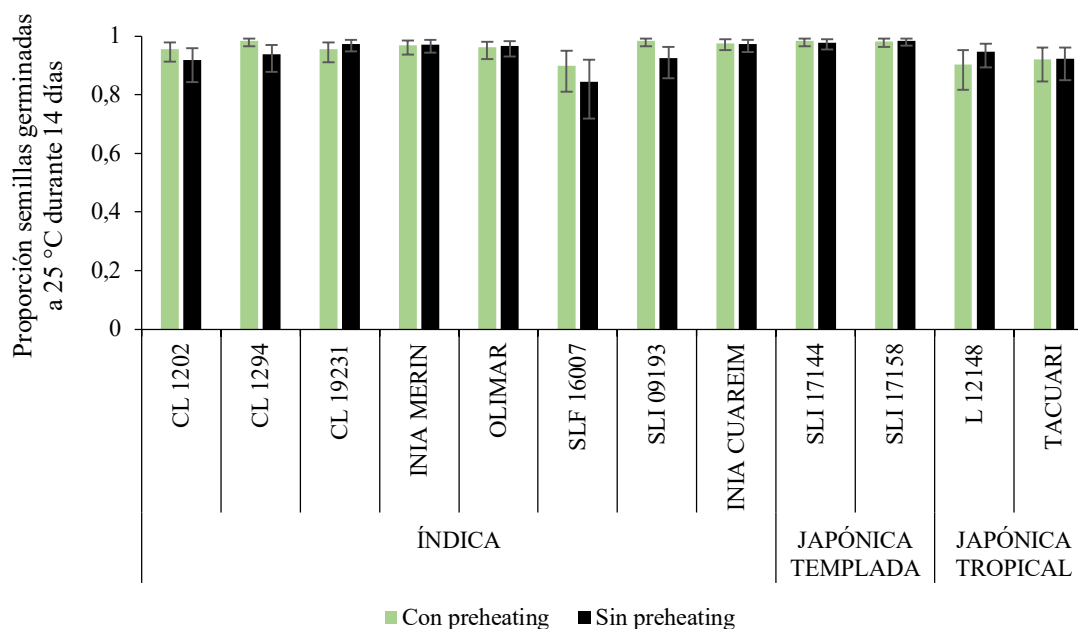
Proporción de germinación de semillas con un mes de cosechadas incubadas a 15 °C con y sin preheating



Nota. Dentro de cada genotipo y temperatura, aparecen dos barras que simbolizan los dos pretratamientos: las barras verdes muestran la germinación con preheating (48 horas a 50 °C previo a germinar) y las barras negras son los resultados sin preheating. Las líneas verticales indican el intervalo de confianza al 95%.

Figura 2

Proporción de germinación de semillas con un mes de cosechadas incubadas a 25 °C con y sin preheating



Nota. Dentro de cada genotipo y temperatura, aparecen dos barras que simbolizan los dos pretratamientos: las barras verdes muestran la germinación con preheating (48 horas a 50 °C previo a germinar) y las barras negras son los resultados sin preheating. Las líneas verticales indican el intervalo de confianza al 95%.

No se observaron diferencias significativas en la proporción de semillas germinadas a la temperatura de 25 °C entre los doce genotipos estudiados. Todos los genotipos superaron el valor mínimo de germinación establecido por el estándar específico nacional para la especie, que es de 80 % ($p > 0,05$, Figura 1). No obstante, se encontraron diferencias significativas entre los genotipos al evaluar la germinación a una temperatura de 15 °C ($p < 0,05$). El genotipo L 12148 exhibió la proporción más baja de semillas germinadas a 15 °C, con un promedio del 10%. Le siguieron en orden de menor a mayor germinación Tacuarí, con un promedio del 25%, y SLF 160007, con un promedio del 30% (Figura 1).

Por otro lado, de los genotipos con una mayor proporción de germinación a 15 °C se destaca en primer lugar SLI 17158 con un promedio del 95%, seguida de INIA Cuareim con un promedio del 85%, y SLI 17144 con un promedio del 80% (Figura 1).

Es importante destacar que las semillas no germinadas aún mantenían su viabilidad, no encontrándose diferencias de viabilidad entre los doce genotipos evaluados a 15 °C ($p > 0,05$). En promedio, se encontró que alrededor del 95% de las semillas conservaban su capacidad de germinación.

