

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA

INCIDENCIA DE FACTORES CLIMÁTICOS EN LA PRODUCTIVIDAD DE
ARROZ EN CONDICIONES EXPERIMENTALES DURANTE 20 AÑOS EN
URUGUAY

por

Sheila Melina SCHEFFEL PEREIRA

TESIS presentada como uno de
los requisitos para obtener
el título de Ingeniero Agrónomo

MONTEVIDEO
URUGUAY
2018

Tesis aprobada por:

Director: -----

Ing. Agr. Fernando Blas Pérez de Vida

Ing. Agr. Ignacio Macedo Yapor

Ing. Agr. Guillermo Siri Prieto

Fecha: 26 de octubre de 2018

Autora: -----

Sheila Melina Scheffel Pereira

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero agradecer al director de tesis, Fernando Pérez de Vida, por la oportunidad de realizar este trabajo, así como su orientación y dedicación.

A Ignacio Macedo y Guillermo Siri, por la ayuda brindada y por hacer parte del tribunal.

A Facultad de Agronomía, docentes, funcionarios y compañeros a lo largo de la carrera.

A los funcionarios de INIA Treinta y Tres.

Y un agradecimiento muy especial a mi familia y amigos, por su apoyo, cariño y paciencia incondicionales.

TABLA DE CONTENIDO

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES	VII
I. <u>INTRODUCCIÓN</u>	1
A. OBJETIVO GENERAL	1
B. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
II. <u>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</u>	3
A. DESARROLLO DE LA PLANTA DE ARROZ	3
1. <u>Aspectos generales</u>	3
2. <u>Fase vegetativa</u>	3
3. <u>Fase reproductiva</u>	3
4. <u>Llenado de grano</u>	4
B. RENDIMIENTO Y COMPONENTES	4
1. <u>Aspectos generales</u>	4
2. <u>Número de panojas por unidad de área</u>	5
3. <u>Granos por panoja</u>	5
4. <u>Porcentaje de esterilidad</u>	6
5. <u>Peso de mil granos</u>	6
C. INCIDENCIA DE LA TEMPERATURA.....	7
1. <u>Aspectos generales</u>	7
2. <u>Incidencia en etapa vegetativa</u>	9
3. <u>Incidencia en etapa reproductiva</u>	9
4. <u>Incidencia en llenado de granos y madurez</u>	10
5. <u>Prácticas culturales para minimizar daño por frío</u>	10
D. INCIDENCIA DE LA RADIACIÓN.....	11
1. <u>Aspectos generales</u>	11
2. <u>Incidencia en etapa vegetativa</u>	11
3. <u>Incidencia en etapa reproductiva</u>	11

4. <u>Incidencia en llenado de granos y madurez</u>	11
E. CARACTERIZACIÓN DE GENOTIPOS ÍNDICA Y JAPÓNICA.....	12
1. <u>Respuesta a la temperatura</u>	12
2. <u>Respuesta a la radiación solar</u>	12
F. CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA DE LA ZONA ESTE.....	13
G. HIPÓTESIS	17
III. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u>	18
A. UBICACIÓN.....	18
B. FUENTE DE DATOS	18
1. <u>Características agronómicas</u>	18
2. <u>Diseño experimental de los ensayos</u>	18
3. <u>Determinación y registros</u>	19
4. <u>Fuente de datos climáticos</u>	19
C. CULTIVARES INCLUIDOS EN EL ESTUDIO	19
D. METODOLOGÍA EMPLEADA.....	20
E. ANÁLISIS ESTADÍSTICO	21
IV. <u>RESULTADOS</u>	23
A. CLIMA	23
1. <u>Caracterización climática de las zafras en estudio</u>	23
2. <u>Caracterización de variables</u>	26
a. Radiación solar por heliofanía (cal/cm ² /día) de 40 a 20 días pre floración ...	26
b. Número de días con temperatura mínima menor a 15 °C en el período de 40 a 20 días pre floración	28
c. Radiación solar por heliofanía (cal/cm ² /día) 10 días pre y 10 días pos floración.....	30
d. Temperatura mínima (°C) 10 días pre y 10 días pos floración	32
B. FECHA DE SIEMBRA Y FENOLOGÍA	34
C. RENDIMIENTO	36
1. <u>Subtipos</u>	36
2. <u>Época de siembra</u>	36
3. <u>Época de siembra y subtipo</u>	37

4. <u>Zafra</u>	37
D. COMPONENTES DE RENDIMIENTO.....	39
1. <u>Panojas por metro cuadrado</u>	39
2. <u>Número de granos total por panoja</u>	41
3. <u>Porcentaje de esterilidad</u>	43
4. <u>Peso de mil granos</u>	45
E. RENDIMIENTO EN FUNCIÓN DE COMPONENTES Y CLIMA.....	47
1. <u>Todos los cultivares</u>	47
a. Condiciones generales.....	47
b. Condiciones óptimas	50
2. <u>Índica</u>	52
3. <u>Japónica tropical</u>	55
a. Condiciones generales.....	55
b. Condiciones óptimas	58
V. <u>DISCUSIÓN</u>	61
VI. <u>CONCLUSIONES</u>	68
VII. <u>RESUMEN</u>	69
VIII. <u>SUMMARY</u>	71
IX. <u>BIBLIOGRAFÍA</u>	73

LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro No.	Página
1. Temperaturas críticas mínima, máxima y óptima para el crecimiento de arroz	8
2. Horas de sol reales para la serie de años 1981-1990.....	15
3. Cultivares usados, año en que aparece por primer vez y años de evaluación en estudio	20
4. Períodos definidos para evaluar la incidencia del clima y los componentes de rendimiento que se pueden estar definiendo	20
5. Promedio de radiación solar por heliofanía (cal/cm ² /día) según mes y zafra	23
6. Temperatura máxima (°C) por mes y zafra	24
7. Temperatura mínima (°C) según mes y zafra	25
8 Número de días con temperatura mínima menor a 15°C según mes y zafra	26
9. Medias y prueba t de Student de las diferencias de medias de radiación solar por heliofanía (cal/cm ² /día) en el periodo de 40 a 20 días pre floración	27
10. Medias y prueba t de Student de las diferencias de medias de número de días con temperatura mínima menor a 15 °C en el periodo de 40 a 20 días pre floración	29
11. Medias y prueba t de Student de las diferencias de medias de radiación solar por heliofanía (cal/cm ² /día) en el periodo de 10 días pre y 10 días pos floración.....	31
12. Medias y prueba t de Student de las diferencias de medias de temperatura mínima (°C) en el periodo de 10 días pre y 10 días pos floración	33
13. Medias (ajustadas por mínimos cuadrados) y prueba t de Student de las diferencias de medias de rendimiento en función de época de siembra.....	37
14. Medias y prueba t de Student de las diferencias de medias de panojas por metro cuadrado	39
15. Medias (ajustadas por mínimos cuadrados) y prueba t de Student de las diferencias de medias de % de esterilidad.....	43
16. Medias (ajustadas por mínimos cuadrados) y prueba t de Student de las diferencias de medias de peso de mil granos por cultivar	45
17. Efecto directo e indirecto de los componentes sobre rendimiento de todos los cultivares, en todas las épocas de siembra	49

18. Efecto directo e indirecto de los componentes sobre rendimiento de todos los cultivares, en época de siembra temprana e intermedia	51
19. Efecto directo e indirecto de los componentes sobre rendimiento de cultivares del subtipo Índica en todas las épocas de siembra	54
20. Efecto directo e indirecto de los componentes sobre rendimiento de cultivares del subtipo Japónica tropical, en todas las épocas de siembra	57
21. Efecto directo e indirecto de los componentes sobre rendimiento de cultivares del subtipo Japónica tropical en fechas de siembra tempranas e intermedias.....	59

Figura No.

1. Probabilidad de temperaturas mínimas decádicas menores a 15 °C, en la Estación Agrometeorológica de la Unidad Experimental Paso de la Laguna - INIA Treinta y Tres y en la Estación Agrometeorológica de CALNU - Artigas (serie histórica: 1972-1993)	14
2. Probabilidad de temperaturas mínimas decádicas menores a 15 °C (1972-2018).....	15
3. Evolución de los rendimientos nacionales y las horas de sol acumuladas en enero, febrero y marzo	16
4. Media y ajuste de radiación solar por heliofanía (cal/cm ² /día) de 40 a 20 días floración en función de zafra.....	27
5. Media y ajuste de número de días con temperatura mínima menor a 15 °C en el periodo de 40 a 20 días pre floración en función de zafra	29
6. Media y ajuste de radiación solar por heliofanía (cal/cm ² /día) en el periodo de 10 días pre y 10 días pos floración en función de zafra	31
7. Media y ajuste de temperatura mínima (°C) en el periodo de 10 días pre y 10 días pos 50 por ciento de floración, en función de zafra	33
8. Ajuste de fecha de siembra en días pos 01/10 para todas las épocas de siembra (A) y en el subgrupo de épocas de siembra temprana e intermedia (B) en función de zafra	35
9. Ajuste de días pos 01/01 a floración para todas las épocas de siembra (A) y en el subgrupo de las épocas de siembra temprana e intermedia (B) en función de zafra...	36
10. Rendimiento en función de época de siembra y subtipo.....	37
11. Ajuste y media de rendimiento en función de la zafra.....	38
12. Ajuste y media de rendimiento (kg/ha) en función de la zafra para El Paso 144 en época de siembra temprana e intermedia	39
13. Ajuste y media de panojas por metro cuadrado función de zafra	40
14. Panojas por metro cuadrado en función de época de siembra, según subtipo	41

15. Ajuste y media de número de granos total por panoja en función de zafra	42
16. Número de granos total por panoja en función de época de siembra, según subtipo	43
17. Ajuste y media de porcentaje de esterilidad en función de zafra	44
18. Porcentaje de esterilidad en función de época de siembra	45
19. Ajuste y media de peso de mil granos en función de zafra	46
20. Peso de mil granos en función de época de siembra, según subtipo	47
21. Diagrama de análisis de sendero para rendimiento de todos los cultivares en función de los factores climáticos, en todas las épocas de siembra	48
22. Diagrama de análisis de sendero para rendimiento de todos los cultivares en función de los componentes, en todas las épocas de siembra	49
23. Diagrama de análisis de sendero para rendimiento de todos los cultivares en función de los componentes, en época de siembra temprana e intermedia	51
24. Rendimiento de cultivares del subtipo Índica en función de clima, en todas las épocas de siembra	53
25. Diagrama de análisis de sendero para rendimiento de cultivares del subtipo Índica en función de los componentes, en todas las épocas de siembra	54
26. Rendimiento de cultivares del subtipo Índica en función de clima, en todas las épocas de siembra	56
27. Diagrama de análisis de sendero para rendimiento de cultivares del subtipo Japónica tropical en función de los componentes, en todas las épocas de siembra	57
28. Diagrama de análisis de sendero para rendimiento de cultivares del subtipo Japónica tropical en función de los componentes, para épocas de siembra temprana e intermedia	59

I. INTRODUCCIÓN

En Uruguay el sector arrocerero tiene un perfil netamente exportador, siendo que 95% de la producción se destina a exportación. En 2017 la cadena arrocerera fue el sexto rubro de exportación, representando el 5% de las exportaciones agroindustriales, con un valor de producción de US\$ 447 millones. En los últimos años, a nivel global el país ha ocupado el sexto o séptimo lugar entre los exportadores de este grano, siendo reconocido internacionalmente por la calidad de su producto.

A través de la incorporación de variedades y de mejoras en el manejo del cultivo, el rendimiento promedio del país, que se encontraba estancado en 3,2 ton/ha hasta 1970, se ha incrementado a un ritmo de 100 kg/ha/año, entre 1970 y 2012. El ritmo de crecimiento ha sido aún mayor en los últimos 22 años, alcanzando 157 kg/ha/año entre 1990 y 2012. La evolución de la productividad media nacional alcanzada en los últimos 6 años indica un plateau de rendimiento con una media de 8,4 ton/ha, ubicando al cultivo en el país como el de mayor rendimiento a nivel regional.

A pesar de la alta productividad del cultivo en Uruguay, se enfrentan problemas de rentabilidad hace ya varios años debido a un incremento en los costos monetarios directos y precios de exportación estables.

La adopción tecnológica por parte de los productores ha permitido capitalizar condiciones climáticas favorables (mayor radiación y menor incidencia de bajas temperaturas en estadios reproductivos) que han afectado positivamente la expresión del rendimiento en los últimos años de la serie. Sin embargo, la identificación de parámetros climáticos como variables significativamente asociadas a las variaciones en rendimiento supone un relativo agotamiento del paquete tecnológico que podría impactar en las tasas de ganancia del futuro cercano (Pérez de Vida, 2011b).

El arroz en Uruguay es un cultivo realizado bajo riego, lo cual reduce significativamente su interacción con el ambiente, como ocurre con cultivos de secano en el país. El estrés hídrico es minimizado, por lo cual la interacción entre cultivo y ambiente se expresa a través de la incidencia de otros factores climáticos y edáficos. La identificación de los factores climáticos de mayor incidencia en la expresión del rendimiento y por ende en su estabilidad productiva es de importancia para el desarrollo de cultivares menos sensibles a los estreses ambientales.

A. OBJETIVO GENERAL

El presente trabajo tiene como objetivo general analizar, en base a información generada en condiciones experimentales durante 20 años, el comportamiento productivo de cultivares adaptados a las condiciones locales en relación a fecha de siembra y variables climáticas, logrando entender las causas de la interacción entre genotipos y ambiente.

B. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Evaluar la importancia de variables climáticas en la variación del rendimiento de cultivares adaptados según: a) subtipos Índica y Japónica tropical, b) épocas de siembra y c) su incidencia en diferentes momentos del ciclo de vida de la planta.

- Cuantificar la importancia de los componentes de rendimiento en la variación del rendimiento, según: a) subtipos y b) época de siembra.

- Estimar la incidencia de las variables climáticas en los componentes del rendimiento, según sus respectivos momentos de definición durante el ciclo del cultivo en diferentes: a) subtipos y b) época de siembra.

II. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

A. DESARROLLO DE LA PLANTA DE ARROZ

1. Aspectos generales

Las variedades de arroz cultivadas pertenecen a la especie *Oryza sativa* L. Se trata de una planta anual, de origen subtropical, y bien adaptada a un hábitat acuático y a temperaturas y humedad relativamente elevadas.

El crecimiento de una planta de arroz depende de muchos factores y puede variar con condiciones climáticas, variedad, fecha de siembra, inicio de riego, malezas, fertilización, plagas y enfermedades, entre otros (Gamarra, 1996).

La duración del ciclo de la planta de arroz puede durar entre 80 y 280 días, en Uruguay de 120 a 150 días (Chebataroff, 2012). El ciclo de un cultivar puede ser influenciado por temperatura y fotoperiodo, pero los cultivares insensibles al fotoperiodo son característicos de la agricultura moderna, por lo tanto, el factor que más influencia el largo de ciclo para un cultivar es la temperatura (Yoshida, 1981).

La división más básica del ciclo del cultivo es en tres etapas: vegetativa, reproductiva y de llenado de grano. La fase vegetativa comienza con la germinación y termina con la iniciación del primordio floral, la reproductiva comienza con la iniciación del primordio floral y termina en antesis, y la fase de llenado de grano va desde antesis hasta madurez (Moldenhauer y Gibbons, 2002).

2. Fase vegetativa

Es la fase que presenta mayor influencia en las variaciones de largo de ciclo entre diferentes genotipos en una misma localidad, o el mismo cultivar, en la misma localidad, con diferentes fechas de siembra. La duración de esta fase es altamente dependiente de la temperatura (Magalhães Junior et al., 2004).

Durante la fase vegetativa se da la etapa de macollaje, la planta llega a un nivel máximo de tallos a unos 45-50 días post siembra (dps), luego se pierden tallos y se llega a iniciación del primordio floral con el número final de macollos, adecuado al tipo de planta y densidad (Chebataroff, 2012).

3. Fase reproductiva

Abarca desde iniciación del primordio floral hasta antesis. Se caracteriza por tener una duración bastante constante, de alrededor de 30 días, variando con cultivar y clima, es independiente del fotoperiodo. Durante esta etapa se dan los eventos considerados más críticos para la formación del rendimiento. Luego de la diferenciación del primordio floral queda determinado el número potencial de granos por panoja. En esta etapa ocurre también la microesporogénesis y la floración propiamente dicha. La

incidencia de bajas temperaturas puede causar esterilidad en las flores, reduciendo la proporción de espiguillas con grano (Magalhães Junior et al., 2004).

4. Llenado de grano

Esta etapa comienza con la antesis y termina cuando la humedad promedio del grano es de alrededor del 20%, lo cual significa que no hay más deposición de carbohidratos en el grano y comienza un período de pérdida de humedad. Las condiciones en esta etapa determinan el último componente del rendimiento, peso de los granos. El grado del llenado y las condiciones climáticas durante este período determinan la calidad industrial y culinaria del grano (Ferreira y Mountauban, 1998).

Puede extenderse desde 35 a 45 días a partir de plena floración en granos finos largos, hasta 45 a 50 días en granos medios, según tipo, dimensiones y condiciones ambientales (Chebataroff, 2012).

B. RENDIMIENTO Y COMPONENTES

1. Aspectos generales

El rendimiento en grano se puede descomponer en componentes de rendimiento y calcularse según la siguiente fórmula:

$$\text{Rendimiento en grano (t/ha)} = \text{número de panojas/m}^2 \times \text{número de granos/panoja} \times \% \text{ granos llenos} \times \text{peso de mil granos (g)} \times 10^{-5}.$$

El rendimiento en grano resulta de procesos de desarrollo que están sincronizados con el crecimiento de la planta. La división del rendimiento en cuatro componentes refleja la interdependencia del rendimiento con el desarrollo secuencial de la planta (Moldenhauer y Gibbons, 2002).

Las panojas por unidad de área (Pan/m²) se determinan en la fase vegetativa, el número de panojas refleja el vigor de la planta, macollaje, densidad de plantas, fertilidad del suelo y altura de la lámina de agua. El número de granos por panoja (GrTot) se define en la fase reproductiva, todos los granos potenciales se forman durante la diferenciación panicular. El porcentaje de granos llenos, inverso del porcentaje de esterilidad (%Est) se determina en la fase reproductiva, el desarrollo de espiguillas es sensible a factores ambientales, fallas en polinización o desarrollo impiden que el grano se llene en la fase siguiente. El peso de mil granos (P1000) se define en la fase de llenado de grano, el peso de los granos llenos está determinado por metabolismo de carbohidratos y partición, por lo tanto se puede reducir por falla metabólica (Moldenhauer y Gibbons, 2002).

La producción varía entre localidades debido a diferencias ambientales y prácticas culturales. La mayor producción se asocia a alta densidad de panojas y espiguillas, y la menor producción fue asociada con baja densidad de espiguillas y baja tasa de llenado de grano (Horie et al., citados por Ferreira y Mountauban, 1998).

2. Número de panojas por unidad de área

La cantidad de panojas por metro cuadrado se establece durante el período que comprende hasta unos diez días después que se alcanza el máximo número de macollos y está muy influenciado por el suministro de nitrógeno y el nivel de radiación solar al momento del macollaje (Murata y Matsushima, citados por Ferreira y Mountauban, 1998).