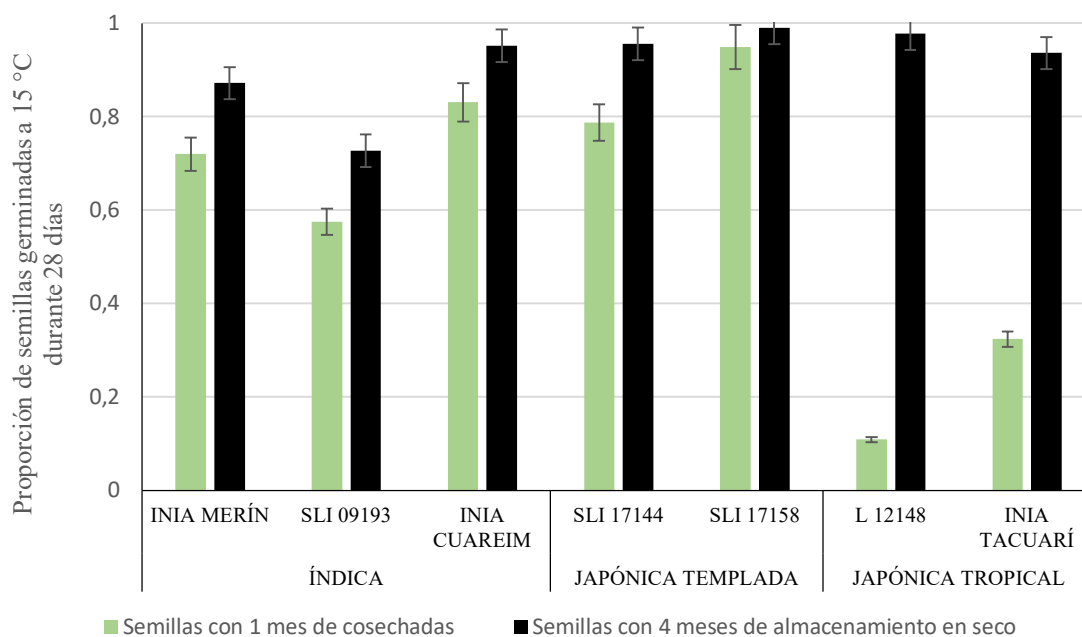
Al analizar los resultados de proporción de germinación en función del origen, se encontraron diferencias a 15 °C entre los genotipos de subtipo templado y tropical dentro de la subespecie japónica en la proporción de semillas germinadas. Las de origen japónica tropical, como L 12148 y Tacuarí, mostraron una menor germinación en comparación con las de origen índica. Por otro lado, las de subespecie japónica de subtipo templado, como SLI 17144 y SLI 17158, fueron las que mostraron valores más altos de germinación de todo el ensayo junto con INIA Cuareim (subespecie índica).

El índice de Maguire fue mucho mayor en 25 °C (promedio 22.2) que en 15 °C (promedio 4.3) dada la menor tasa de germinación en la última temperatura. Hubo diferencias entre genotipos que replican las diferencias obtenidas para la proporción de germinación (ver Figura en Anexo A). Por otra parte, el tratamiento de preheating practicado para reducir la dormancia no registró diferencias de germinación con semillas no tratadas, excepto para sólo dos genotipos a 15 °C: CL 1202 y SLF 160007 ($p < 0,05$, Figura 1).

5.2 ENSAYO DE GERMINACIÓN EN PLACA DE PETRI CON SEMILLAS CON 4 MESES DE ALMACENAMIENTO EN SECO

Figura 3

Comparación de la proporción de semillas germinadas a 15 °C entre semillas con un mes de cosechadas y con cuatro meses de almacenamiento en seco



Nota. Barras verdes muestran las semillas con un mes de cosechadas y barras negras muestran las semillas con cuatro meses de almacenamiento en seco. Las líneas verticales indican el intervalo de confianza al 95%

Todos los materiales incrementaron su proporción de semillas germinadas luego del periodo de almacenamiento en seco. No hubo diferencias para el genotipo SLI 17158 (subtipo japónica templado) entre el ensayo con un mes y el ensayo con cuatro meses de almacenamiento en seco a 15 °C ($p > 0,05$). Para el resto de los seis genotipos se observaron diferencias entre ambos ensayos ($p < 0,05$). Los genotipos de origen japónica tropical (L 12148 y Tacuarí) fueron los que presentaron una mayor diferencia ($> 70\%$) entre ambos ensayos (Figura 2). Los materiales de origen índica y japónica templado mostraron un comportamiento similar entre tiempos de almacenamiento. El genotipo SLI 09193 fue el que obtuvo la menor proporción de

semillas germinadas (Figura 2), sin embargo, la fracción no germinada resultó estar viable mayoritariamente.

5.3 ENSAYO DE GERMINACIÓN EN ROLLO DE PAPEL

Tabla 3

Proporción de viabilidad, germinación y vigor de los genotipos evaluados a diferentes temperaturas (15 y 25 °C), clasificadas por subtipo / origen

Genotipo	Subtipo / Origen	Viabilidad		Germinación		Vigor	
		15 °C	25 °C	15 °C	25 °C	15 °C	25 °C
INIA Merín	Índica	0,97 ab	0,93 a	0,48 c	0,93 a	0,14 c	0,88 a
INIA Cuareim	Índica	0,95 b	0,95 a	0,58 bc	0,95 a	0,08 c	0,94 a
SLI 09193	Índica	0,96 b	0,97 a	0,42 c	0,97 a	0,07 c	0,92 a
SLI 17158	Jap. templada	0,98 ab	0,96 a	0,92 a	0,96 a	0,68 a	0,93 a
SLI 17144	Jap. templada	0,98 ab	0,97 a	0,86 a	0,97 a	0,58 ab	0,89 a
INIA Tacuarí	Jap. tropical	0,97 ab	0,98 a	0,80 ab	0,98 a	0,40 b	0,91 a
L 12148	Jap. tropical	0,99 a	0,95 a	0,80 ab	0,95 a	0 d	0,89 a

Nota. El vigor refiere a la proporción de plántulas normales, la germinación a la proporción de plántulas normales más semillas germinadas y la viabilidad incluye a todas las germinadas y las semillas no germinadas positivas al tetrazolio. El ensayo a 15 °C duró 28 días y 14 días el de 25 °C. Letras distintas dentro de una misma columna indican diferencias significativas entre variedades ($p < 0,05$).

No se observaron diferencias en la viabilidad entre los genotipos evaluados a 25 °C, ya que todas mostraron valores superiores a 0,93 ($p > 0,05$). Sin embargo, a 15 °C si se encontraron diferencias. El genotipo L 12148 mostró la mayor proporción de viabilidad (0,99), diferenciándose de INIA Cuareim y SLI 09193 que presentaron los valores más bajos, 0,95 y 0,96 respectivamente (Tabla 3).

Hubo un efecto de la temperatura sobre la germinación para la mayoría de los genotipos ($p < 0,05$). Las mayores proporciones de germinación se obtuvieron con el tratamiento de 25 °C. Los genotipos con menores diferencias entre tratamientos de temperatura en la germinación fueron los genotipos de origen japónica templado, seguidas por las de origen japónica tropical (Tabla 3).

En el análisis del vigor, se observó un efecto de la temperatura. Los mayores valores se observaron con el tratamiento de 25 °C ($> 0,88$). En tanto, para el tratamiento de 15°C los materiales de origen japónica templado presentaron mayores proporciones de plántulas normales en relación con los otros genotipos en estudio ($p < 0,05$). El genotipo SLI 17144 registró una proporción de 0,58 en promedio mientras que SLI 17158 registró 0,68 promedio de plántulas normales a 15 °C. Los genotipos de origen japónica tropical no superaron la proporción de 0,40, mientras que los genotipos de origen índica sólo lograron una proporción máxima de 0,14 (Tabla 3). No se observaron diferencias entre los materiales de origen indica con relación a la viabilidad, germinación y vigor (Tabla 3).

5.4 ENSAYO DE VIGOR EN ARENA

Tabla 4

Proporciones de plántulas emergidas y peso de las 10 plántulas más grandes de cada genotipo ensayado, clasificados por subtipo / origen

Genotipo	Subtipo / Origen	Proporción emergidas	Peso de 10 plántulas más grandes (g)
INIA Merín	Índica	0,69 ab	0,09 ab
INIA Cuareim	Índica	0,73 ab	0,08 b
SLI 09193	Índica	0,61 b	0,07 b
SLI 17158	Japónica templada	0,73 ab	0,13 a
SLI 17144	Japónica templada	0,66 ab	0,12 ab
INIA Tacuarí	Japónica tropical	0,61 ab	0,07 b
L 12148	Japónica tropical	0,80 a	0,07 b

Nota. Datos obtenidos en ensayo de vigor en arena a 15 °C después de 28 días. Letras distintas dentro de una misma columna indican diferencias significativas entre genotipos ($p < 0,05$).

Se observaron diferencias en la proporción de plántulas emergidas en arena incubada a 15 °C. El genotipo L 12148 mostró la proporción más alta de plántulas emergidas (0,80), separándose estadísticamente del genotipo SLI 09193 que obtuvo la proporción más baja (0,61) ($p < 0,05$). Los demás materiales estudiados se ubicaron en un punto intermedio, sin evidenciar diferencias entre ellos (Tabla 4). No se encontraron diferencias atribuibles al origen de los genotipos en la proporción de plántulas emergidas ($p > 0,05$). No se encontraron diferencias entre genotipos de origen indica para las dos variables medidas (Tabla 4).

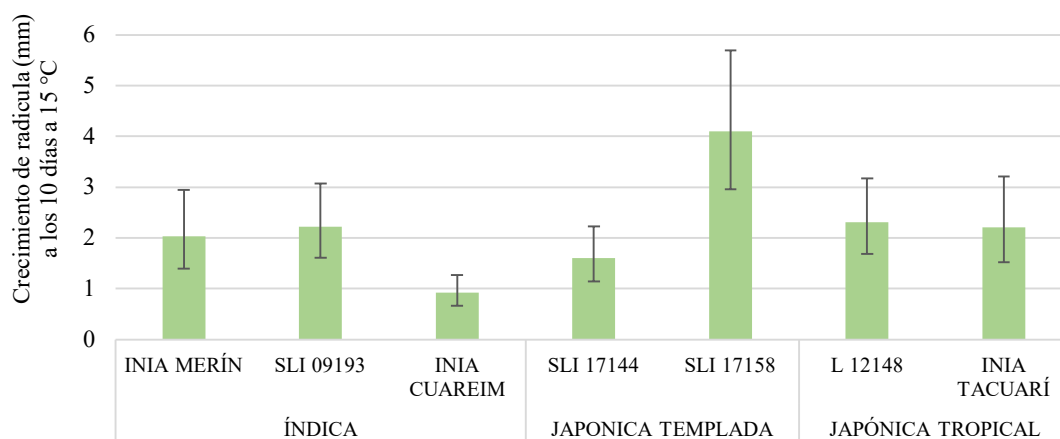
En la variable de peso de las diez plántulas más grandes en relación con el origen, se observó que los genotipos pertenecientes al subtipo japónica templada mostraron los mayores pesos promedios (0,13 g), seguido por los de origen japónica tropical y los pertenecientes a la subespecie índica que exhibieron valores inferiores

(entre 0,7 y 0,9 g). El genotipo L 12148 en este ensayo a 15 °C presentó la mayor proporción de plántulas emergidas y a su vez el menor peso de plántulas (Tabla 4).