El número de panojas es determinado por el número de macollos y es el factor más importante para obtener altos rendimientos. A su vez el número de macollos por metro cuadrado es dependiente de la densidad de siembra y del porcentaje de emergencia (Yoshida, 1981).

Características de macollaje son importantes para el rendimiento porque afectan el número de ápices por metro cuadrado, la uniformidad de llenado en el campo y el rendimiento de grano por panoja. Macollaje abundante es considerado desventajoso porque puede causar área foliar excesiva, sombreo, tallos estériles y menor rendimiento por granos chuzos (Wells y Faw, Jennings et al., citados por Moldenhauer y Gibbons, 2002). En el otro extremo, la eliminación del macollaje por densidad de siembra excesiva tampoco incrementa el rendimiento (Yoshida, 1981).

Según Fageria et al., citados por Fageria (2007) el número de panojas o número de granos por unidad de área es por lo general el componente más variable del rendimiento, afectando el tamaño de la fosa. Hay frecuentemente correlaciones negativas entre número de panojas y números de granos por panoja, o entre número de granos por unidad de área y porcentaje de granos llenos o peso de grano debido a los efectos compensatorios.

Una planta que se caracterice por ser macolladora puede estar garantizando un alto número de panojas, por otra parte compensar el número de panojas en detrimento del tamaño puede resultar ventajoso si la variedad no posee buena estructura de tallos, ya que panojas grandes favorecen el vuelco. Ottis y Talbert, citados por Fageria (2007) reportan una alta correlación ($R^2 > 0,85$) entre el rendimiento y la densidad de panojas.

3. Granos por panoja

Las etapas de crecimiento que abarcan desde iniciación de panoja hasta floración y de floración a madurez fisiológica son importantes para la determinación del rendimiento debido a que durante estas etapas se forma el número de granos potencial (Fageria et al., citados por Fageria, 2007). El tamaño de la panoja consta del número de granos que componen la misma; y se relaciona positivamente con la altura de planta (Yoshida, 1981).

El número de flores producidas y el número de esas flores que son polinizadas determinan el número de granos por panoja; y son determinados inmediatamente después de la diferenciación del punto de crecimiento de vegetativo a reproductivo (Jones et al., citados por Ferreira y Mountauban, 1998).

Condiciones ambientales adversas como deficiencia de nitrógeno, sequía, baja radiación solar, temperaturas extremas (bajas o altas), y enfermedades, pueden reducir el tamaño de la panoja y por ende el rendimiento. Hay una relación inversa entre tamaño de la panoja y número de panojas por unidad de área (Fageria, 2007).

4. Porcentaje de esterilidad

El término de porcentaje de esterilidad se refiere al porcentaje de granos infértiles más los granos parcialmente llenos. La esterilidad está influenciada por factores del medio ambiente, pero también está controlado genéticamente y la selección de genotipos es posible (Fageria, 2007).

Temperaturas extremadamente bajas durante el desarrollo de la panoja, en el estado meiótico de la célula madre de polen, causa incremento en la esterilidad. La radiación solar, parece afectar el llenado de grano y el porcentaje de granos llenos porque cuando la radiación solar es baja, la actividad de la fuente puede ser insuficiente para producir carbohidratos suficientes para el crecimiento de toda la espiguilla (Fageria, 2007).

En general, el porcentaje de granos llenos es de aproximadamente 85% en el arroz, en condiciones favorables (Yoshida, 1981). Cuando el número de granos llenos es más del 85%, la capacidad de fosa está limitando el rendimiento y cuando el número de granos llenos es inferior al 80%, la capacidad de suministro o fuente limita el rendimiento (Murata y Matsushima, citados por Fageria, 2007). El aumento de fotoasimilados durante la etapa de llenado es una forma para mejorar la tasa de llenado de los granos (Fageria, 2007).

Yoshida (1981) identifica otros factores que pueden estar afectando el porcentaje de espiguillas llenas: altas aplicaciones de nitrógeno, dependiendo de la variedad; vuelco asociado a altos niveles de nitrógeno, ya que interrumpe la sección por la cual se transportan los asimilados; vientos fuertes pueden causar esterilidad en floración por desecación de la planta; déficit hídrico durante la floración.

5. Peso de mil granos

El peso del grano en el arroz se expresa generalmente en términos de peso de 1000 granos en gramos. El tamaño del grano está rígidamente controlado por el tamaño de la cáscara en la mayoría de las condiciones, el peso de mil granos es de carácter varietal muy estable (Fageria, 2007).

Más del 85% de grano de arroz se compone de carbohidratos, de los cuales el componente principal es el almidón. El almidón acumulado en el grano de arroz se origina a partir de los carbohidratos asimilados en las hojas después de la floración o durante el llenado del grano, así como de los carbohidratos almacenados hasta la floración (Hayashi, citado por Fageria, 2007). Murata y Matsushima, citados por Fageria (2007) informan que la contribución de los carbohidratos producidos antes de la floración al rendimiento final de grano parecía estar entre 20-40%. Por lo tanto, 70% del

rendimiento en grano se forma a partir de los carbohidratos producidos después de la floración, la fotosíntesis después de la floración es de vital importancia para la sostenibilidad del rendimiento.

Durante el llenado, el crecimiento del grano se caracteriza por incremento de tamaño y peso a medida que almidón y azúcares se translocan desde el vástago y hojas. Se incrementa el peso seco del grano, a pesar de que el peso fresco disminuye por pérdida de agua de 58 a 20% (Yoshida, 1981).

Todas las partes de la planta, incluso el grano, experimentan un cambio de coloración, de verde a amarronado en maduración. En Uruguay puede extenderse de 35-50 días, dependiendo del tipo y dimensiones de grano, y condiciones ambientales (Chebataroff, 2012).

Temperaturas frescas pueden extender el período de llenado de grano (Jennings et al., citados por Moldenhauer y Gibbons, 2002). Temperaturas frescas y largos períodos de llenado se asocian con altos rendimientos, debido al incremento en peso de grano y/o mejor calidad de grano respecto al empaquetamiento de almidón. Un llenado de grano rápido resulta en pérdida de empaquetamiento de gránulos de almidón, y mayor incidencia de grano yesoso (Moldenhauer y Gibbons, 2002).

C. INCIDENCIA DE LA TEMPERATURA

1. Aspectos generales

Temperatura, radiación solar y lluvia inciden en el rendimiento de forma directa, afectando los procesos fisiológicos involucrados en la producción de grano, e indirectamente, a través de enfermedades e insectos. En el campo generalmente es difícil separar ambos (Yoshida, 1981).

La temperatura es el factor climático con mayor influencia en el ciclo del cultivo, para alcanzar los distintos eventos fenológicos se requiere una determinada cantidad de unidades de calor acumuladas; y las distintas variedades difieren en los valores de calor que necesitan. La metodología de cálculo que mejor se ajusta para las condiciones de Uruguay es DD50 (Degree Day 50 °F, Roel, 1997).

Temperaturas extremas son destructivas para el crecimiento de la planta, y por lo tanto definen el ambiente en el cual el ciclo de vida de la planta se puede completar. La temperatura crítica máxima y mínima, varían entre un estadio de crecimiento y otro, como se muestra en el Cuadro 1. Esas temperaturas críticas difieren de acuerdo a variedad, duración de la temperatura crítica, cambios durante el día y estado fisiológico de la planta (Yoshida, 1981).

Cuadro 1. Temperaturas críticas mínima, máxima y óptima para el crecimiento de arroz

Etapa de desarrollo	Temperaturas críticas (°C)*		
	Mínima	Máxima	Óptima
Germinación	10	45	20-35
Emergencia y establecimiento	12-13	35	25-30
Desarrollo de raíz	16	35	25-28
Elongación de hojas	7-12	45	31
Macollaje	9-16	33	25-31
Iniciación del primordio	15		
Diferenciación de la panoja	15-20	38	
Antesis	22	35	30-33
Llenado de granos	12-18	30	20-25

* Se refiere a temperatura media diaria, excepto para germinación.

Fuente: tomado de Yoshida (1989).

Los genotipos responden de manera diferente en cuanto a tolerancia al frío. En general los cultivares del subtipo Japónica tropical son más tolerantes que los del subtipo Índica (Yoshida, 1981).

La planta es más sensible a bajas temperaturas en la fase prefloración, más específicamente en la microsporogénesis (Satake, citado por Steinmetz, 2004). Yoshida (1981) propone que se considere el período de 14 a 7 días pre antesis como el más susceptible al frío, este período abarca la etapa de embarrigado. La segunda etapa más susceptible es la floración.

Temperaturas diurnas muy altas (superiores a 35 °C) también pueden causar esterilidad de espiguillas, la etapa más sensible a las temperaturas diurnas muy altas es la floración, seguida por prefloración. Hay grandes diferencias entre genotipos en cuanto a la tolerancia a temperaturas altas (Yoshida, 1989).

Daños comunes por frío son, el fracaso en la germinación, retraso en la emergencia de plántulas, retraso del crecimiento, decoloración de hojas, degeneración de

la punta de la panoja, incompleta excursión de la panoja, retraso en la floración, alta esterilidad de espiguillas y madurez irregular (Yoshida, 1981). En regiones templadas, el daño por frío es la principal restricción, limitando el área del cultivo de arroz y el largo de la duración del ciclo (De Datta, 1981).

2. Incidencia en etapa vegetativa

De 3 a 5 semanas posteriores a la siembra, la temperatura afecta la tasa de macollaje y la tasa de crecimiento relativo. Altas temperaturas incrementan la tasa de emergencia de hojas y se producen más yemas que darán macollos. Bajo condiciones de baja luz, algunas de estas yemas quizá no se desarrollen en macollos debido a una falta de carbohidratos necesarios para el crecimiento. Cuando la luz es adecuada, sin embargo, altas temperaturas incrementan el número de macollos (Yoshida, 1981).

Durante el macollaje, con temperaturas de 17 °C existe una severa inhibición de la absorción de fósforo, potasio y cloro. Las bajas temperaturas inhiben la translocación de nitrógeno, fósforo, cobre, sales y carbohidratos, lo que se traduce en un menor número de panículas (Nishiyama, citado por Ferreira y Mountauban, 1998).

Durante el crecimiento vegetativo la temperatura y la radiación solar no afectan el número de granos por metro cuadrado en IRRI (Yoshida y Parao, 1976).

3. Incidencia en etapa reproductiva

El período reproductivo del arroz es sumamente sensible a las bajas temperaturas. Períodos fríos son comunes en la zona Este del Uruguay, donde se concentra la mayor parte del cultivo, y han sido identificados como una de las principales causas de inestabilidad de rendimientos del país, limitando el uso de cultivares de origen tropical (Blanco et al., 1993).

Temperaturas diurnas muy altas (superiores a 35 °C) también pueden causar esterilidad de espiguillas, la etapa más sensible a las temperaturas diurnas muy altas es la floración, seguida por prefloración (Yoshida, 1989). Estas son difíciles de alcanzar en la zona Este del país, siendo por lo tanto las bajas temperaturas las más problemáticas.

La ocurrencia de temperaturas por debajo de 15 °C en el período pre-floración, específicamente en la microesporogénesis, puede perturbar el normal desarrollo de los granos de polen, afectado su viabilidad, y por ende reducir la fertilidad de las flores. El aumento en esterilidad de granos trae aparejada la reducción en rendimiento, sin posibilidades de compensación a través de la expansión de otros componentes de rendimiento. El período de mayor susceptibilidad en arroz se estima en 10 a 15 días prefloración (Pérez de Vida, 2011b).

Temperaturas tan bajas como 12 °C no inducirían esterilidad si solo duraran dos días, pero inducirían un 100% de esterilidad si duraran seis días. El efecto del frío puede ser menos severo en el período previo a la floración en comparación con la esterilidad que puede ocurrir durante la anthesis (Yoshida, 1981).

Sasaki y Wada, citados por Yoshida (1981) encontraron diferencias claras entre variedades para tolerancia a bajas temperaturas. Temperaturas de 14 °C por 5 días en variedades tolerantes sufrieron un 40% de esterilidad, mientras que variedades susceptibles sufrieron entre un 80 a 100% de esterilidad de espiguillas.

4. Incidencia en llenado de granos y madurez

Las temperaturas óptimas para la maduración se encuentran entre los 20 y 22 °C, con los que se logra un llenado normal y superior calidad de granos. Temperaturas por encima de los 30 °C son desfavorables, ya que pueden causar aceleramiento y desorden en la acumulación de gránulos de almidón dando lugar a espacios vacíos, lo que determina la refringencia que da origen a zonas yesosas del grano, descenso de su densidad afectando calidad y rendimientos. La rapidez en la translocación aumenta con la temperatura, pero el poder de almacenamiento baja, provocando las consecuencias mencionadas (Chebataroff, 2012).

En el norte de Japón, bajas temperaturas nocturnas (16–21 °C), excepto durante el macollaje y tarde en la maduración, favorece la producción de grano (Matsushima y Tsunoda, citados por De Datta, 1981).

En los trópicos con la temperatura media llegando 29 °C, el llenado de granos no se perjudica cuando la radiación solar es alta. Por lo tanto las variedades del subtipo Índica están mejor adaptadas a altas temperaturas, mientras que las Japónica tropical requieren menores temperaturas para un mejor llenado (Yoshida, 1981).

5. Prácticas culturales para minimizar daño por frío

Cuando la temperatura es moderadamente baja (16 °C) el porcentaje de esterilidad se incrementa con el aumento de nitrógeno suplementado. El estatus de nitrógeno puede afectar el número de macollos, tamaño de panojas y altura de planta. El incremento en el crecimiento y densidad de macollos bajo alta suplementación de nitrógeno podría causar plantas con ápices posicionados muy por encima del agua de inundación (Yoshida, 1981).

Satake, citado por Ferreira y Mountauban (1998), reportó que la esterilidad de las plantas de arroz fue significativamente menor con 15 cm de altura de agua de inundación que a los usuales 5 cm. Esto es así por la ubicación de las panículas, que a 15 cm quedan sumergidas en el agua; la justificativa de esta práctica es el efecto termorregulador del agua, que estancada puede ser 6 °C más alta que la temperatura ambiente durante la noche, y de 1 a 2 °C durante el día (Pedroso, citado por Steinmetz, 2004).

D. INCIDENCIA DE LA RADIACIÓN

1. Aspectos generales

La productividad de granos es influenciada por la disponibilidad de radiación solar, principalmente en la fase reproductiva y de llenado de grano (Yoshida y Parao, 1976).

Los requerimientos de radiación solar en un cultivo de arroz difieren de una etapa de crecimiento a otra. El sombreado durante la etapa vegetativa afecta levemente el rendimiento y sus componentes. Sin embargo, durante la etapa reproductiva tiene un pronunciado efecto en el número de espiguillas. Durante el llenado de grano, el sombreado provoca reducción en rendimiento, debido a una disminución en el porcentaje de espiguillas llenas (Yoshida, 1981).

Moomaw, citado por De Datta (1981), indicó una fuerte correlación entre rendimiento en grano y radiación solar durante los últimos 30 días de crecimiento del cultivo. La correlación entre la radiación solar durante 45 días previos a la cosecha (desde iniciación de la panoja hasta la madurez del cultivo) y el rendimiento en grano fue altamente significativa (De Datta y Zakate, citados por De Datta, 1981).

2. Incidencia en etapa vegetativa

El macollaje está correlacionado con la temperatura y horas de sol, mientras que el número de espiguillas por panoja y finalización del macollaje están influenciados más por la temperatura que por horas de sol. Es de notar que se obtienen más panojas con 8 horas de sol que con 4 o 6 (Munakata, citado por Ferreira y Mountauban, 1998).

3. Incidencia en etapa reproductiva

El período más crítico en cuanto a requerimientos de luz va desde la diferenciación de la panícula a 10 días previos a la madurez (Stansel, citado por Ferreira y Mountauban, 1998).

En grupos precoces se observan incrementos de 34,4 kg/ha de arroz por cada incremento en 1 cal/cm²/día, mientras que para los grupos medios ese incremento fue de 5,6 kg/ha, lo que indica una mayor respuesta a la radiación de los grupos precoces (Steinmetz et al., 2013).

Hay una fuerte correlación entre el número de granos llenos por metro cuadrado y los valores de radiación en un período que abarca desde 40 días previos a la floración hasta 10 días posteriores a la misma (Munakata, citado por Ferreira y Mountauban, 1998).

4. Incidencia en llenado de granos y madurez

Según Yoshida (1981), el llenado de grano se explica desde un 60 a 100% por fotosíntesis (de las tres hojas superiores) durante el período de llenado. La contribución

para el llenado de carbohidratos de reserva acumulados hasta la floración puede ser de hasta un 40%.

El efecto de la luz en la maduración depende de la temperatura, siendo positivo con altas temperaturas y despreciable o negativo con bajas temperaturas (Munakata, citado por Ferreira y Mountauban, 1998).

Días largos y altos niveles de radiación solar durante la maduración contribuyen a obtener altos rendimientos de granos en zonas templadas (EUA, Australia y parte de Europa, Matsushima y Tsunoda, citados por De Datta, 1981).

En estudios de sombreado en diferentes etapas de crecimiento, se encontró que el sombreado en la etapa reproductiva y de maduración reduce el peso de los mil granos. Baja radiación solar en estos períodos combinada a una alta población conduce a una significativa reducción en el peso (Yoshida y Parao, 1976).

E. CARACTERIZACIÓN DE GENOTIPOS ÍNDICA Y JAPÓNICA

1. Respuesta a la temperatura

El pasaje a estado reproductivo está en función de cada variedad. Hay tres grandes grupos de maduración. El grupo de madurez tardía son la mayoría de las variedades del subtipo Índica, son sensibles al fotoperiodo y requieren un largo de día determinado. El grupo de madurez temprana está constituido por el subtipo Japónica tropical, que no son o son muy poco sensibles al fotoperiodo, el total de días a estado reproductivo se da por acumulación de unidades térmicas. El grupo de madurez intermedia incluye los cultivares en los que hay interacción entre temperatura y fotoperiodo (Stansel, citado por Ferreira y Mountauban, 1998).

Para Vergara, citado por Ferreira y Mountauban (1998), las variedades resistentes a bajas temperaturas son las que mantienen altas tasas fotosintéticas aún a bajas temperaturas e intensidades de luz (Japónica tropical). A su vez define el rango óptimo de temperaturas para la actividad fotosintética: en variedades del subtipo Índica, 25-35 °C y en Japónica tropical 18-33 °C.

En variedades del subtipo Índica temperaturas menores a 10 °C por tres o más días causan daños durante el llenado de grano y maduración. Por su parte variedades del subtipo Japónica tropical soportan 2-3 °C menos que Índica (Stansel, citado por Ferreira y Mountauban, 1998).

2. Respuesta a la radiación solar

La producción de grano está positivamente asociada con el total de la radiación solar disponible durante embarrigado, floración y maduración del grano. Las variedades del subtipo Índica mostraron buenas producciones sobre un amplio rango de índice de área foliar, por su parte variedades del subtipo Japónica tropical requieren un índice de área foliar específico para una máxima producción. Algunas evidencias muestran diferentes capacidades fotosintéticas bajo diferentes intensidades de radiación, ya que el

espesor de las hojas y el contenido de clorofila son características varietales de probable asociación con la eficiencia fotosintética (Chang, citado por Ferreira y Mountauban, 1998).

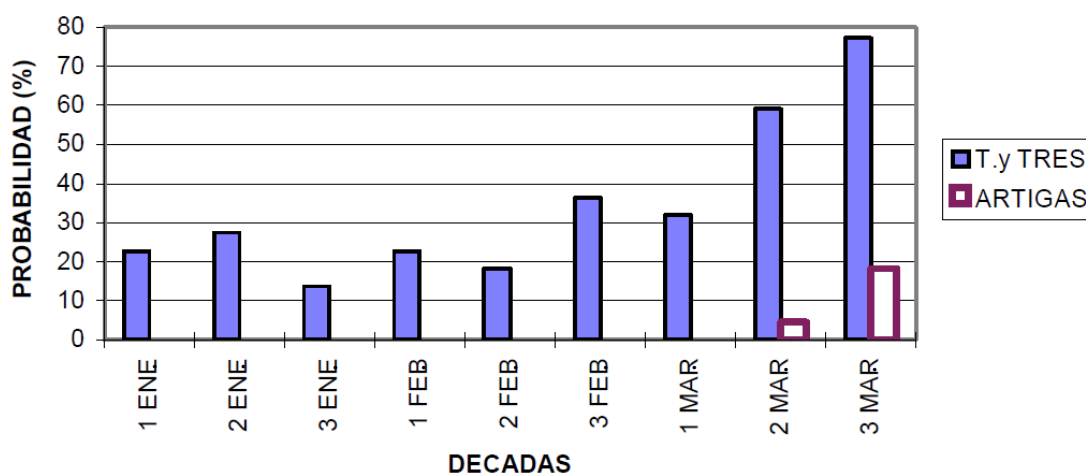
F. CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA DE LA ZONA ESTE

La ocurrencia de fríos y la falta de radiación solar son dos importantes limitantes de la producción de arroz en Uruguay y una de las principales causas de la inestabilidad de rendimientos (Blanco y Pérez de Vida, citados por Roel, 1997). Dentro de una zafra la época de siembra del cultivo determina en gran medida la posibilidad de hacer coincidir las etapas más sensibles del cultivo con los momentos de menor probabilidad de frío y mayores niveles de radiación (Deambrosi et al., citados por Roel, 1997).

La época de siembra está regulada en gran medida por las condiciones de humedad del suelo que permitan la preparación y sistematización de tierras durante el período invierno-primavera precedente a la zafra (Roel, 1997). Las lluvias en el país son muy irregulares, por lo que los valores mensuales o anuales son muy variables. El período más crítico para el arroz se da de julio a noviembre ya que en general debido al tipo de suelos mal drenados, se produce un exceso de humedad que no permite preparar bien la tierra ni sembrar en época (Macedo, 2014).

En la figura 1 se presenta la probabilidad de ocurrencia de temperaturas mínimas promedios por década por debajo de 15 °C, durante los meses de enero, febrero y marzo, en dos localidades: Treinta y Tres y Artigas. Estos promedios corresponden al análisis de una serie histórica de datos, desde el año 1972 al 1993.

Figura 1. Probabilidad de temperaturas mínimas decádicas menores a 15 °C, en la Estación Agrometeorológica de la Unidad Experimental Paso de la Laguna - INIA Treinta y Tres y en la Estación Agrometeorológica de CALNU - Artigas (serie histórica: 1972-1993)



T. y TRES = Treinta y Tres; ENE.= enero; FEB. = febrero; MAR. = marzo.

Fuente: tomado de Roel (1997).

Como puede observarse la problemática de frío es mucho menor o nula en la zona Norte del país y puede ser muy importante en la zona Este. En esta región durante el mes de enero y las dos primeras décadas de febrero existe una probabilidad de aproximadamente un 20% (uno de cada 5 años analizados) de obtener promedios decádicos menores a 15 °C, las cuales corresponden a temperaturas posibles de causar esterilidad. Hacia fines de febrero y primera década de marzo esta probabilidad aumenta a un 30%, y hacia fines de marzo supera el 50% (Roel, 1997).

Se destaca que en la región Este del país aún durante el mes de enero existe la probabilidad de sufrir los problemas de frío. En el extremo Norte del país los posibles perjuicios de bajas temperaturas comenzarían recién a manifestarse a partir de la segunda década de marzo, cuando ya ha ocurrido prácticamente la totalidad de las floraciones (Roel, 1997).

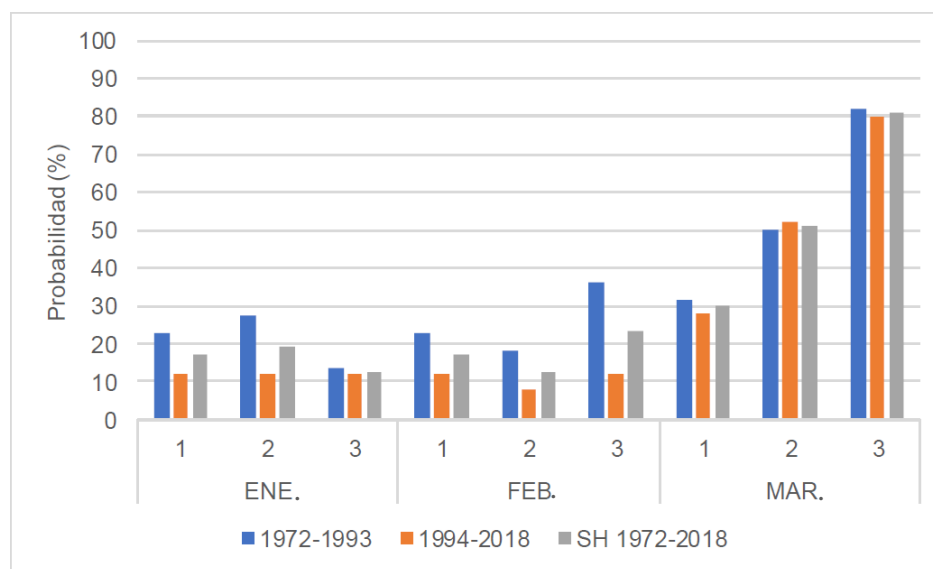
Existen algunas diferencias de temperatura promedio entre las zonas donde se produce arroz en el país. La zona Centro-Norte con una temperatura 2 °C superior a la temperatura de la zona Este. Por otra parte, el extremo Norte del país con una temperatura media 4 °C superior a la temperatura media de la zona Este, para el período comprendido entre los meses de setiembre y abril (Lavecchia, citado por Macedo, 2014).

En los últimos 21 años (1972-2018) existe una disminución en las probabilidades de ocurrencia de temperaturas menores a 15°C en los meses de enero y febrero, determinado principalmente por una reducción en los últimos años (1994-2018),

respecto a lo publicado para la serie de años 1972-2018, por Deambrosi et al., citados por Macedo et al. (2018), como se muestra en la figura 2.

No obstante, se mantiene vigente, que a medida que se atrasa la fecha de siembra, la probabilidad de ocurrencia de frío aumenta notoriamente, siendo esto más importante que el cambio en probabilidades al comparar las series (Macedo et al., 2018).

Figura 2. Probabilidad de temperaturas mínimas decádicas menores a 15 °C (1972-2018)



ENE.= enero; FEB. = febrero; MAR. = marzo.

Fuente: tomado de Macedo et al. (2018).

En el cuadro 2 se presentan las horas de sol reales de los meses en que se desarrolla el cultivo, registradas en La Estación Meteorológica de Treinta y Tres y en la de Artigas, para la serie de años desde 1981 a 1990.

Cuadro 2. Horas de sol reales para la serie de años 1981-1990

Localidad	Oct.	Nov.	Dic.	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	Período
Treinta y Tres	220,3	226,7	272,2	257,7	197	222,9	185,6	1582,4
Artigas	247,9	260,6	287,1	268,6	220,8	238,4	180,3	1703,7
Diferencia	27,6	33,9	14,9	10,9	23,8	15,5	5,3	121,3

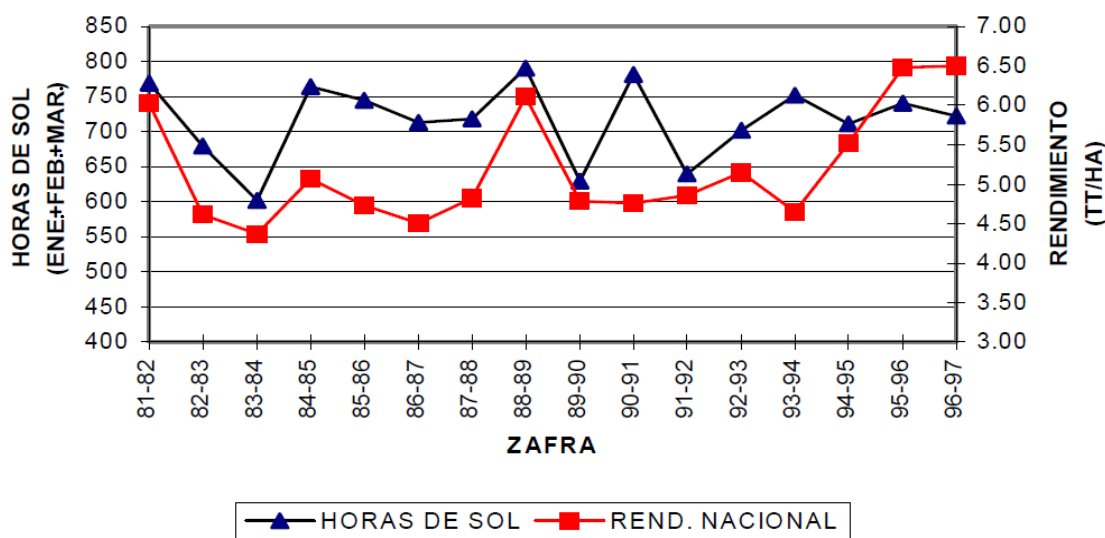
Oct. = octubre; nov. = noviembre; dic. = diciembre; ene. = enero; feb. = febrero; mar. = marzo; abr. = abril.

Fuente: tomado de Ferreira y Mountauban (1998).

Para el total del período, la zona Norte (representada por Artigas) presenta un 7,7% más de horas de sol que la zona Este (representada por Treinta y Tres). Las mayores diferencias (14%) se dan en los meses en que ocurre el período vegetativo del cultivo (octubre y noviembre), sin embargo en las etapas que son citadas en la bibliografía como las de mayor demanda lumínica, la etapa reproductiva y de llenado, que en la mayoría de los cultivos trascurren de enero en adelante, las diferencias son menores. Aunque en parte pueden ser determinantes de los mayores rendimientos obtenidos en la zona Norte, debida a la correlación existente entre rendimiento y horas de sol (Ferreira y Mountauban, 1998).

En la figura 3 se presenta la evolución de los rendimientos nacionales y las horas de sol acumuladas durante los meses de enero, febrero y marzo, registradas en la Estación Agrometeorológica de la Unidad Experimental Paso de la Laguna, INIA Treinta y Tres, desde la zafra 1981-1982 hasta la zafra 1996-1997.

Figura 3. Evolución de los rendimientos nacionales y las horas de sol acumuladas en enero, febrero y marzo



ENE.= enero; FEB. = febrero; MAR. = marzo.

Fuente: tomado de Roel (1997).

Como puede observarse existe una muy buena relación entre los totales de horas de sol en estos meses y los rendimientos nacionales, determinando el análisis estadístico de esta asociación que existe una correlación significativa entre ambas variables. En la zafra 1990-1991 a pesar de que las horas de sol acumuladas en el período fueron altas, los rendimientos fueron bajos debido a la incidencia de bajas temperaturas durante el mismo (Roel, 1997).

G. HIPÓTESIS

Considerando lo propuesto anteriormente se plantean las siguientes hipótesis:

- El rendimiento del arroz varía en función de la fecha de siembra debido a que las condiciones climáticas no son estables a lo largo de la estación de crecimiento, y por ende el cultivo puede enfrentar condiciones de estrés que reducen el nivel de algunos procesos fisiológicos.

- Las etapas más susceptibles al clima son la etapa reproductiva y llenado de granos (desde diferenciación de panoja hasta madurez fisiológica).

- En un ambiente climáticamente variable, el régimen de temperaturas y radiación incidente son los factores con mayor influencia en la productividad del cultivo.

- Los subtipos de arroz Índica y Japónica tropical utilizados en Uruguay presentan diferente interacción genotipo*ambiente, debido a su base genética. El comportamiento productivo de los cultivares del subtipo Japónica es más estable ante algunas condiciones de estrés ambiental (incidencia de bajas temperaturas) imperantes en el Este del Uruguay.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

A. UBICACIÓN

Los datos usados corresponden a ensayos realizados en la Unidad Experimental Paso de la Laguna, de Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA) Treinta y Tres, a 28 Km de la ciudad de Treinta y Tres, 33°14' Latitud Sur, 54°22' Longitud Oeste, a una altitud de 25 metros sobre el nivel del mar. Se ubican sobre suelos Solods, de la Unidad La Charqueada. Son adecuados para el cultivo de arroz por presentar un horizonte sub superficial Bt (t: sufijo usado para indicar la acumulación de arcilla en un horizonte), que minimiza las pérdidas de agua por percolación y una topografía plana (1-2% de pendiente) que facilita la inundación con el agua de riego.

B. FUENTE DE DATOS

1. Características agronómicas

Los datos que se analizan en el presente trabajo son de la evaluación final de cultivares, del Programa de Mejoramiento Genético de Arroz de INIA Treinta y Tres. Se realiza en la Unidad Experimental Paso de la Laguna.

La evaluación final reúne los cultivares más destacados en las etapas anteriores, por lo cual refleja el germoplasma elite del programa. Se busca expandir la información de productividad y calidad de grano en condiciones ambientales contrastantes, bajo un manejo estándar. Los distintos ambientes de productividad se generan a través de las diferentes fechas de siembra. La recolección de datos climáticos en el mismo sitio y el seguimiento de los estadios fenológicos más relevantes permiten un análisis de la incidencia de variables climáticas en el comportamiento del material genético.

2. Diseño experimental de los ensayos

Los experimentos se realizaron con diseño de bloques al azar con tres repeticiones, en parcelas de 6 surcos distanciados a 0,20 m de 3,5 m de largo utilizando una sembradora Hege 90.

La rotación que se usa para la evaluación final de cultivares es tres años de pasturas y uno de arroz. La densidad de siembra usada en la mayoría de las zafras es de 165 kg de semilla/ha.

La fertilización varía poco a lo largo de los años, la fertilización basal es de 20 kg/ha de N y 55 kg/ha de P₂O₅ en promedio, K₂O tiene un poco más de variabilidad: en las primeras zafras de la serie no se aplicaba, del 2002-2003 a 2012-2013 se aplicó 25 kg/ha y de 2013-2014 en adelante 80 kg/ha. Luego se aplica N en cobertura, 60 kg/ha en promedio, 50% en macollaje y 50% en primordio.

En el manejo de malezas varió año a año tanto el producto utilizado cuanto la dosis, la mezcla más común es: propanil, quinclorac, clomazone y Ciperex a 3,5, 1,5, 0,8 l/ha y 0,25 kg/ha.

El manejo de enfermedades es variable en los diferentes años, pero el momento de aplicación es igual: preventiva a 50% de floración. Se observan casos de doble aplicación, en embuchado y fin de floración, generalmente cuando se siembra tardíamente, ya que las condiciones ambientales son más predisponentes al desarrollo de enfermedades.

3. Determinación y registros

Para los cultivares en análisis se determinaron: rendimiento de grano a cosecha, número de panojas por metro cuadrado (Pan/m²), granos totales por panoja (GTot), porcentaje de esterilidad (%Est) y peso de mil granos (P1000).

Para determinar las características se procede de la siguiente manera:

Previo a la trilla se realiza un muestro con dos tomas (en surcos distanciados a 0,2 m) de 0,30 m lineales para la estimación de componentes de rendimiento. Se desborda un surco de cada lado y 0,25 m en cada cabecera. Se cosecha 2,4 m². Se realiza la trilla con una trilladora experimental eléctrica estacionaria marca Almaco.

Se cuenta la totalidad de panojas en la muestra y se corrige a m². De quince panojas obtenidas en el muestreo, se determinan el número de granos llenos, medios y vacíos (chuzos) por panoja cuya suma es el número de granos totales.

Se determina % de esterilidad de la siguiente forma: (granos chuzos / granos totales) *100.

Se pesa una submuestra de cinco gramos y se cuenta el número de granos que contiene, el peso de 1000 granos se obtiene por regla de tres.

4. Fuente de datos climáticos

La información climática fue extraída del banco de datos agroclimatológicos del Portal INIA. GRAS, recabada en la estación de INIA Treinta y Tres.

Para este trabajo se recopilaron datos diarios de: temperatura máxima (TMÁX) y mínima (TMÍN) en °C, número de días con temperatura mínima inferior a 15°C (DÍAST<15) y radiación solar por heliofanía en cal/cm²/día (RAD), para los momentos que se definen para estudiar más adelante, desde la zafra de 1996-1997 hasta la zafra de 2015-2016.

C. CULTIVARES INCLUIDOS EN EL ESTUDIO

En el presente trabajo se incluyen cuatro cultivares, El Paso 144 (EP144) e INIA Olimar (Olimar) que pertenecen al subtipo Índica; INIA Tacuarí (Tacuarí) y Parao, subtipo Japónica tropical. En año que aparece por primer vez y los años en estudio de cada cultivar se muestran en el cuadro 3.

Cuadro 3. Cultivares usados, año en que aparece por primera vez y años de evaluación en estudio

Cultivar	Año en estudio que aparece por primera vez	Años de evaluación en estudio
EP144	1996-1997	19
INIA Tacuarí	1996-1997	19
INIA Olimar	1999-2000	16
Parao	2006-2007	9

D. METODOLOGÍA EMPLEADA

En base al ciclo del cultivo y de la bibliografía se definieron cuatro períodos para evaluar la incidencia climática sobre el rendimiento y sus componentes, así como los componentes que se pueden estar definiendo en cada período.

Se tomó como día cero el 50% de floración (floración). En el cuadro 4 se muestra los días que abarca cada período y los componentes de rendimiento que se pueden estar definiendo en cada momento.

Cuadro 4. Períodos definidos para evaluar la incidencia del clima y los componentes de rendimiento que se pueden estar definiendo

Período	Días que abarca	Componente que se puede estar definiendo
0	40-20 días pre floración	Pan/m ² , GrTot8
1	20 días pre floración	Pan/m ² , GrTot
2	10 días pre y 10 días pos floración	%Est, P1000
3	20 días pos floración	P1000

Pan/m² = panojas por metro cuadrado; GrTot = granos totales por panoja; %Est = porcentaje de esterilidad; P1000 = peso de mil granos.

Las variables climáticas evaluadas se seleccionaron en base a la bibliografía y se descartaron variables cuya correlación con otras variables era muy alta. Las variables climáticas utilizadas fueron TMÍN, TMÁX, DÍAST<15 y RAD. Para cada período se hizo un promedio de TMÍN, TMÁX y RAD, y suma de DÍAST<15.