5.5 ENSAYO DE CRECIMIENTO DE RAÍCES EN ROLLO DE PAPEL

Figura 4

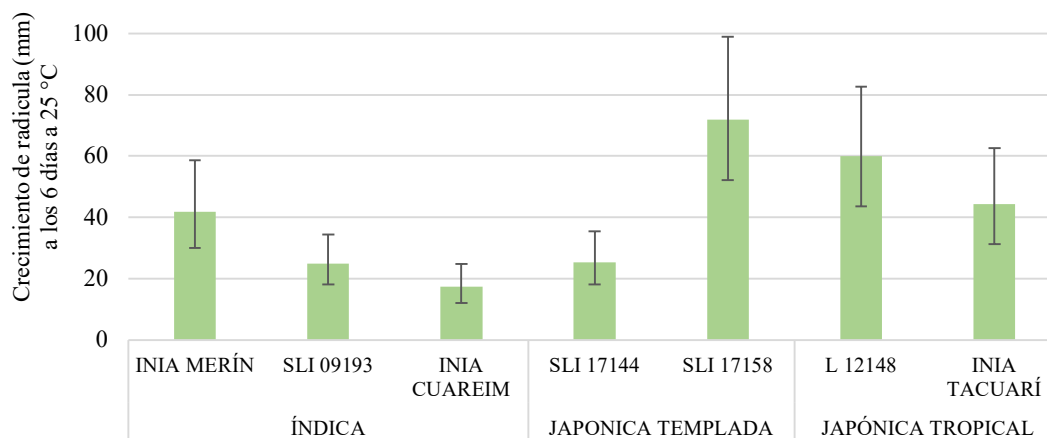
Crecimiento de la radícula principal en rollos de papel a los 10 días de incubación a 15 °C



Nota. Las líneas verticales indican el intervalo de confianza al 95%.

Figura 5

Crecimiento de la radícula principal en rollos de papel a los 6 días de incubación a 25 °C



Nota. Las líneas verticales indican el intervalo de confianza al 95%.

En el ensayo de crecimiento de radículas a 25 °C, se observó que el genotipo SLI 17158 (subtipo japónica templado) presentó, en promedio, un crecimiento mayor (> 70 mm) en comparación con los demás materiales ($p < 0,05$). Le siguieron los dos genotipos del subtipo japónica tropical, con 10 y 18 mm menos de crecimiento en promedio. El genotipo INIA Cuareim (subespecie índica) fue el que presentó la menor elongación de radícula, y mostró una diferencia de 52 mm en promedio con respecto a SLI 17158 y de 24 mm en promedio con relación a INIA Merín (subespecie índica) (Figura 3).

Por otro lado, en el ensayo a 15 °C, las longitudes de radículas fueron notablemente inferiores que a 25 °C, veinte veces más cortas en promedio. Sin embargo, se mantuvo el mismo ranking de los genotipos con mayores longitudes. En primer lugar, se encontró SLI 17158 con una longitud de radícula superior a los 4 mm, seguida por L 12148 con 2,3 mm y Tacuarí con 2,2 mm. Al igual que en el ensayo a 25 °C, INIA Cuareim presentó el menor crecimiento de radícula, inferior a 1 mm (Figura 3). En cuanto al origen, tanto en los ensayos a 25 °C como a 15 °C, se pudo observar que el genotipo con la longitud de radícula más extensa pertenece al subtipo japónica templado (SLI 17158), seguida por los dos del subtipo japónica tropical. En último lugar se encuentran los genotipos de la subespecie índica que presentaron los valores más bajos junto con SLI 17144 (subtipo japónica templado).

5.6 ANÁLISIS DE COMPONENTES VARIABLES Y MATRIZ DE CORRELACIÓN

En el Anexo B, se presenta la figura del análisis de componentes principales (PCA) de las variables de poder germinativo y vigor de plántulas a 25 y a 15 °C, utilizando como factores los genotipos y el origen. Se puede observar claramente cómo los diferentes materiales se agrupan por el origen.

El análisis de componentes principales resultó en un primer componente que explica el 39,4% de la variabilidad, mientras que el segundo explica el 22,8%. Ambos suman 62,2% (Anexo B). Las variables con mayor incidencia sobre el primer componente ($\cos^2 > 0,7$) fueron la proporción de germinación de semillas recién cosechadas tanto a 15 como a 25 °C, y el peso de las diez plántulas más grandes del

ensayo con arena. El primer componente separa claramente los genotipos de origen japónica templada de los restantes (Anexo B).

Hubo correlaciones entre variables que resultaron significativas ($p < 0,05$). Se puede observar como el peso de las 10 plantas más pesadas en arena a 15 °C correlacionó con la proporción de germinación de semillas recién cosechadas a 15°C y a 25 °C ($r = 0,82$ y $0,84$, respectivamente), con el índice de Maguire a 15 °C ($r = 0,83$) y con el vigor en rollo a 15 °C de las semillas con cuatro meses de almacenamiento ($r = 0,78$). El peso de las 10 plántulas más grandes resultó ser la variable que correlacionó con la mayor cantidad de las otras variables (Anexo C).

6 DISCUSIÓN

Para todos los genotipos evaluados, se observó una germinación menor a 15 °C que a 25 °C. Se destaca que las semillas no germinadas eran viables. Esto sugiere que las diferencias observadas están relacionadas con la expresión de la dormancia a bajas temperaturas que limitan la capacidad de germinación a 15 °C (Batlla & Benech-Arnold, 2015). El frío aplicado por el periodo de duración de los ensayos no afectó la germinabilidad de las semillas, manteniendo la capacidad de germinar a temperaturas óptimas. Al comparar el poder germinativo a 15 °C entre semillas recién cosechadas y aquellas que fueron almacenadas en condiciones secas durante cuatro meses, confirmamos que las diferencias se originaron por la presencia de mayor dormancia en las primeras, la cual disminuyó con el almacenamiento para seis de los siete genotipos (Bewley et al., 2013). Se logró distinguir un comportamiento diferente entre orígenes, siendo los genotipos de origen japónica templado los que presentaron una mayor respuesta germinativa al frío, similar a lo reportado previamente (Jiang et al., 2006). Cabe destacar que la aplicación del método de preheating recomendado en las reglas ISTA (2022) para superar la dormancia en esta especie no logró mostrar los efectos esperados en nuestros ensayos.

No surge de este trabajo una relación directa entre la germinación de semillas recién cosechadas y luego de cuatro meses de almacenamiento en seco. Esto significa que la dormancia primaria de las semillas recién cosechadas no parece ser una característica que repercuta significativamente en la germinación de las semillas luego del almacenamiento en seco. Tampoco se encontró una alta correlación entre muchas de las variables estimadas, sugiriendo que cada una responde a la expresión de genes diferentes (Mahender et al., 2015). Se observó que no hay correlación significativa entre el crecimiento de raíz en frío y la germinación en frío. Esto sugiere que el vigor de las plántulas y la germinación de las semillas son características que dependen de la expresión de diferentes grupos de genes. Es importante que las variables asociadas a estas características diferentes, que suelen ser usadas para evaluar y reconocer genotipos con mayor respuesta al frío, sean claramente discriminadas (Mahender et al., 2015).

Se pudo observar que el peso de 10 plántulas en el ensayo a 15 °C en arena resultó ser una variable interesante, ya que es la que logró correlaciones significativas con la mayor cantidad de las otras variables estimadas. Este resultado apunta a que debe ser analizada como una variable que sintetiza el vigor de implantación de nuevos materiales en condiciones frías. Se sugiere realizar ensayos que incorporen dicha variable para tener una caracterización de los materiales promisorios en los programas de mejoramiento de arroz en curso.

En los resultados del análisis de componentes principales se observa como las variedades de origen japónica templado se diferencian de los otros orígenes, dado que en general tienen alta respuesta germinativa al frío (Da Cruz & Milach, 2004). El genotipo SLI 17158 de subtipo japónica templado fue el que mostró un comportamiento más destacado tanto en los ensayos de germinación como los de vigor de plántulas. Los resultados lo señalan como un material atractivo a ser usado en futuros programas de mejoramiento para introgresar esta interesante respuesta germinativa y de crecimiento de plántulas ante bajas temperaturas. Este material fue el único en el que no se observaron diferencias de germinación entre tiempos de almacenamiento, ya que mostró inicialmente una baja dormancia de semillas a 15 °C.

El otro material de origen japónica templado (SLI 17144) no fue tan promisorio como el destacado anteriormente. Mostró un comportamiento que, en general, tendió a parecerse a los genotipos de origen índica. Esto sugiere que puede haber diferentes respuestas para enfrentar el estrés por enfriamiento en etapas iniciales del desarrollo entre variedades de origen japónica templada (Bonnecarrère et al., 2011).

Con relación a los materiales de origen índica y su respuesta al frío, ni INIA Cuareim ni SLI 09193 se diferenciaron de INIA Merín, que es actualmente la variedad de mayor importancia en la producción nacional.

7 CONCLUSIONES

Se observó variabilidad en la germinabilidad de las semillas y en el vigor de las plántulas entre los genotipos evaluados bajo condiciones frías. Estas respuestas diferenciales tienen un fuerte efecto del origen de las subespecies y subtipos, donde la subespecie japónica subtipo templado fue la que presentó mejores resultados a lo largo de los diferentes ensayos seguida por las japónicas tropicales y por último las índicas. También se observó variabilidad entre semillas recién cosechadas a temperaturas óptimas y frías relacionadas a la expresión de la dormancia a bajas temperaturas, siendo la subespecie japónica subtipo tropical la que presentó una mayor dormancia.

La dormancia presente en las semillas recién cosechadas disminuyó luego de cuatro meses de almacenamiento en seco, tal cual se esperaba. Siendo las subespecies japónicas subtipo templado las que presentaron mayor respuesta al frío en términos de germinación y vigor. Cabe señalar que en este trabajo no se encontró una correlación entre la dormancia en las semillas recién cosechadas y la germinación, así como el vigor, después de cuatro meses de almacenamiento en condiciones secas.

Se observó una respuesta diferencial de los genotipos en los ensayos de crecimiento de raíces y los de germinación en frío utilizando semillas almacenadas en seco durante cuatro meses. Señalando que el vigor de las plántulas y la germinación de las semillas son atributos influenciados por la expresión de grupos de genes diferentes y deben ser tratadas como características diferentes.