Para el estudio de épocas de siembra (ES), las mismas se caracterizaron en tempranas (aquellas sembradas entre el 1/10-15/10 de cada año), intermedias (15/10-15/11) y tardías (posteriores al 15/11).

E. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

El análisis se realizó con el software JMP 13.0, de SAS Institute Inc.

Para la caracterización de rendimiento, clima y componentes de rendimiento se usó prueba t de Student ($\alpha=0,05$) de diferencias de medias ajustadas por mínimos cuadrados y en algunos casos se hizo un ajuste lineal en función de zafra tratando de detectar tendencias en el tiempo.

Para analizar rendimiento en función de variables climáticas, rendimiento en función de componentes de rendimiento, y componentes de rendimiento en función de variables climáticas se utilizó el análisis de sendero, usando las medias de bloques.

El análisis de sendero fue creado por Wright, citado por Li (1975) y ha sido usado ampliamente en estudios sociales, psicología y ecología. El uso de variables estandarizadas permite una presentación ordenada y comparación cuantitativa de relaciones causales hipotéticas entre variables establecidas a priori. El método se aplica a cualquier sistema con múltiples componentes interaccionando. Permite la partición de la correlación total entre dos variables en efectos directos, indirectos y efectos de causa indeterminada, los residuales.

El análisis asume que todas las variables relevantes están identificadas, los efectos son lineares, aditivos, unidireccionales y que los residuales no están correlacionados (Wright, citado por Li 1975, Li 1975). Esas asunciones no siempre se cumplen.

Para analizar rendimiento en función de componentes de rendimiento el modelo de regresión utilizado es: $Y = a + bx + \epsilon$

Dónde: Y = rendimiento

a = término independiente o intercepto

b = parámetro (pendiente)

x = Pan/m², GrTot, %Est, P1000

ϵ = Error experimental

En el análisis de rendimiento en función de variables climáticas, o componentes de rendimiento en función de variables climáticas se seleccionaron los factores climáticos de mayor relevancia con el método paso a paso (stepwise); se utilizó el siguiente modelo de regresión: $Y = a + bx + \epsilon$

Dónde: Y = rendimiento, Pan/m², GrTot, %Est, P1000

a = término independiente o intercepto

b = parámetro (pendiente)

x = TMÍN, TMÁX, RAD, DÍAST<15

\mathcal{E} = Error experimental

IV. RESULTADOS

A. CLIMA

1. Caracterización climática de las zafras en estudio

A continuación se presenta un resumen de los parámetros climáticos evaluados para los meses de enero, febrero y marzo, momento en que ocurren los eventos estudiados en la mayoría de los cultivos. Los datos se extrajeron del Banco de datos agrometeorológicos del Portal INIA. GRAS, para la estación INIA Treinta y Tres en las zafras en estudio en el presente trabajo: 1996-1997 a 2015-2016, y se comparan con el promedio histórico para esa estación, del año 1971 al 2017.

En el cuadro 5 se muestra el promedio de radiación solar para todas las zafras en estudio, promedio de las zafras en estudio y promedio histórico.

Cuadro 5. Promedio de radiación solar por heliofanía ($\text{cal}/\text{cm}^2/\text{día}$) según mes y zafra

Zafra	Enero	Febrero	Marzo	P.
1996-1997	530,1	427,9	414,8	457,6
1997-1998	456,3	436,7	352,2	415,0
1998-1999	477,9	480,8	392,5	450,4
1999-2000	545,6	451,0	375,7	457,4
2000-2001	503,5	462,9	347,8	438,1
2002-2003	572,1	422,0	362,6	452,2
2003-2004	518,9	507,9	401,5	476,1
2004-2005	532,7	451,4	373,1	452,4
2005-2006	480,0	451,1	387,2	439,4
2006-2007	521,6	452,4	325,7	433,3
2007-2008	530,0	444,4	390,3	454,9
2008-2009	505,4	482,4	383,0	456,9
2009-2010	525,2	393,2	392,1	436,8
2010-2011	504,8	454,5	397,7	452,3
2011-2012	536,2	408,6	386,1	443,7
2012-2013	527,2	447,7	398,5	457,8
2013-2014	456,7	384,7	385,9	409,1
2014-2015	495,9	463,7	402,1	453,9
2015-2016	504,2	481,8	342,3	442,8
P. serie	511,8	447,6	379,5	446,3
P. histórico	516,2	451,2	384,0	450,5

P. = promedio.

Comparando los promedios de cada zafra y el promedio histórico, zafras como 1997-1998 y 2013-2014 se destacan por menor radiación, y 2003-2004 por una radiación mayor al promedio. Mirando los meses individualmente se ve el mismo comportamiento que en promedio por zafra, y además en enero de 2002-2003 la radiación es 60 cal/cm²/día mayor que el promedio histórico y en marzo de 2006-2007 es 60 cal/cm²/día menor.

En el cuadro 6 se presenta la temperatura máxima en °C para todas las zafras, promedio de las zafras en estudio y promedio histórico. Se observa que en el promedio de los tres meses de 1997-1998 la temperatura máxima es casi 3 °C menor que en el promedio histórico. En el 2004-2005 la temperatura máxima promedio alcanzó los 29,68 °C.

Cuadro 6. Temperatura máxima (°C) por mes y zafra

Zafra	Enero	Febrero	Marzo	P.
1996-1997	31,81	27,76	27,11	28,90
1997-1998	25,91	26,46	24,84	25,74
1998-1999	27,23	27,77	28,27	27,76
1999-2000	30,41	28,52	26,20	28,38
2000-2001	29,16	29,43	27,73	28,77
2002-2003	29,63	28,25	26,72	28,20
2003-2004	29,34	28,54	27,82	28,57
2004-2005	31,81	29,76	27,47	29,68
2005-2006	29,46	28,88	26,85	28,40
2006-2007	30,63	29,91	26,64	29,06
2007-2008	28,44	27,66	26,79	27,63
2008-2009	29,18	28,80	26,95	28,31
2009-2010	29,49	28,31	27,43	28,41
2010-2011	31,50	28,74	26,67	28,97
2011-2012	30,67	29,58	27,47	29,24
2012-2013	28,75	27,42	25,48	27,22
2013-2014	29,95	27,98	26,12	28,02
2014-2015	29,31	28,97	29,13	29,14
2015-2016	29,92	30,44	25,69	28,68
P. serie	29,61	28,59	26,92	28,37
P. histórico	29,43	28,50	26,90	28,28

P. = promedio.

En el cuadro 7 se presenta la temperatura mínima promedio por mes y para las zafras en estudio, así como el promedio por zafra, por mes y el promedio de la serie

histórica. Se observa que la temperatura mínima en el promedio del período estudiado fue levemente mayor al período histórico. Comparando el promedio de zafra y el promedio histórico se ve que en 2000-2001 la mínima fue 2,3 °C mayor, y en 2012-2013 1,29 °C menor.

Cuadro 7. Temperatura mínima (°C) según mes y zafra

Zafra	Enero	Febrero	Marzo	P.
1996-1997	18,37	16,30	14,22	16,30
1997-1998	16,17	16,55	14,76	15,83
1998-1999	15,89	15,84	17,14	16,29
1999-2000	16,57	16,27	13,41	15,42
2000-2001	18,58	18,44	18,52	18,51
2002-2003	16,30	17,51	15,34	16,38
2003-2004	17,03	14,92	14,44	15,46
2004-2005	16,15	16,46	14,12	15,58
2005-2006	16,50	15,79	14,81	15,70
2006-2007	16,92	17,27	17,05	17,08
2007-2008	16,54	17,95	15,19	16,56
2008-2009	16,11	16,50	16,59	16,40
2009-2010	17,32	19,24	15,53	17,36
2010-2011	18,12	16,88	12,43	15,81
2011-2012	15,69	18,92	15,78	16,80
2012-2013	15,83	16,56	12,35	14,91
2013-2014	18,25	19,36	14,06	17,22
2014-2015	17,16	16,60	14,62	16,13
2015-2016	16,69	17,97	14,90	16,52
P. serie	16,85	17,12	15,01	16,33
P. histórico	16,75	16,87	14,98	16,20

P. = promedio.

En el cuadro 8 se presenta el número de días con temperatura mínima menor a 15°C por mes, zafra, promedio para cada mes y cada zafra, y el promedio histórico. En enero, 2000-2001 y 2010-2011 se destacan por pocos días con temperatura menor a 15 °C, 1998-1999 y 2011-2012 tienen más días fríos que el promedio. En febrero, 2013-2014 y 2007-2008 tienen solo 2 días con temperatura menor a 15 °C, mientras que 2003-2004 tiene el doble de días fríos que el promedio.

Cuadro 8. Número de días con temperatura mínima menor a 15°C según mes y zafra

Zafra	Enero	Febrero	Marzo	P.
1996-1997	7	9	17	11
1997-1998	13	10	15	13
1998-1999	14	10	10	11
1999-2000	9	9	21	13
2000-2001	5	5	5	5
2002-2003	10	8	17	12
2003-2004	6	16	14	12
2004-2005	10	7	17	11
2005-2006	9	12	14	12
2006-2007	9	5	9	8
2007-2008	11	2	15	9
2008-2009	10	10	7	9
2009-2010	7	5	14	9
2010-2011	4	9	24	12
2011-2012	14	5	14	11
2012-2013	12	10	25	16
2013-2014	6	2	19	9
2014-2015	7	10	17	11
2015-2016	11	7	15	11
P.	9	8	15	11
P. histórico	9	8	15	11

P. = promedio.

En marzo en el promedio de la serie hay mucho más días fríos que en los otros meses. Se destaca la zafra 2000-2001 por tener solo 5 días con temperatura menor a 15 °C, por otro lado en 2012-2013 y 2010-2011 hubo más de 24 días fríos.

2. Caracterización de variables

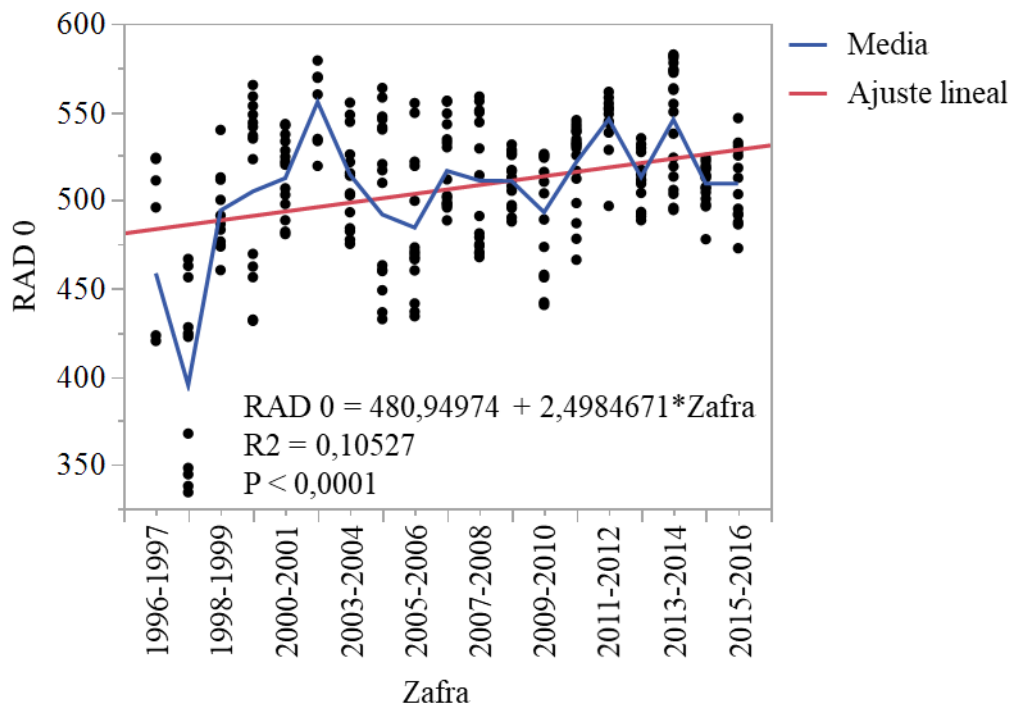
A continuación se analizan las variables climáticas en los períodos definidos en la bibliografía como los más importantes en construcción del rendimiento.

a. Radiación solar por heliofanía (cal/cm²/día) de 40 a 20 días pre floración

En la figura 4 se presenta la media y ajuste de RAD 0 en función de la zafra. Según este modelo, RAD 0 aumenta de forma significativa, con un b de 2,5 cal/cm²/día en el período de estudio. El R² (0,105) indica una importante dispersión de los datos. En el cuadro 9 se presentan las medias ajustadas por mínimos cuadrados y prueba t de Student de las diferencias de medias de RAD 0. El ANAVA indica una variación

significativa entre zafros, siendo superiores los registros en 2002-2003, 2011-2012 y 2013-2014 ($P=0,05$). En el cuadro 5, alta RAD 0 en esas zafros se asocia a la mayor radiación de enero respecto al promedio histórico; siendo menor o igual en los meses de febrero y marzo a dicha referencia.

Figura 4. Media y ajuste de radiación solar por heliofanía ($\text{cal}/\text{cm}^2/\text{día}$) de 40 a 20 días floración en función de zafra



RAD 0 = radiación solar por heliofanía ($\text{cal}/\text{cm}^2/\text{día}$) de 40 a 20 días pre 50 por ciento de floración.

En 1996-1997 y 1997-1998, RAD 0 es significativamente menor que en las demás zafros. Comparando con lo presentado en el cuadro 5, se observa que 1996-1997 tiene menor radiación que el promedio histórico en febrero, mientras que 1997-1998 tienen menor radiación en enero y febrero.

Cuadro 9. Medias y prueba t de Student de las diferencias de medias de radiación solar por heliofanía ($\text{cal}/\text{cm}^2/\text{día}$) en el periodo de 40 a 20 días pre floración

Zafra		Media
2002-2003	A	555,54
2013-2014	A	546,13
2011-2012	A	545,83

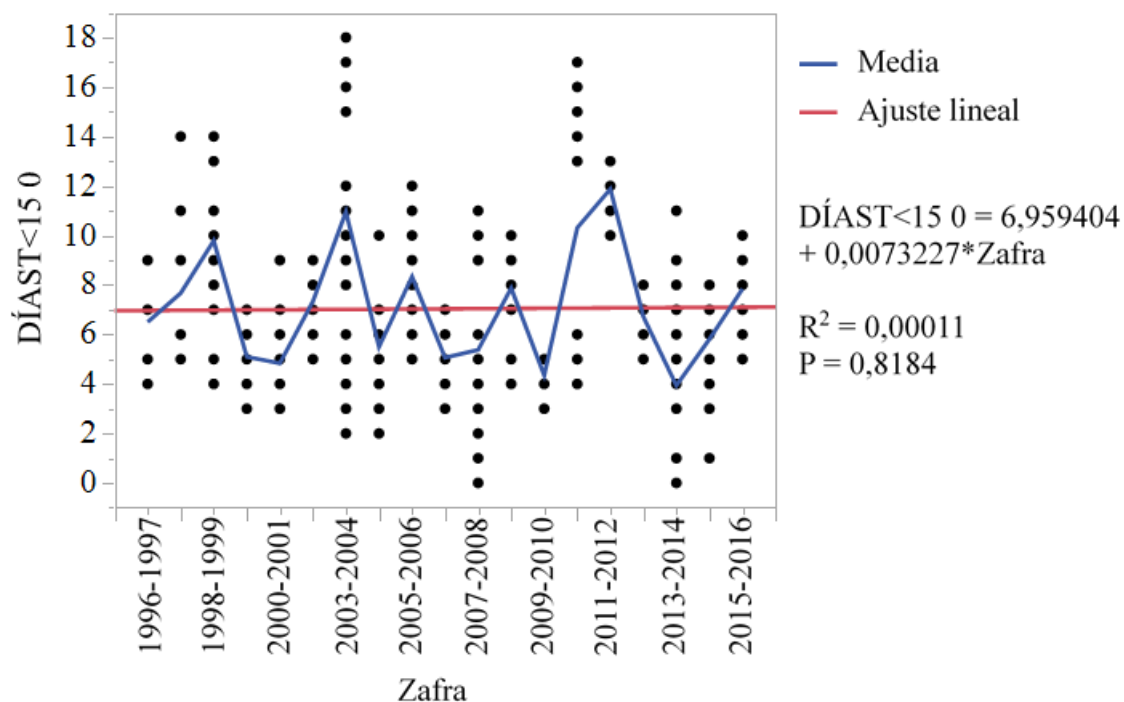
2010-2011	B				521,53
2006-2007	B	C			516,48
2003-2004	B	C			514,34
2012-2013	B	C			512,94
2000-2001	B	C	D		512,33
2007-2008	B	C	D		510,99
2008-2009	B	C	D		510,68
2014-2015	B	C	D		509,31
2015-2016	B	C	D		509,23
1999-2000		C	D	E	504,83
1998-1999			D	E F	494,04
2009-2010				E F	493,01
2004-2005				E F	491,74
2005-2006				F	484,35
1996-1997				G	458,47
1997-1998				H	395,10

$\alpha=0,05$; los niveles no conectados por la misma letra son significativamente distintos.

b. Número de días con temperatura mínima menor a 15 °C en el período de 40 a 20 días pre floración

En la figura 5 se muestra la media y ajuste de $DÍAST < 15$ 0 en función de zafra. El ajuste lineal es no significativo, destacándose una alta variabilidad interanual; la media en la serie estudiada resultó de aproximadamente 7 días con temperatura mínima menor a 15 °C.

Figura 5. Media y ajuste de número de días con temperatura mínima menor a 15 °C en el periodo de 40 a 20 días pre floración en función de zafra



DÍAST<15 0 = número de días con temperatura mínima menor a 15 °C de 40 a 20 días pre 50 por ciento de floración

En el cuadro 10 se presentan las medias de DÍAST<15 0 y prueba t de Student de las diferencias de medias de mínimos cuadrados de DÍAST<15 0 para el conjunto de todos los datos. Las zafras con más DÍAST<15 0 son 2011-2012, 2003-2004, 2010-2011 y 1998-1999, con dos y tres veces más días de bajas temperaturas respecto a las zafras 2009-2010 y 2013-2014 (de menor número de días fríos).

Cuadro 10. Medias y prueba t de Student de las diferencias de medias de número de días con temperatura mínima menor a 15 °C en el periodo de 40 a 20 días pre floración

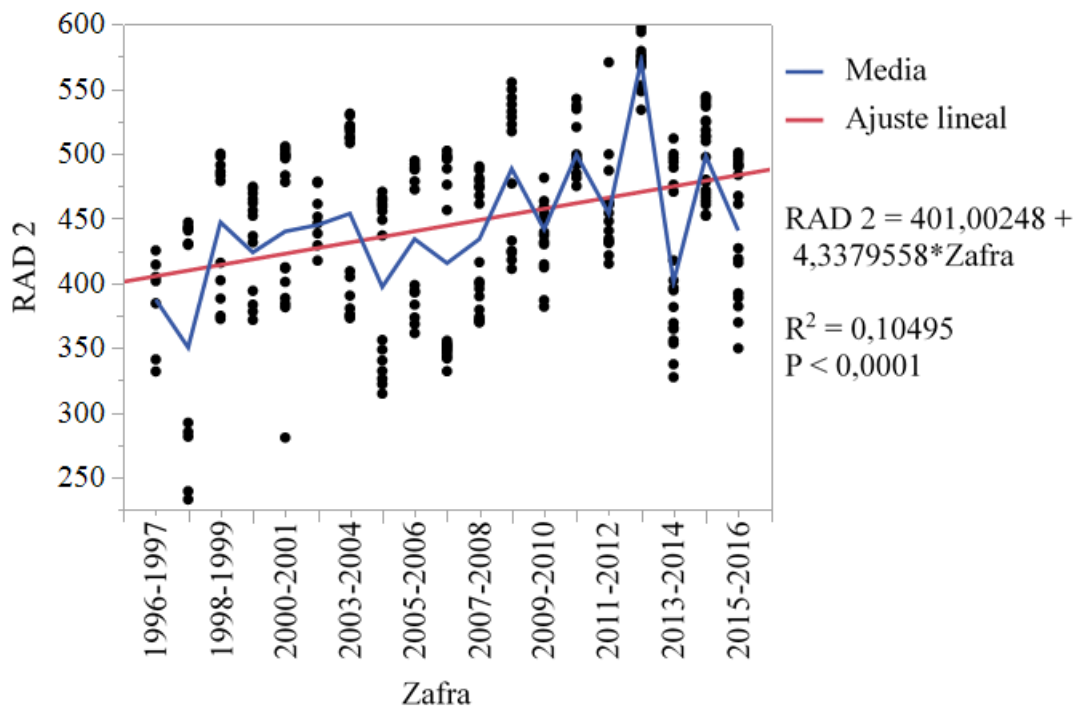
Nivel	Media
2011-2012 A	12
2003-2004 A B	11

2010-2011	B	10
1998-1999	B C	10
2005-2006	C D	8
2008-2009	D E	8
2015-2016	D E	8
1997-1998	D E	8
2002-2003	D E F	7
2012-2013	E F G	7
1996-1997	D E F G H	7
2014-2015	F G H	6
2004-2005	G H I	6
2007-2008	H I	5
1999-2000	H I J	5
2006-2007	H I J	5
2000-2001	H I J	5
2009-2010	I J	4
2013-2014	J	4

c. Radiación solar por heliofanía ($\text{cal}/\text{cm}^2/\text{día}$) 10 días pre y 10 días pos floración

En la figura 6 se presenta media y ajuste lineal de RAD 2 en función de zafra. Al igual que en RAD 0 el b es positivo y significativo, con una pendiente similar a la de RAD 0, $2,4 \text{ cal}/\text{cm}^2/\text{día}$. La probabilidad de que el efecto de zafra no sea significativo es menor a 0,0001.

Figura 6. Media y ajuste de radiación solar por heliofanía (cal/cm²/día) en el periodo de 10 días pre y 10 días pos floración en función de zafra



RAD 2 = radiación solar por heliofanía (cal/cm²/día) 10 días pre y 10 días posteriores a 50 por ciento de floración

En el cuadro 11 se presenta la separación de medias ajustadas por mínimos cuadrados y prueba t de Student ($\alpha=0,05$), observándolo en conjunto con la figura 6 se ve que la zafra 2012-2013 se destaca por tener la radiación más alta de toda la serie, de forma significativa. Por otro lado, 1996-1997 y 1997-1998 son significativamente menores que las demás zafras.

Cuadro 11. Medias y prueba t de Student de las diferencias de medias de radiación solar por heliofanía (cal/cm²/día) en el periodo de 10 días pre y 10 días pos floración

Zafra	Media
2012-2013 A	572,01
2010-2011 B	499,28
2014-2015 B	498,18

2008-2009	B	488,35
2003-2004	C	453,70
2011-2012	C	453,68
1998-1999	C D	446,98
2002-2003	C D E	444,87
2009-2010	C D	441,55
2015-2016	C D	440,58
2000-2001	C D E	439,95
2005-2006	C D E	433,98
2007-2008	C D E	433,97
1999-2000	D E F	423,76
2006-2007	E F	415,41
2013-2014	F	400,84
2004-2005	F	397,05
1996-1997	F G	387,24
1997-1998	G	350,22

$\alpha=0,05$; los niveles no conectados por la misma letra son significativamente distintos.

Si se compara lo dicho anteriormente con el cuadro 5 se ve que en 1997-1998, la radiación en enero fue $60 \text{ cal/cm}^2/\text{día}$ menor que en el promedio histórico, en febrero y marzo también fue menor al promedio pero la diferencia no tuvo una magnitud tan alta como en enero. 1996-1997 presentó menor radiación sobretodo en el mes de febrero.

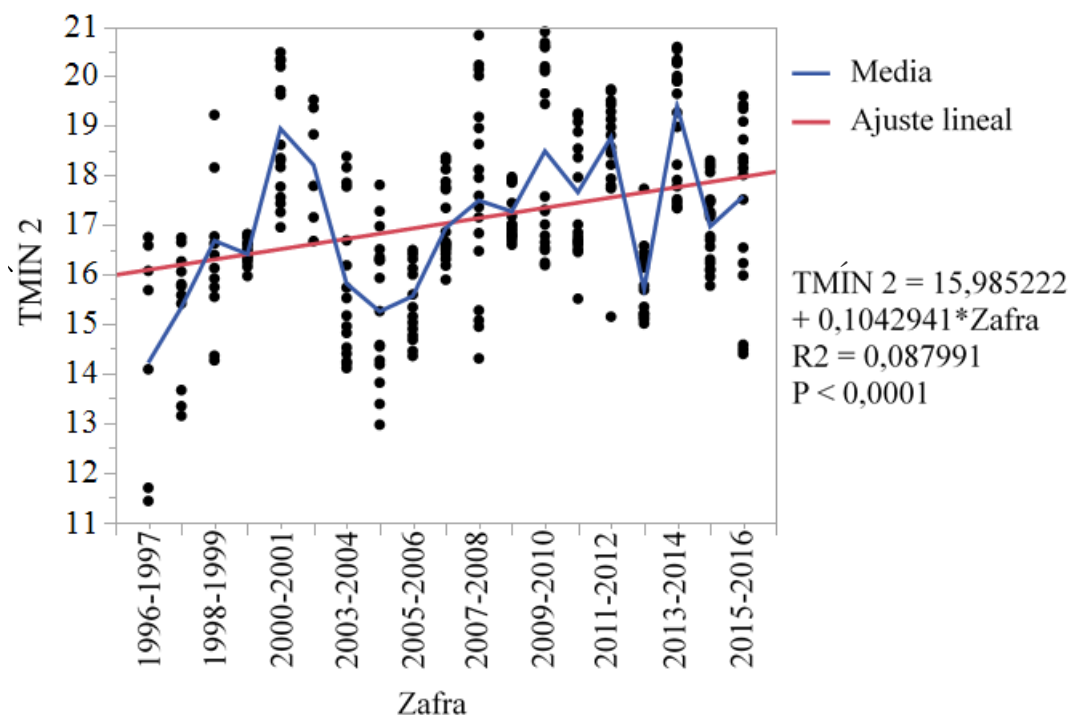
Por otro lado, en 2012-2013 la radiación fue mayor al promedio histórico en los meses de enero y marzo: 11 y $15 \text{ cal/cm}^2/\text{día}$, respectivamente.

d. Temperatura mínima ($^{\circ}\text{C}$) 10 días pre y 10 días pos floración

En la figura 7 se muestran las medias y ajuste para TMÍN 2 en función de zafra. La temperatura aumenta de forma significativa, a una tasa de $0,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ por zafra. El

incremento en el tiempo de radiación y temperatura puede deberse a cambios en la fecha de siembra, con siembras más tempranas el cultivo percibe mejores condiciones.

Figura 7. Media y ajuste de temperatura mínima (°C) en el periodo de 10 días pre y 10 días pos 50 por ciento de floración, en función de zafra



TMÍN 2 = temperatura mínima (°C) 10 días pre y 10 días pos 50 por ciento de floración.

En el cuadro 12 se presenta la separación de medias por prueba t de Student. Las zafra con mayor TMÍN 2 son 2013-2014 y 2000-2001, que son significativamente mayores que las zafra de menor temperatura. La zafra 1996-1997 es significativamente menor a las demás zafra

Cuadro 12. Medias y prueba t de Student de las diferencias de medias de temperatura mínima (°C) en el periodo de 10 días pre y 10 días pos floración

Zafra	Media
2013-2014 A	19,40
2000-2001 A B	18,94
2011-2012 B	18,77
2009-2010 B	18,49

2002-2003	B C	18,21
2010-2011	C D	17,66
2015-2016	C D	17,57
2007-2008	C D E	17,49
2008-2009	D E F	17,27
2014-2015	E F G	16,96
2006-2007	E F G	16,93
1998-1999	F G	16,68
1999-2000	G H	16,41
2003-2004	H I	15,81
2012-2013	I	15,70
2005-2006	I	15,56
1997-1998	I	15,33
2004-2005	I	15,25
1996-1997	J	14,21

$\alpha=0,05$; los niveles no conectados por la misma letra son significativamente distintos.

Comparando con lo presentado en el cuadro 7, en donde se presentan los promedios mensuales para cada zafra y el promedio histórico mensual, se ve que la zafra 1996-1997 tiene temperatura mínima menor al promedio en febrero y marzo, la diferencia es menor a 1°C.

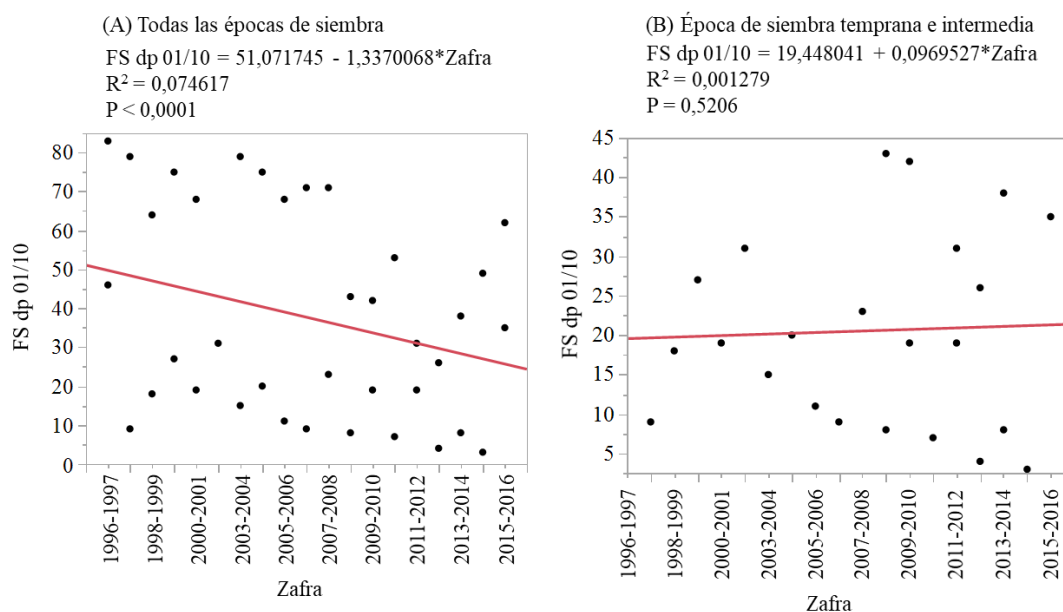
2013-2014 presenta temperatura mayor al promedio histórico en enero y febrero, y 2000-2001 en los tres meses, siendo que en marzo la temperatura fue 3,5 °C mayor que la media

B. FECHA DE SIEMBRA Y FENOLOGÍA

La figura 8 muestra la fecha de siembra en días posteriores al 1° de octubre (FS dp 01/10) para las diferentes zafras, en todas las ES (A) y en el subgrupo de ES tempranas e intermedias (B). En el conjunto de todas las ES, se distingue un adelantamiento de la FS (1,35 días/zafra), de forma significativa ($p<0,0001$); mientras que, considerando el subgrupo de ES tempranas e intermedias, no hubo variaciones significativas a través de la serie de zafras analizadas. Los cambios en el manejo de los

experimentos en la serie implicaron el significativo adelantamiento en las fechas de siembra de aquellas realizadas posteriores al 15/11.

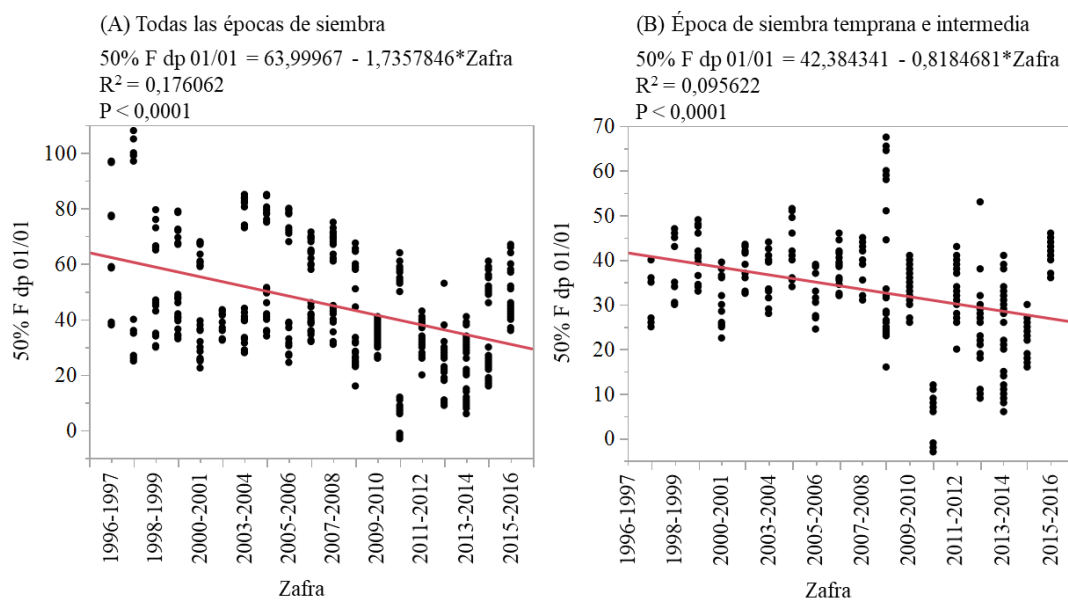
Figura 8. Ajuste de fecha de siembra en días pos 01/10 para todas las épocas de siembra (A) y en el subgrupo de épocas de siembra temprana e intermedia (B) en función de zafra



$FS\ dp\ 01/10 =$ fecha de siembra en días pos 01/10.

En la figura 9 se presenta el ajuste de un modelo lineal para 50%F expresado en número de días posteriores al 01/01 (50%F dp 01/01), para el conjunto de ES (A) y para el subgrupo ES tempranas e intermedias (B). En ambos casos, se observa un adelantamiento significativo ($P=0,001$) de la fecha de 50%F a través de las zafras. ES tempranas e intermedias (B) presenta una menor magnitud (0,8 días más temprana), respecto al conjunto de ES (A): 1,7 días más temprana.

Figura 9. Ajuste de días pos 01/01 a floración para todas las épocas de siembra (A) y en el subgrupo de las épocas de siembra temprana e intermedia (B) en función de zafra



50%F dp 01/01 = 50 por ciento de floración en días pos 01/01.

Ante la ausencia de cambios significativos en la FS en ES tempranas e intermedias, y lo descrito para 50%F, se puede inferir un acortamiento en el ciclo de los cultivares.

C. RENDIMIENTO

El rendimiento promedio en esta serie de 20 años de datos es de 7935 kg/ha.

1. Subtipos

El rendimiento no varió significativamente con los subtipos; obteniéndose 8030 y 7820 kg/ha en los subtipos Índica y Japónica tropical respectivamente (diferencia no significativa).

2. Época de siembra

Los rendimientos analizados presentaron diferencias estadísticamente significativas entre ES (cuadro 13). Las siembras tardías tienen menor rendimiento (14% menor que en ES Intermedia), mientras que las tempranas e intermedias no son significativamente diferentes entre ellas, superando la productividad obtenida en siembras tardías.

Cuadro 13. Medias (ajustadas por mínimos cuadrados) y prueba t de Student de las diferencias de medias de rendimiento en función de época de siembra

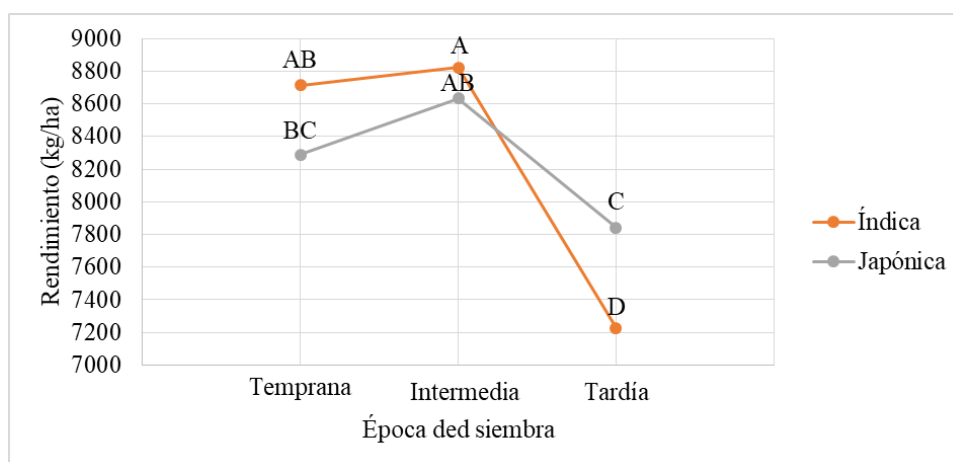
Época de siembra		Rendimiento (kg/ha)
Intermedia	A	8727
Temprana	A	8505
Tardía	B	7535

$\alpha=0,05$; los niveles no conectados por la misma letra son significativamente distintos.

3. Época de siembra y subtipo

La figura 10 muestra el rendimiento según ES y subtipo; en ES tempranas e intermedias no hay diferencias significativas entre los subtipos, aunque la media de Índica es 400 kg/ha mayor en las tempranas y se reduce en las intermedias (200 kg/ha). Por otra parte, en ES tardía los subtipos son estadísticamente diferentes, presentando Japónica tropical un rendimiento promedio 600 kg/ha ($P=0,05$) superior respecto a Índica.