El material SLI 17158 mostró mayor respuesta y tolerancia al frío en la germinación y crecimiento de plántulas, determinada por la expresión de un grupo de genes asociados, probablemente, a su origen. La variable del peso de 10 plántulas mostró ser una variable sencilla de medir y que correlacionó con otras variables tanto de ensayos de germinación como de vigor. Esto la vuelve una variable útil para comparar y evaluar materiales con mejor respuesta de implantación ante condiciones frías.

8 BIBLIOGRAFÍA

- Baskin, C., & Baskin, J. M. (2014). *Seeds: Ecology, biogeography, and evolution of dormancy and germination*. Elsevier.
- Baskin, J. M., & Baskin, C. (2004). A classification system for seed dormancy. *Seed Science Research*, 14(1), 1-16. <https://doi.org/10.1079/SSR2003150>
- Batlla, D., & Benech-Arnold, R. (2015). A framework for the interpretation of temperature effects on dormancy and germination in seed populations showing dormancy. *Seed Science Research*, 25(2), 147-158. <https://doi.org/10.1017/S0960258514000452>
- Benech-Arnold, R. L., Sánchez, R. A., Forcella, F., Kruk, B. C., & Ghersa, C. M. (2000). Environmental control of dormancy in weed seed banks in soil. *Field Crops Research*, 67(2), 105-122. [https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(00\)00087-3](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(00)00087-3)
- Bewley, J. D., & Black, M. (1982). *Physiology and biochemistry of seeds: Volume 2. Viability, dormancy, and environmental control*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-68643-6>
- Bewley, J. D., Bradford, K., Hilhorst, H., & Nonogaki, H. (2013). *Seeds: Physiology of development, germination and dormancy* (3rd ed.). Springer.
- Blum, A. (1988). *Plant breeding for stress environments*. CRC. <https://doi.org/10.1201/9781351075718>
- Bonnecarrère, V., Borsani, O., Díaz, P., Capdevielle, F., Blancoc, P., & Monza, J. (2011). Response to photooxidative stress induced by cold in japonica rice is genotype dependent. *Plant Science*, 180(5), 726-732.
- Bradford, K. (1995). Water relations in seed germination. En J. Kigel & G. Galili (Eds.), *Seed development and germination* (pp. 351-396). Dekker. <http://dx.doi.org/10.1201/9780203740071-13>
- Buijs, G. (2020). A perspective on secondary seed dormancy in *Arabidopsis thaliana*. *Plants*, 9(6), Artículo e749. <https://doi.org/10.3390/plants9060749>

- Chebataroff, N. (2012). *Arroz uruguayo*. Hemisferio Sur.
- Counce, P., Keisling, T., & Mitchell, A. (2000). A uniform, objective, and adaptive system for expressing rice development. *Crop Science*, 40(2), 436-443. <https://doi.org/10.2135/cropsci2000.402436x>
- Da Cruz, R. P., & Milach, S. (2004). Cold tolerance at the germination stage of rice: Methods of evaluation and characterization of genotypes. *Scientia Agricola*, 61(1), 1-8. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-90162004000100001>
- De Datta, S. K. (1981). *Principles and practices of rice production*. Wiley. https://books.google.com.uy/books?id=Yxa5Sz_Puv4C&lpg=PP1&hl=es&pg=PP1#v=onepage&q&f=false
- Donohue, K., Rubio de Casas, R., Burghardt, L., Kovach, K., & Willis, C. G. (2010). Germination, post germination adaptation, and species ecological ranges. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 41, 293-319. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-102209-144715>
- Ferreira, P., & Montauban, F. (1998). *Incidencia de factores climáticos sobre rendimiento y componentes y vías de construcción del rendimiento en cultivares de arroz* [Trabajo final de grado, Universidad de la República]. Colibri. <https://hdl.handle.net/20.500.12008/24858>
- Gamarra, G. (1996). *Arroz: Manual de producción*. Hemisferio Sur.
- Global Rice Science Partnership. (2013). *Rice almanac: Source book for one of the most important economic activities on earth* (4th ed.). http://books.irri.org/9789712203008_content.pdf
- Huang, X., Schmitt, J., Dorn, L., Griffiths, C., Effgen, S., Takao, S., Koornneef, M., & Donohue, K. (2010). The earliest stages of adaptation in an experimental plant population: Strong selection on QTLs for seed dormancy. *Molecular Ecology*, 19(7), 1335-1351. <https://doi.org/10.1111/j.1365-294X.2010.04557.x>

- Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria. (s.f.). *Ficha técnica N°37: INIA Merín*. <http://www.inia.uy/Publicaciones/Documentos%20compartidos/Ficha-37-2018.pdf>
- International Seed Testing Association. (2023). *International rules for seed testing 2023: Introduction to the ISTA rules chapters 1-19*.
- Jiang, L., Liu, S., Hou, M., Tang, J., Chen, L., Zhai, H., & Wan, J. (2006). Analysis of QTLs for seed low temperature germinability and anoxia germinability in rice (*Oryza sativa* L.). *Field Crops Research*, 98(1), 68-75.
- Kilian, B., Özkan, H., Pozzi, C., & Salamini, F. (2009). Domestication of the Triticeae in the Fertile Crescent. En C. Feuillet & G. J. Muehlbauer (Eds.), *Genetics and genomics of the Triticeae* (pp. 81-119). Springer. https://doi.org/10.1007/978-0-387-77489-3_3
- Krishnasamy, V., & Seshu, D. V. (1989). Seed germination rate and associated characters in rice. *Crop Science*, 29(4), 904-908. <https://doi.org/10.2135/cropsci1989.0011183X002900040012x>
- Macedo, I. (2014). *Incidencia de factores climáticos en el rendimiento de cultivares élite de arroz* [Trabajo final de grado, Universidad de la República]. Colibri. <https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/bitstream/20.500.12008/1676/1/3903mac.pdf>
- Mahender, A., Anandan, A., & Pradhan, S. K. (2015). Early seedling vigour, an imperative trait for direct-seeded rice: An overview on physio-morphological parameters and molecular markers. *Planta*, 241(5), 1027-1050. <https://doi.org/10.1007/s00425-015-2273-9>
- Oficina de Estadísticas Agropecuarias. (2022). *Resultados de la encuesta de arroz "zafra 2021/22"*. MGAP. https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/documentos/noticias/COMUNICADO%20PRENSA%20ARROZ%202021_22.pdf

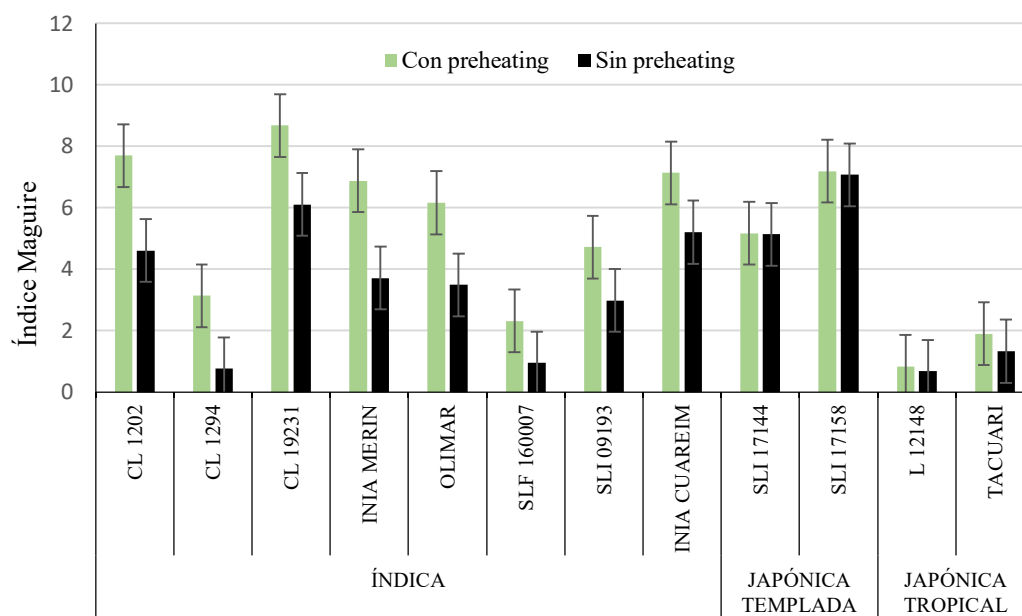
- Pereira da Cruz, R., Kothe, S., & Federizzi, L. (2006). Rice cold tolerance at the reproductive stage in a controlled environment. *Scientia Agricola*, 63(3), 255-261. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162006000300007>
- Pérez de Vida, F., & Macedo, I. (2010). Aspectos de la ecofisiología del cultivo de arroz en Uruguay: V. Incidencia de factores climáticos en la productividad experimental de cultivares. En Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (Ed.), *Arroz-Soja: Resultados experimentales 2012-2013* (pp. 1-3). https://www.researchgate.net/publication/275953260_aspectos_de_la_ecofisiologia_del_cultivo_de_arroz_en_uruguay_v_incidencia_de_factores_climaticos_en_la_productividad_experimental_de_cultivares
- Porto, A., & Castro, L. (1994). *Análisis de crecimiento y componentes de rendimiento en cultivares de arroz* [Trabajo final de grado, Universidad de la República]. Colibri. <https://hdl.handle.net/20.500.12008/27842>
- Rosengurtt, B., Arrillaga De Maffei, B., & Izaguirre De Artucio, P. (1970). *Gramíneas uruguayas*. Udelar.
- Sanguinetti, M. N. (2018). Técnico económico: Mercado de arroz. *Arroz*, (96), 34-36. http://www.aca.com.uy/revista-no-96#.XZtK_Oczbyl
- Sthapit, B. R., & Witcombe, J. R. (1998). Inheritance of tolerance to chilling stress in rice during germination and plumule greening. *Crop Science*, 38(3), 660-665. <https://doi.org/10.2135/cropsci1998.0011183X003800030007x>
- United States Department of Agriculture. (2023). *Grain: World markets and trade*. <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/grain.pdf>
- Yoshida, S. (1981). *Fundamental of rice crop science*. International Rice Research Institute. https://books.google.com.uy/books/about/Fundamentals_of_Rice_Crop_Science.html?id=wS-teh0I5d0C&redir_esc=y

Zader, A. (2011). Technologies of quality: The role of the Chinese state in guiding the market for rice. *East Asian Science, Technology and Society: An International Journals*, 5(4), 461-477. <https://doi.org/10.1215/18752160-1458155>