Figura 10. Rendimiento en función de época de siembra y subtipo

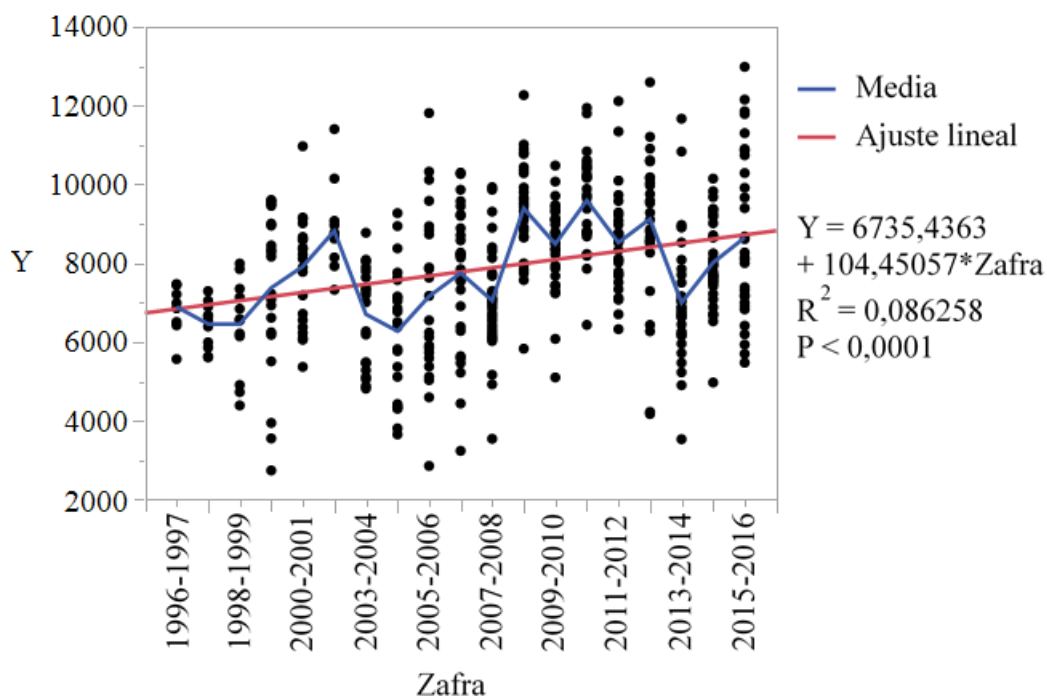


$\alpha=0,05$; los niveles no conectados por la misma letra son significativamente distintos.

4. Zafra

En la figura 11 se muestra el ajuste y media de rendimiento según zafra, considerando el conjunto de fechas de siembra y cultivares. El modelo ajustado presenta un coeficiente $b=104$ kg/ha ($P=0,0001$), indicando un crecimiento anual de la productividad en la serie de datos analizados.

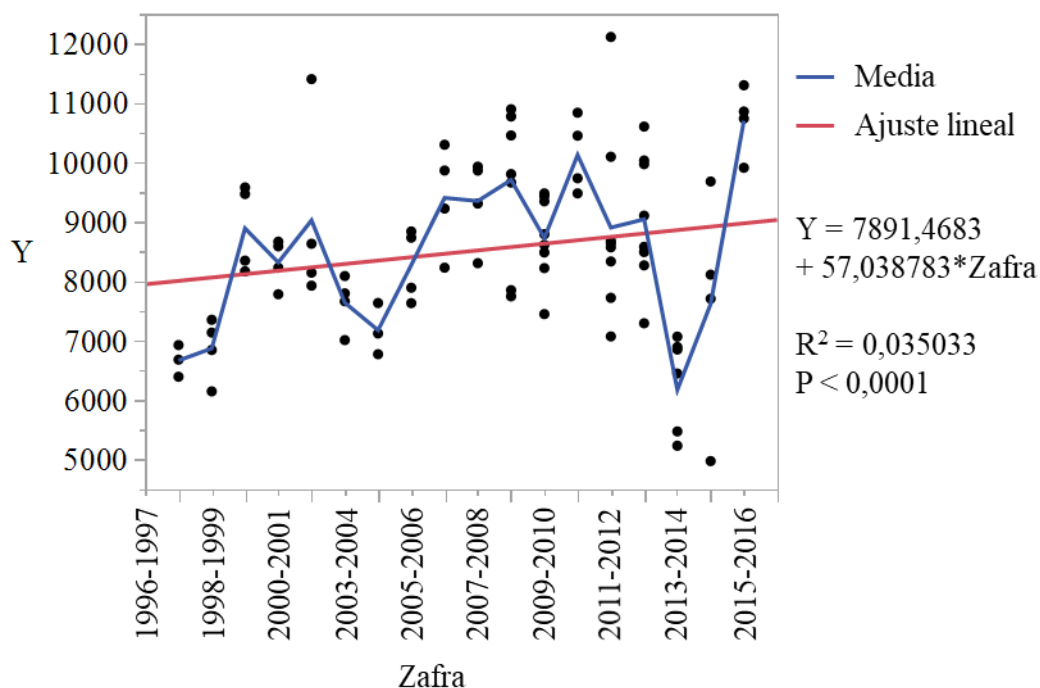
Figura 11. Ajuste y media de rendimiento en función de la zafra



Y = rendimiento (kg/ha).

Considerando solo al cultivar EP144, -presente en la totalidad de la serie de 20 años- en ES óptima (temprana e intermedia), el modelo ajustado de rendimiento según zafras indica una tendencia al aumento con $b = 57$ kg/ha ($p=0,079$; figura 12). Se puede inferir que esa tendencia al aumento de rendimiento se debe a mejores condiciones ambientales (radiación y temperatura) que percibe el cultivo en sus etapas críticas, considerando que el manejo en el campo experimental del cultivo no tuvo cambios sustanciales (por ejemplo riego temprano, control completo de malezas, fertilización nitrogenada de 80 kg/ha de N, no uso de fungicidas).

Figura 12. Ajuste y media de rendimiento (kg/ha) en función de la zafra para El Paso 144 en época de siembra temprana e intermedia



Y = rendimiento (kg/ha).

D. COMPONENTES DE RENDIMIENTO

1. Panojas por metro cuadrado

La media general de Pan/m² es 548 (cuadro 14). Los cultivares EP144 y Olimar tienen mayor número de Pan/m² que Parao y Tacuarí (P=0,05).

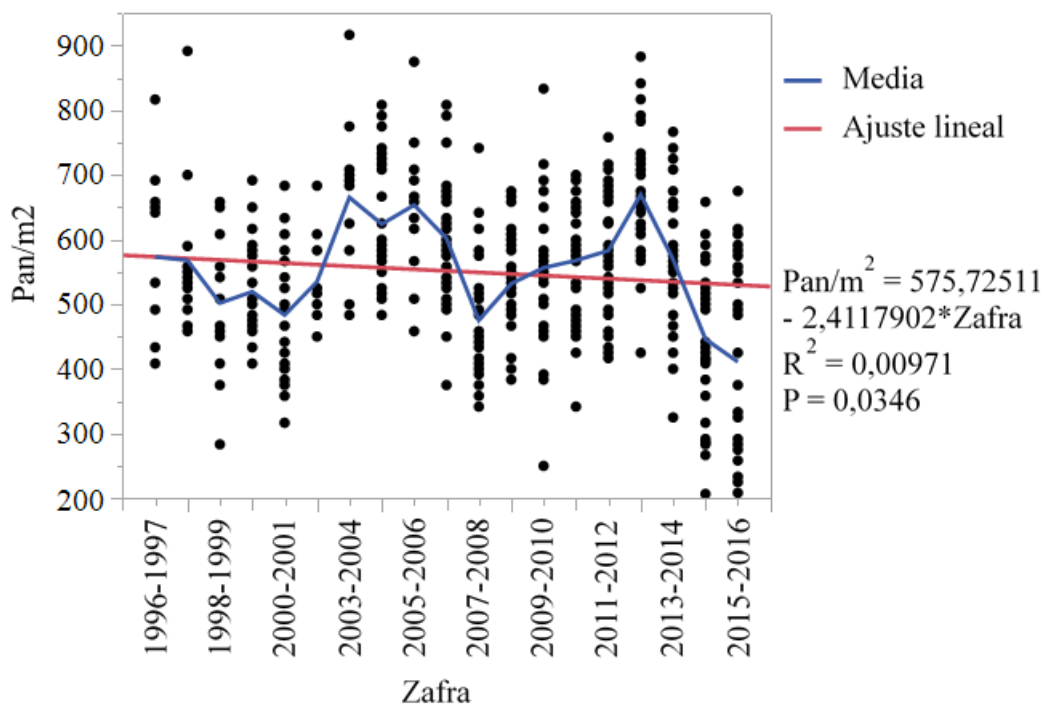
Cuadro 14. Medias y prueba t de Student de las diferencias de medias de panojas por metro cuadrado

Cultivar	Media
INIA Olimar A	588
El Paso 144 A	577
Parao B	520
INIA Tacuarí B	500

$\alpha=0,05$; los niveles no conectados por la misma letra son significativamente distintos.

La figura 13 muestra el ajuste y media de Pan/m² en función de zafra para todos los cultivares. Se observa que este componente cae de forma significativa (p=0,0346) hacia las zafras más actuales, a una tasa de 2,41 Pan/m².

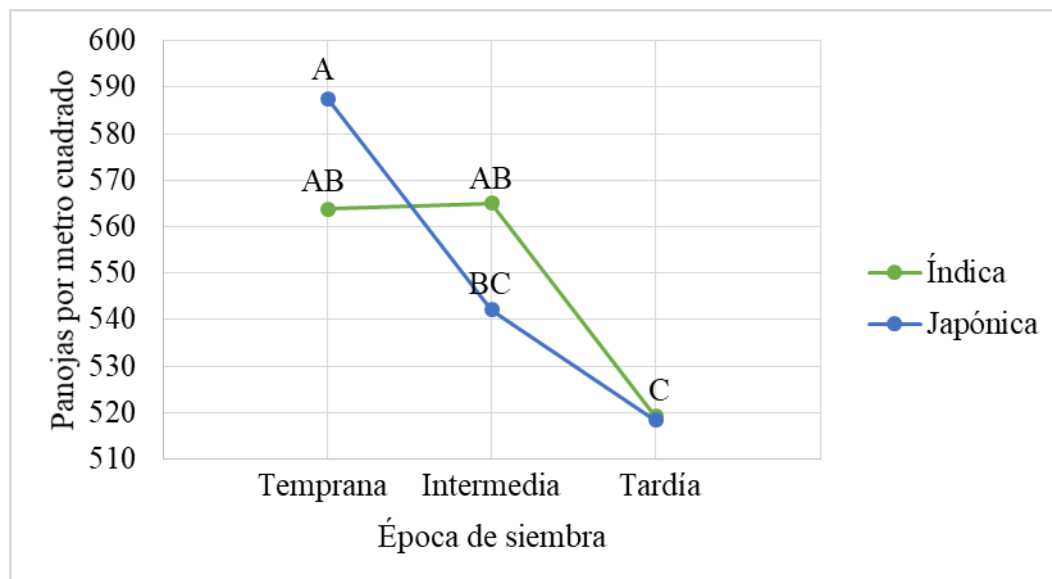
Figura 13. Ajuste y media de panojas por metro cuadrado función de zafra



Pan/m² = panojas por metro cuadrado.

Cultivares del subtipo Japónica tropical obtuvieron sus mayores valores de Pan/m² en ES tempranas, reduciendo este componente significativamente en las siembras posteriores (por ej. 50 Pan/m² menos aprox. en ES intermedia). En el subtipo Índica se presentó un comportamiento estable en siembras óptimas, disminuyendo significativamente en siembras tardías. En estas, ambos subtipos alcanzan igual número de panojas: 520 Pan/m² (figura 14).

Figura 14. Panojas por metro cuadrado en función de época de siembra, según subtipo



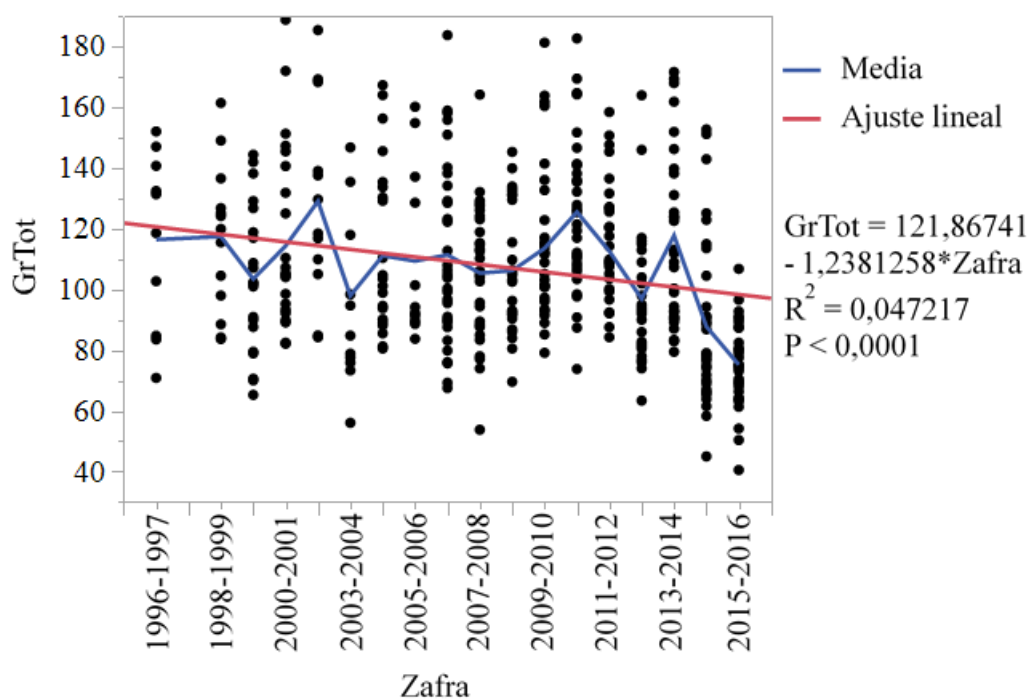
$\alpha=0,05$; los niveles no conectados por la misma letra son significativamente distintos.

2. Número de granos total por panoja

La media para este componente es 107 GrTot; mientras que los cultivares estudiados presentaron diferencias significativas siendo en EP 144 y Olimar (92 c), Parao (107b) y Tacuarí (136 a).

En la serie de zafras se registra una variación significativa en el tamaño de panículas (expresada como GrTot; figura 15). El coeficiente b es significativo y negativo, indicando una reducción en el número de granos totales por panícula en las zafras más recientes (1,2 GrTot menos a cada zafra).

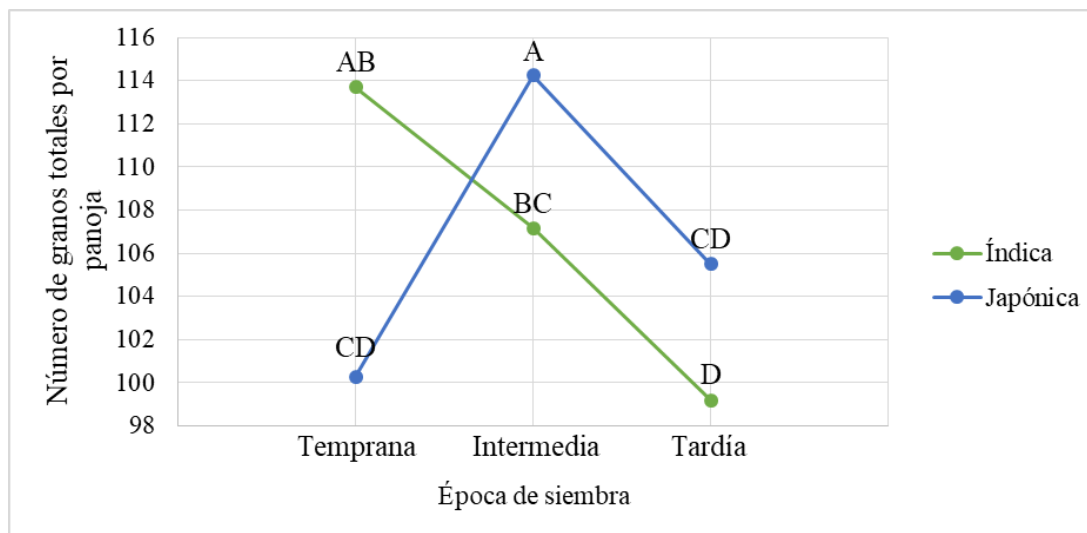
Figura 15. Ajuste y media de número de granos total por panoja en función de zafra



GrTot = número de granos total por panoja.

En el subtipo Índica la mayor expresión de este componente se obtiene en siembras óptimas, disminuyendo significativamente en siembras tardías (figura 16); mientras que en Japónica tropical se maximiza su expresión solo en siembras intermedias.

Figura 16. Número de granos total por panoja en función de época de siembra, según subtipo



$\alpha=0,05$; los niveles no conectados por la misma letra son significativamente distintos.

3. Porcentaje de esterilidad

La media general para %Est es 19. Los cultivares de mayores valores fueron Tacuarí y EP144 (21.7%); mientras que Parao, se destaca por el menor valor promedio (16%). INIA Olimar tiene un comportamiento intermedio (cuadro 15).

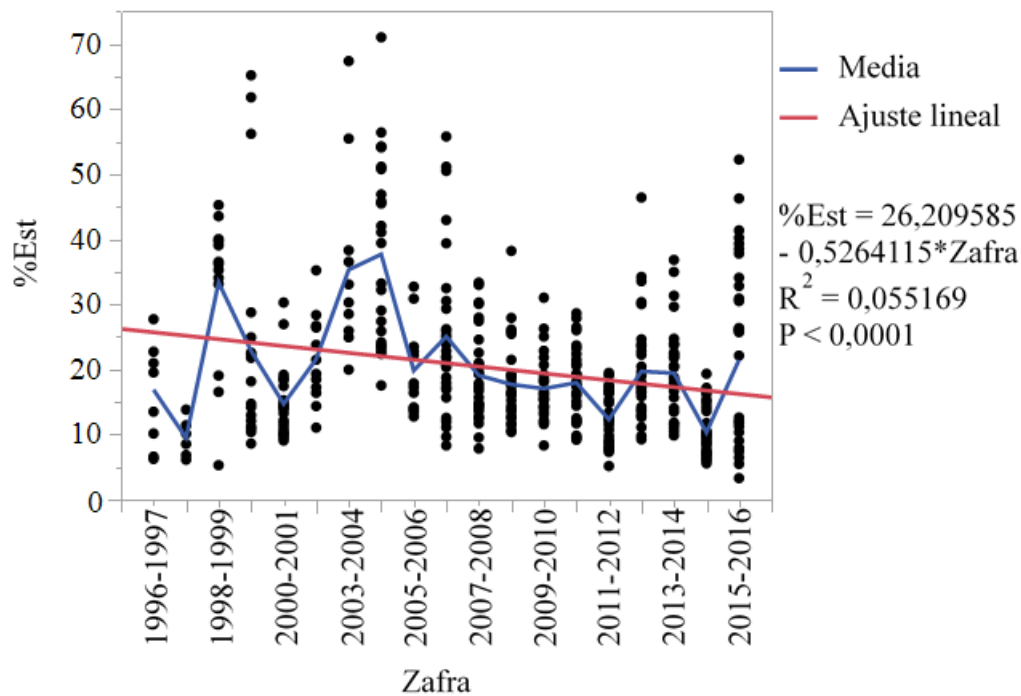
Cuadro 15. Medias (ajustadas por mínimos cuadrados) y prueba t de Student de las diferencias de medias de % de esterilidad

Cultivar		Media
INIA Tacuarí	A	21,74
El Paso 144	A B	21,70
INIA Olimar	B C	18,95
Parao	C	16,00

$\alpha=0,05$; los niveles no conectados por la misma letra son significativamente distintos.

En la serie estudiada, este componente del rendimiento presentó una alta dispersión; en la figura 17 se muestra el ajuste y media de %Est en función de zafra para todos los cultivares. El modelo ajustado presenta un b negativo, con un efecto de la zafra significativo (p valor = $<0,0001$), indicando una más efectiva formación de granos y reducción del vaneos de los mismos.

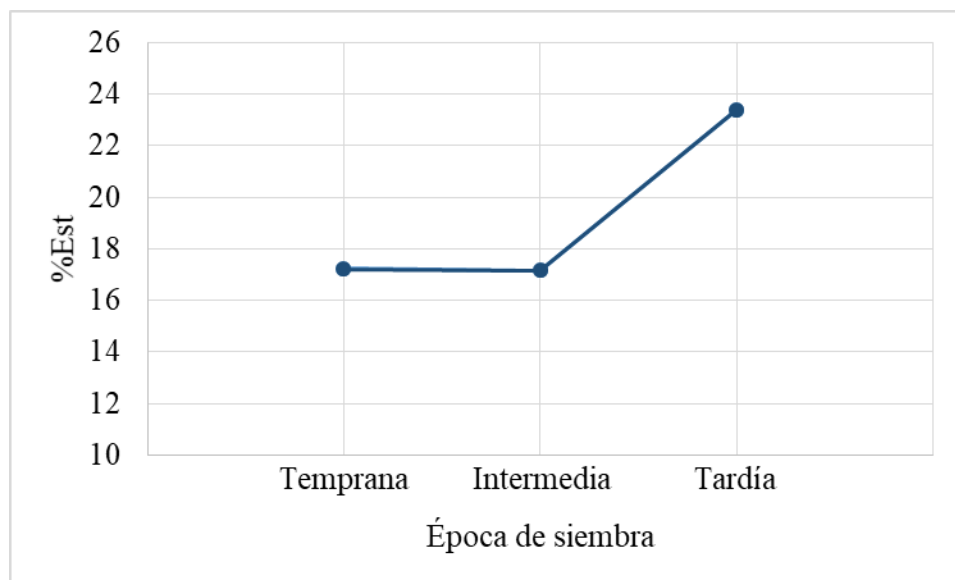
Figura 17. Ajuste y media de porcentaje de esterilidad en función de zafra



%Est = porcentaje de esterilidad.

Ambos subtipos tuvieron similar comportamiento en este componente en relación a las diferentes ES, no habiendo diferencias entre subtipos. El %Est es igual en ES temprana e intermedia, y se incrementa significativamente en ES tardías (aprox. 6%; figura 18).

Figura 18. Porcentaje de esterilidad en función de época de siembra



4. Peso de mil granos

La media general de cultivares para P1000 es 24,7. Parao es el cultivar de mayor P1000, superando estadísticamente a EP144 y Tacuarí; mientras que Olimar es similar a Parao y EP144 y superior a Tacuarí (cuadro 16).

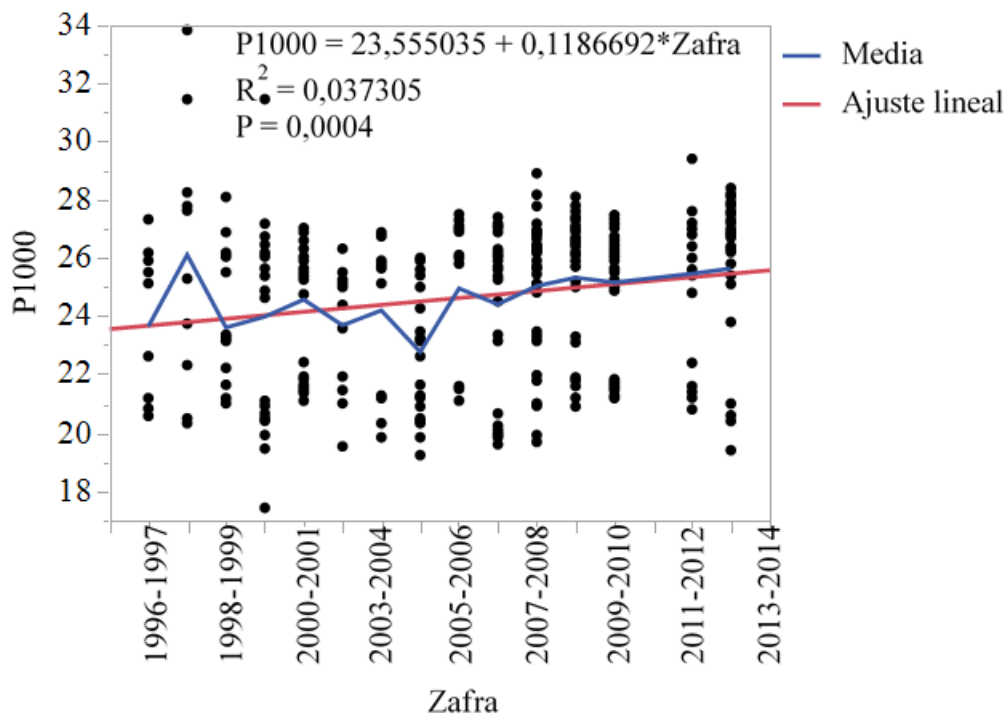
Cuadro 16. Medias (ajustadas por mínimos cuadrados) y prueba t de Student de las diferencias de medias de peso de mil granos por cultivar

Cultivar	Media
Parao A	26,6
INIA Olimar A B	26,1
El Paso 144 B	26,0
INIA Tacuarí C	21,3

$\alpha=0,05$; los niveles no conectados por la misma letra son significativamente distintos.

En la figura 19 se muestra ajuste y media de P1000 en función de zafra. El efecto de este factor es muy significativo ($p=0,0004$) con un coeficiente b indicando un aumento con una tasa de 0,1187g por año.

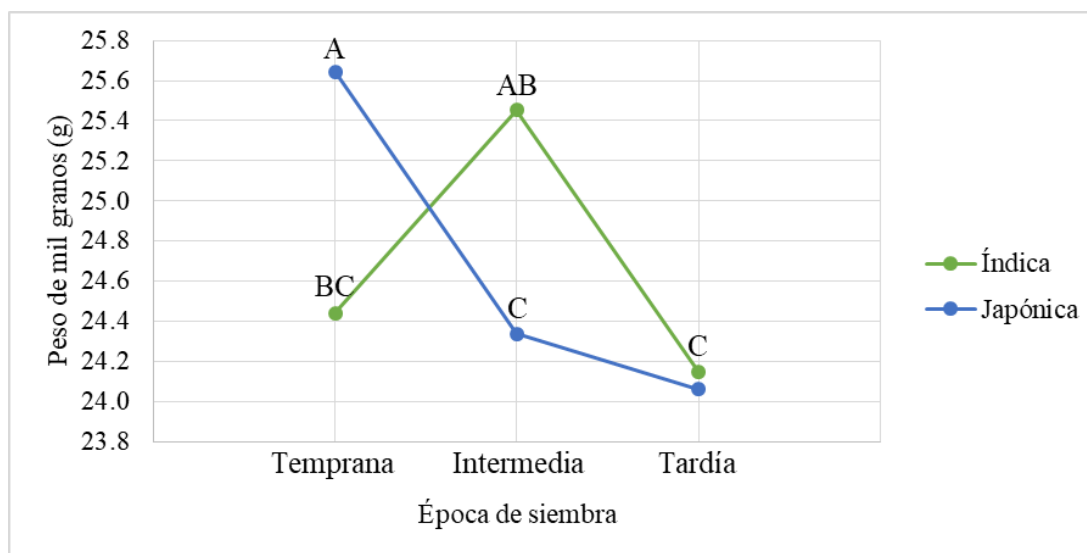
Figura 19. Ajuste y media de peso de mil granos en función de zafra



P1000 = peso de mil granos.

En la figura 20 se grafica P1000 en función de ES, por subtipo. El subtipo Índica tiene mayor P1000 en ES óptima (tempranas 24,4 e intermedias 25,5), siendo menor en las ES tardía (24,1). Por otra parte en el subtipo Japónica tropical su expresión se maximiza en siembras tempranas, disminuyendo significativamente en las posteriores.

Figura 20. Peso de mil granos en función de época de siembra, según subtipo



$\alpha=0,05$; los niveles no conectados por la misma letra son significativamente distintos.

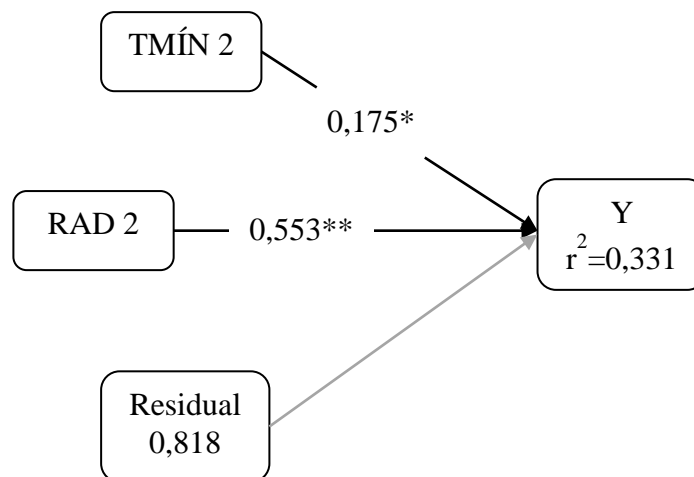
E. RENDIMIENTO EN FUNCIÓN DE COMPONENTES Y CLIMA

1. Todos los cultivares

a. Condiciones generales

Para el conjunto de los datos analizados, comprendido por todos los cultivares y todas las fechas de siembra (condiciones generales) se realizó el ajuste de un modelo para rendimiento en función de los factores climáticos evaluados en los diferentes períodos de desarrollo del cultivo. Los factores climáticos de mayor relevancia se seleccionaron con el método paso a paso (“stepwise”). En la figura 21 se muestra el diagrama de análisis de sendero para el modelo obtenido ($R^2=0,331^{**}$). TMÍN 2 y RAD 2 son las variables que mejor explican las variaciones en rendimiento, siendo radiación incidente el factor de mayor importancia según el coeficiente sendero obtenido ($0,553^{**}$).

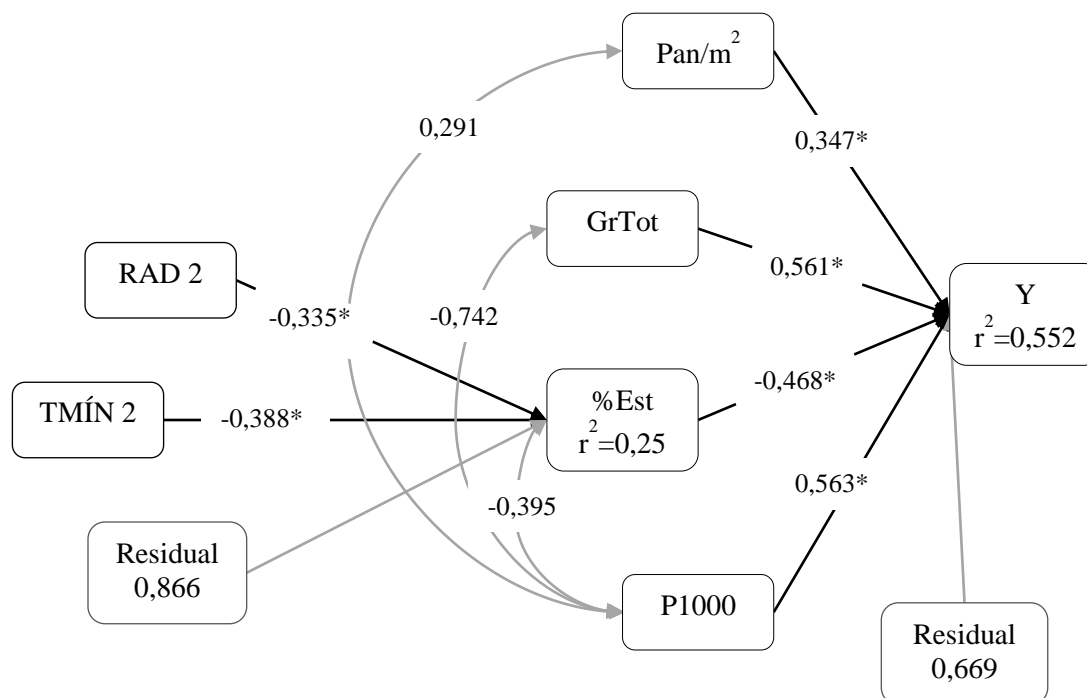
Figura 21. Diagrama de análisis de sendero para rendimiento de todos los cultivares en función de los factores climáticos, en todas las épocas de siembra



* y **, significativo con $P < 0,05$ y $0,001$ respectivamente. RAD 2 = radiación solar por heliofanía 10 días pre y 10 días posteriores a 50 por ciento de floración; TMÍN 2 = temperatura mínima 10 días pre y 10 días posteriores a 50 por ciento de floración.

Para igual universo de datos (condiciones generales) a continuación se realizó el ajuste de un modelo para rendimiento en función de sus componentes y diagrama de coeficientes sendero. Luego, los componentes de rendimiento fueron individualmente ajustados en un modelo según la incidencia de los factores climáticos relevantes en el momento de su definición (figura 22).

Figura 22. Diagrama de análisis de sendero para rendimiento de todos los cultivares en función de los componentes, en todas las épocas de siembra



*Significativo con $P < 0,0001$. Y = rendimiento; Pan/m² = panojas por metro cuadrado; GrTot = número de granos totales por panoja; %Est = porcentaje de esterilidad; P1000 = peso de mil granos; RAD 2 = radiación solar por heliofanía 10 días pre y 10 días posteriores a 50 por ciento de floración; TMÍN 2 = temperatura mínima 10 días pre y 10 días posteriores a 50 por ciento de floración.

Según se aprecia en figura 22, se obtuvo un modelo con $R^2=0,552^{**}$ que explica las variaciones de rendimiento en función de los componentes de este. Incluyendo el coeficiente sendero de cada uno de ellos respecto al rendimiento y las correlaciones entre componentes. En el cuadro 17 se presenta el efecto directo e indirecto de los componentes sobre rendimiento.

Cuadro 17. Efecto directo e indirecto de los componentes sobre rendimiento de todos los cultivares, en todas las épocas de siembra

	Beta estandarizado
Efecto directo de Pan/m ² en Y	0,347
Indirecto total	0,065
Efecto total	0,412
Efecto directo de GrTot en Y	0,561
Indirecto por P1000	-0,418

Indirecto total	-0,500
Efecto total	0,060
<hr/>	
Efecto directo de %Est en Y	-0,468
Indirecto por P1000	-0,222
Indirecto total	-0,167
Efecto total	-0,635
<hr/>	
Efecto directo de P1000 en Y	0,563
Indirecto total	-0,130
Efecto total	0,433
<hr/>	

Pan/m² = panojas por metro cuadrado; Y = rendimiento; GrTot = granos totales por panoja; %Est = porcentaje de esterilidad; P1000 = peso de mil granos.

Todos los componentes tienen un efecto directo importante sobre el rendimiento; siendo P1000 y GrTot los que presentan coeficientes beta estandarizados más alto. Sin embargo, al considerar los efectos indirectos, el componente GrTot resulta de menor importancia global debido al fuerte efecto indirecto a través de P1000, a consecuencia de la alta correlación negativa entre ambos componentes.

Considerando su efecto global sobre el rendimiento, el componente de mayor importancia resulta ser %Est (con la suma de los efectos directos e indirectos más alta: 0,635). El signo negativo del coeficiente indica su relación inversa con el rendimiento, el incremento en el número de granos vacíos o chuzos reducen significativamente el rendimiento. Por otra parte, Pan/m² y P1000 tiene un efecto total similar, ambos positivos, representando el incremento en el tamaño de la fosa del cultivo y por ende el potencial de rendimiento.

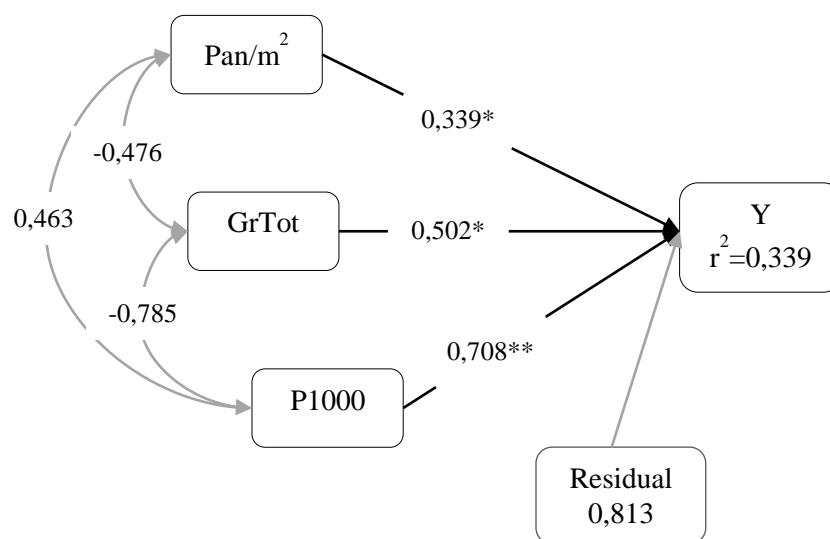
Las variaciones en los componentes del rendimiento, en los mismos cultivares y en un contexto de prácticas culturales con mínimos cambios en la serie, podrían deberse a la incidencia de factores climáticos durante su desarrollo y concreción. De esta manera se realizó el ajuste de modelos para cada componente de modo individual, en función de parámetros climáticos. Se obtuvo un modelo significativo solo para el componente %Est; en el cual se incluyeron las variables climáticas registradas en período 2. Este componente del rendimiento fue significativamente afectado por RAD y TMÍN en dicho periodo. Ambos factores climáticos tienen un beta estandarizado similar y negativo. Resultados similares respecto a la importancia de estas variables se obtuvieron en el primer modelo ajustado.

b. Condiciones óptimas

Un análisis similar se realizó con el subgrupo de datos colectados en todos los cultivares, pero en épocas de siembra tempranas e intermedias, que permiten que el cultivo se desarrolle en condiciones ambientales óptimas. En este subgrupo de dato, no se logró un ajuste significativo para rendimiento en función de parámetros climáticos.

Por otra parte, se realizó el ajuste de un modelo para rendimiento en función de los componentes de rendimiento; en la figura 23 se muestra el diagrama de análisis de sendero. En estas condiciones de mayor potencial productivo y de menor interacción con factores climáticos, P1000, GrTot y Pan/m² presentan un efecto significativo directo en rendimiento.

Figura 23. Diagrama de análisis de sendero para rendimiento de todos los cultivares en función de los componentes, en época de siembra temprana e intermedia



* y **, significativo con $P < 0,05$ y $0,001$ respectivamente. Y = rendimiento; Pan/m² = panojas por metro cuadrado; GrTot = número de granos totales por panoja; P1000 = peso de mil granos.

Los efectos totales (suma de efectos directos e indirectos) de estos componentes en rendimiento se presentan en el cuadro 18; al no considerar las fechas de siembra tardías en este análisis, el componente %Est de mayor importancia en el análisis anterior (condiciones generales) pierde relevancia, y el componente que más efecto tiene sobre el rendimiento es P1000. Si bien el efecto indirecto a través de GrTot disminuye su beta estandarizado, sigue siendo el más importante.