9 ANEXOS

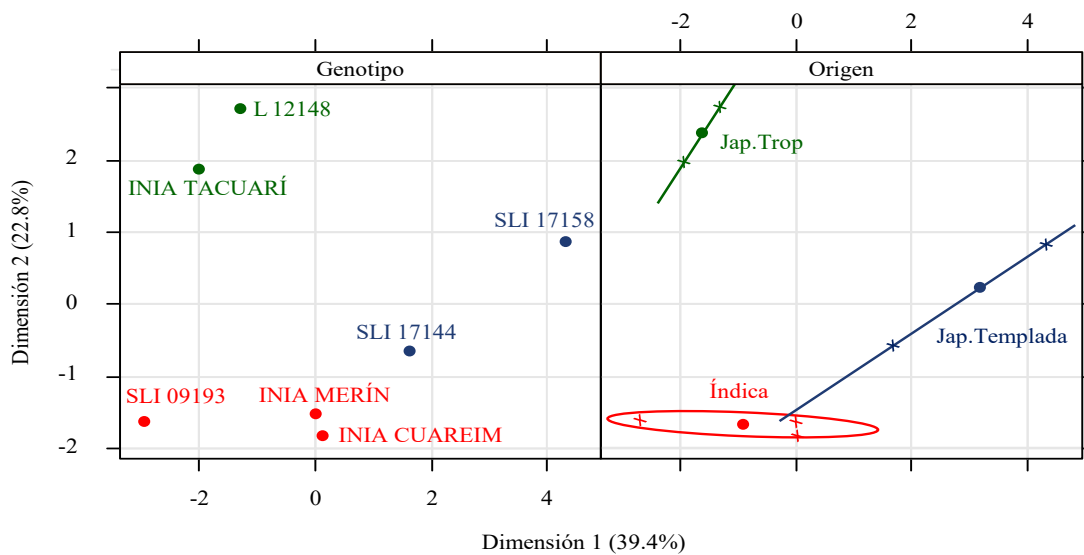
Anexo A

Índice de Maguire estimado en el ensayo de germinación en placa de Petri con semillas con un mes de cosechadas incubadas a 15 °C



Anexo B

Biplot resultante del análisis de componentes principales (PCA) con las variables de germinación de semillas y vigor de plántulas de los ensayos realizados



Nota. A la izquierda se presenta la relación entre genotipos, a la derecha se presenta la relación entre subtipo / origen.

Anexo C

Coefficientes de correlaciones de Pearson entre las variables obtenidas en los ensayos realizados

	GerArena-15 °C-AS	Magurie-25 °C-RC	GerPlaca-15 °C-RC	Magurie-15 °C-RC	GerPlaca-25 °C-RC	Peso Prom. 10 pl.	GerRollo-25 °C-AS	Vig.Rollo-25 °C-AS	LongRaiz-15 °C-AS	LongRaiz-25 °C-AS	Vig.Rollo-15 °C-AS	GerPlaca-15 °C-AS	GerRollo-15 °C-AS
GerArena-15 °C-AS	-	-0.08	0.07	0.05	0.48	0.21	-0.63	-0.09	0.12	0.47	-0.22	0.62	0.30
Magurie-25 °C-RC		-	0.62	0.68	0.63	0.52	-0.50	-0.11	0.00	-0.23	0.10	-0.30	-0.45
GerPlaca-15 °C-RC			-	0,99	0,81	0,82	-0.03	0.42	0.19	-0.06	0.60	0.28	0.21
Magurie-15 °C-RC				-	0,62	0,83	-0.07	0.38	0.25	-0.03	0.59	0.21	0.16
GerPlaca-25 °C-RC					-	0,84	-0.50	-0.04	0.08	0.10	0.40	0.53	0.27
Peso Prom. 10 pl.						-	-0.17	-0.03	0.46	0.32	0,78	0.46	0.52
GerRollo-25 °C-AS							-	0.48	0.00	-0.26	0.36	-0.15	0.27
Vig.Rollo-25 °C-AS								-	0.09	-0.15	0.09	-0.01	0.01
LongRaiz-15 °C-AS									-	0,86	0.52	0.15	0.46
LongRaiz-25 °C-AS										-	0.33	0.46	0.59
Vig.Rollo-15 °C-AS											-	0.43	0.72
GerPlaca-15 °C-AS												-	0,82
GerRollo-15 °C-AS													-

Nota. La intersección de los diferentes ensayos muestra la correlación entre cada par de variables del conjunto de datos. Se presentan únicamente los valores significativos ($p < 0,05$). GerArena-15°C-: Proporción de germinadas en arena a 15 °C. Magurie-25°C-: Índice de Maguire en placa a 25 °C. GerPlaca-15°C-: Proporción de germinadas en placa a 15 °C. Magurie-15°C-: Índice de Maguire en placa a 15 °C. GerPlaca-25°C-: Proporción de germinadas en placa a 25 °C. Peso Prom. 10 pl.: Peso promedio de las 10 plántulas mas grandes en arena a 15 °C. GerRollo-25°C-: Germinación en rollo a 25 °C. Vig.Rollo-25°C-: Vigor en rollo a 25 °C. LongRaiz-15°C-: Crecimiento de raíz en rollo a 15 °C. LongRaiz-25°C-: Crecimiento de raíz en rollo a 25 °C. Vig.Rollo-15°C-: Vigor en rollo a 15 °C. GerRollo-15°C-: Germinación en rollo a 15 °C. AS: Semillas con almacenamiento en seco. RC: Semillas recién cosechadas.