Cuadro 18. Efecto directo e indirecto de los componentes sobre rendimiento de todos los cultivares, en época de siembra temprana e intermedia

	Beta estandarizado
Efecto directo de Pan/m ² en Y	0,339
Indirecto total	0,089

Efecto total	0,428
<hr/>	
Efecto directo de GrTot en Y	0,502
Indirecto por Pan/m ²	-0,161
Indirecto por P1000	-0,556
Indirecto total	-0,717
Efecto total	-0,216
<hr/>	
Efecto directo de P1000 en Y	0,708
Indirecto por Pan/m ²	0,157
Indirecto por GrTot	-0,394
Indirecto total	-0,237
Efecto total	0,472
<hr/>	

Pan/m² = panojas por metro cuadrado; Y = rendimiento; GrTot = granos totales por panoja; P1000 = peso de mil granos.

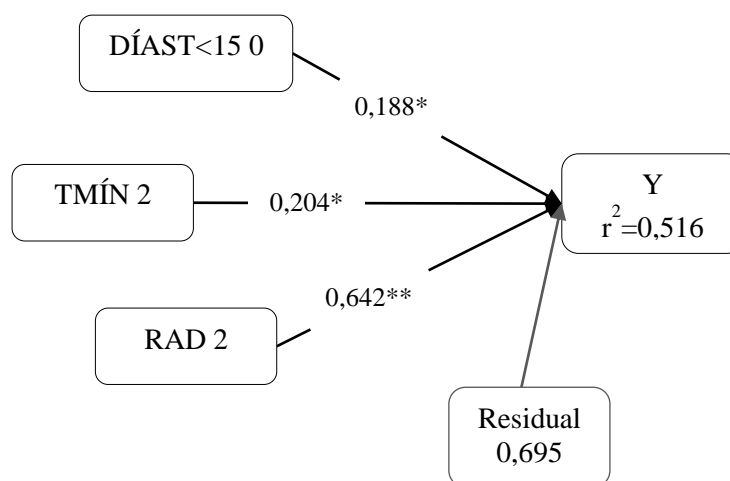
En los restantes componentes identificados como relevantes, Pan/m² tiene un efecto total positivo, mientras que GrTot presenta un efecto directo significativo, pero el efecto total es de signo negativo por su correlación con los demás componentes, principalmente P1000.

2. Índica

Los subtipos de arroz presentan diferentes interacciones con el ambiente, debido a esto se ajustaron modelos en ambos subtipos; para Índica, representado por los cultivares El Paso 144 (EP144) e INIA Olimar (Olimar).

El modelo ajustado de variables climáticas con incidencia en el rendimiento destaca como significativas las variables, RAD 2, TMÍN 2 y DÍAST<15 0 (figura 24). El más importante de ellos resultó RAD 2 ($p=0,642^{**}$). Este modelo comparado con el análisis para todos los cultivares (figura 22) es coincidente en destacar que la variable que más influye en el rendimiento es RAD 2. En igual sentido, TMÍN 2 presenta similar incidencia global en el rendimiento.

Figura 24. Rendimiento de cultivares del subtipo Índica en función de clima, en todas las épocas de siembra

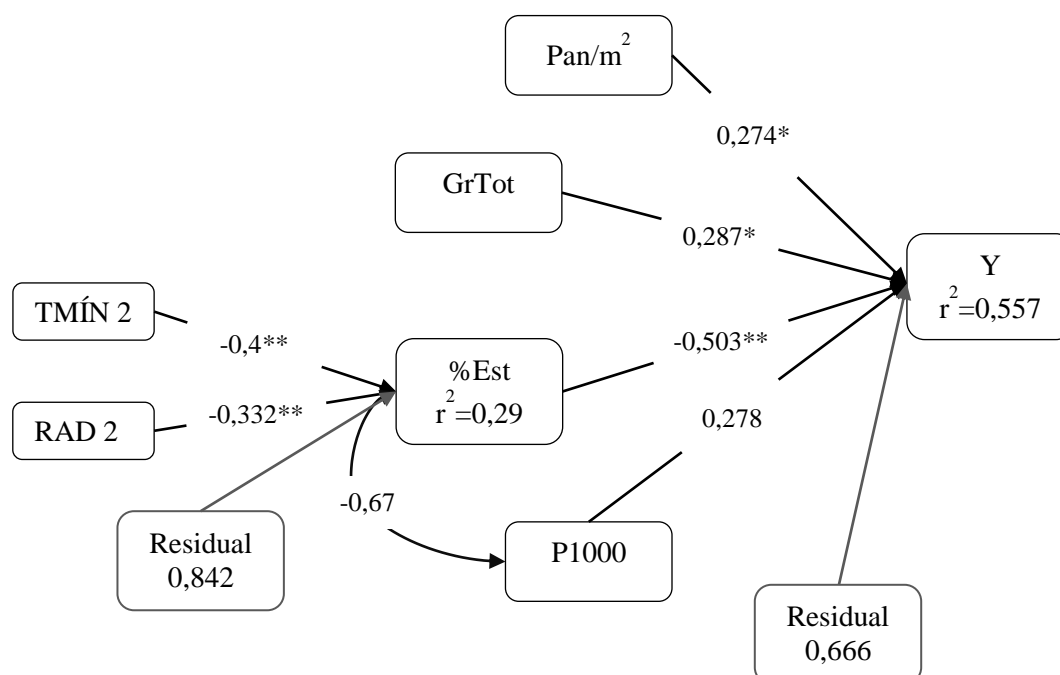


* y **, significativo con $P < 0,05$ y $0,01$ respectivamente. DÍAST<15 0 = Número de días con temperatura mínima menor a $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ en el período de 40 a 20 días pre 50 por ciento de floración; TMÍN 2 = temperatura mínima 10 días pre y 10 días posteriores a 50 por ciento de floración; RAD 2 = radiación solar por heliofanía 10 días pre y 10 días posteriores a 50 por ciento de floración.

De modo diferente al análisis del conjunto de cultivares, el número de días con temperatura menor a $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ en el período de 40-20 días pre floración (momento 0) tiene un efecto significativo sobre el rendimiento.

La figura 25 muestra diagrama de análisis de sendero para rendimiento de Índica en función de los componentes, y de componentes de rendimiento en función de variables climáticas, en condiciones generales. En el cuadro 19 se presenta el efecto directo e indirecto de los componentes sobre rendimiento de Índica.

Figura 25. Diagrama de análisis de sendero para rendimiento de cultivares del subtipo Índica en función de los componentes, en todas las épocas de siembra



* y ** significativo con $P < 0,05$ y $0,01$ respectivamente. Y = rendimiento; Pan/m² = panojas por metro cuadrado; GrTot = número de granos totales por panoja; %Est = porcentaje de esterilidad; P1000 = peso de mil granos; RAD 2 = radiación solar por heliofanía 10 días pre y 10 días posteriores a 50 por ciento de floración; TMÍN 2 = temperatura mínima 10 días pre y 10 días posteriores a 50 por ciento de floración.

Cuadro 19. Efecto directo e indirecto de los componentes sobre rendimiento de cultivares del subtipo Índica en todas las épocas de siembra

	Beta estandarizado
Efecto directo de Pan/m ² en Y	0,274
Indirecto total	0,044
Efecto total	0,318
Efecto directo de GrTot en Y	0,287
Indirecto total	0,080
Efecto total	0,367
Efecto directo de %Est en Y	-0,503
Indirecto por P1000	-0,186
Indirecto total	-0,169
Efecto total	-0,672

Efecto directo de P1000 en Y	0,278
Indirecto por %Est	0,337
Indirecto total	0,316
Efecto total	0,593

Pan/m² = panojas por metro cuadrado; Y = rendimiento; GrTot = granos totales por panoja; %Est = porcentaje de esterilidad; P1000 = peso de mil granos.

En EP144 y Olimar, el modelo obtenido identifica a 3 de los 4 componentes con efectos directos significativos; de estos, %Est presenta el mayor efecto directo sobre el rendimiento ($p=-0,503^*$). Los efectos directos de Pan/m² y GrTot son positivos, significativos y de similar valor absoluto.

Por otra parte, %Est resulta además con un efecto global mayor debido el efecto indirecto, principalmente por su significativa correlación con P1000. %Est resulta en el componente con mayor beta estandarizado, afectando negativamente el rendimiento. Comparando %Est en Índica con el conjunto de los genotipos, coeficiente sendereo (beta estandarizado) es similar: -0,635 y -0,672 respectivamente.

%Est a su vez se ve afectado por las mismas variables climáticas identificadas para el conjunto de los genotipos: TMÍN y RAD entorno a floración, con beta estandarizado similar. O sea que a mayores niveles de RAD incidente y TMÍN superiores entorno a floración, reducirían la expresión de vaneo (menor %Est) y por ende resultaría en mayor rendimiento.

P1000 es el segundo componente más importante en efecto total, siendo favorecido por el efecto indirecto por %Est; es mayor al presentado por el conjunto de los genotipos ($p=0,433$).

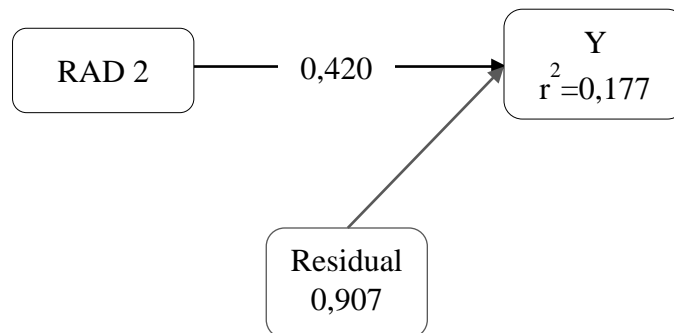
A diferencia de lo que ocurre para el conjunto de todos los cultivares de arroz estudiados, GrTot tiene un efecto total importante sobre el rendimiento para el subtipo Índica; mientras que Pan/m² tiene un efecto total positivo, pero menor que en el conjunto de todos los cultivares.

3. Japónica tropical

a. Condiciones generales

Los resultados para el subtipo Japónica tropical, en condiciones generales se presentan a seguir. El diagrama de sendero para rendimiento en función de variables climáticas se muestra en la figura 26.

Figura 26. Rendimiento de cultivares del subtipo Índica en función de clima, en todas las épocas de siembra



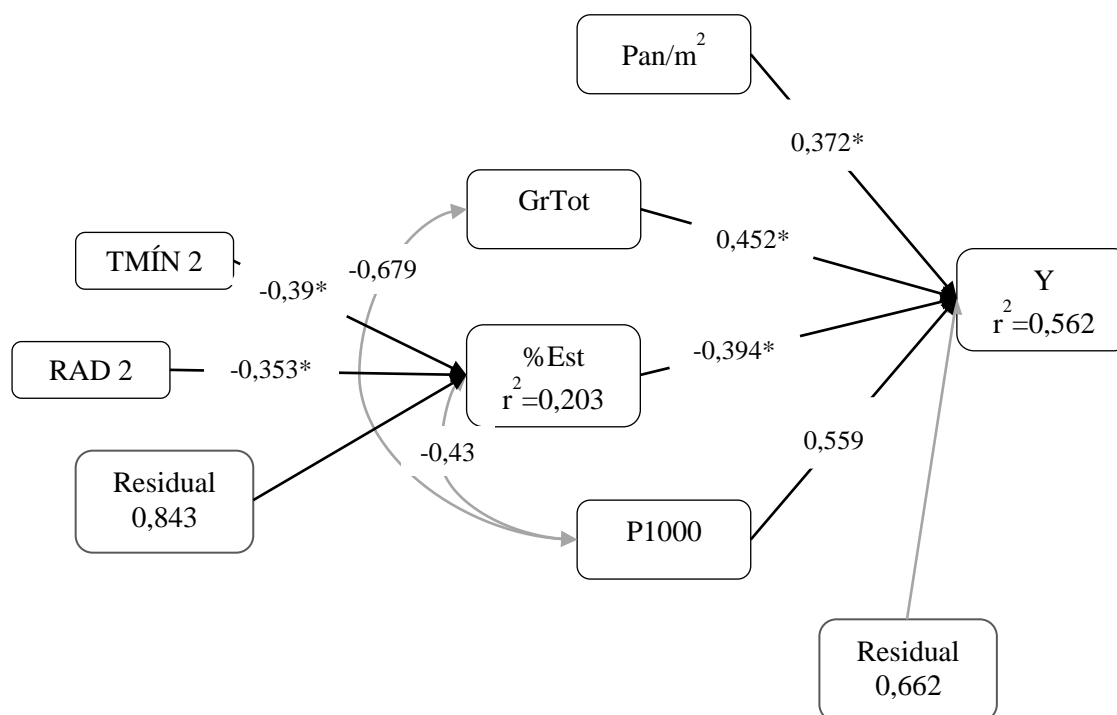
* $P < 0,01$; Y = rendimiento; RAD 2 = radiación solar por heliofanía 10 días pre y 10 días posteriores a 50 por ciento de floración.

El r^2 bajo indica que las variaciones en rendimiento se explican poco por variaciones ambientales, siendo que la única variable que incide de forma significativa es RAD 2, con un beta estandarizado menor que en el mismo análisis para todos los cultivares y para el subtipo Índica.

Los resultados para rendimiento en función de componentes, y componentes en función de clima se presentan en la figura 27 y cuadro 20. Todos los componentes tienen un efecto significativo sobre el rendimiento.

En este subgrupo P1000 es el componente con mayor efecto directo, aunque al considerar los efectos totales el de mayor incidencia sobre el rendimiento es %Est; esto es debido al efecto indirecto de %Est por su correlación negativa con P1000.

Figura 27. Diagrama de análisis de sendero para rendimiento de cultivares del subtipo Japónica tropical en función de los componentes, en todas las épocas de siembra



* significativo con $P < 0,01$. Y = rendimiento; Pan/m² = panojas por metro cuadrado; GrTot = número de granos totales por panoja; %Est = porcentaje de esterilidad; P1000 = peso de mil granos; RAD 2 = radiación solar por heliofanía 10 días pre y 10 días posteriores a 50 por ciento de floración; TMÍN 2 = temperatura mínima 10 días pre y 10 días posteriores a 50 por ciento de floración.

Cuadro 20. Efecto directo e indirecto de los componentes sobre rendimiento de cultivares del subtipo Japónica tropical, en todas las épocas de siembra

	Beta estandarizado
Efecto directo de Pan/m ² en Y	0,372
Indirecto total	0,136
Efecto total	0,508
Efecto directo de GrTot en Y	0,452
Indirecto por P1000	-0,403
Indirecto total	-0,429
Efecto total	0,023

Efecto directo de %Est en Y	-0,394
Indirecto por P1000	-0,256
Indirecto total	-0,165
Efecto total	-0,559
Efecto directo de P1000 en Y	0,595
Indirecto total	-0,094
Efecto total	0,501

Pan/m² = panojas por metro cuadrado; Y = rendimiento; GrTot = granos totales por panoja; P1000 = peso de mil granos.

Como se mencionara, %Est es el componente con mayor efecto total sobre el rendimiento en el subgrupo de Japónica tropical, de manera similar a lo reportado considerando el conjunto de todos los cultivares (ver figura 22). Sin embargo, se aprecia -a través de un menor coeficiente beta estandarizado- que en Japónica tropical, el %Est explica en menor medida las variaciones en rendimiento.

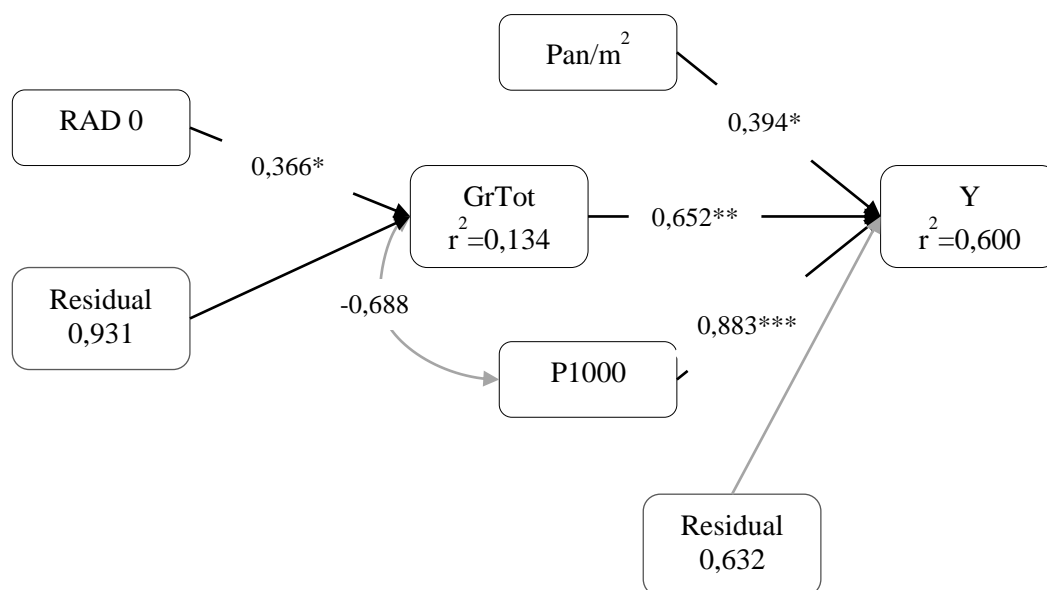
A su vez, este componente %Est es significativamente afectado por los factores climáticos TMÍN 2 y RAD 2, siendo ambos con coeficiente sendero similar, y siguiendo el comportamiento mostrado para el conjunto de todos los genotipos.

Por otra parte, P1000 explica las variaciones en el rendimiento en mayor medida en Japónica tropical que en el conjunto de todos los genotipos. En el componente GrTot ocurre lo mismo que para el conjunto de todos los cultivares (ver cuadro 17), el efecto indirecto de P1000 es negativo y hace que el efecto total sea despreciable. GrTot y P1000 tienen una correlación alta y negativa, a mayor GrTot menor P1000.

b. Condiciones óptimas

En la Figura 28 se presenta el diagrama de análisis de sendero y en el cuadro 21 los efectos directos e indirectos para los datos obtenidos en condiciones de fechas de siembra óptimas (tempranas e intermedias). En este escenario, y a diferencia de lo referido previamente, el componente %Est no tiene efectos significativos sobre el rendimiento. El modelo de mejor ajuste no incluye dicha variable, y destaca a P1000 como el componente de mayor efecto directo. Sin embargo, su incidencia es disminuida debido al efecto indirecto por su correlación con GrTot. De este modo, el efecto total de P1000 es similar al de Pan/m².

Figura 28. Diagrama de análisis de sendero para rendimiento de cultivares del subtipo Japónica tropical en función de los componentes, para épocas de siembra temprana e intermedia



*, ** y *** significativo con $P < 0,05$, $0,01$ y $0,001$ respectivamente. Y = rendimiento; Pan/m² = panojas por metro cuadrado; GrTot = número de granos totales por panoja; P1000 = peso de mil granos; RAD 0 = radiación solar por heliofanía en el periodo de 40 a 20 días previos a 50 por ciento de floración.

Cuadro 21. Efecto directo e indirecto de los componentes sobre rendimiento de cultivares del subtipo Japónica tropical en fechas de siembra tempranas e intermedias

	Beta estandarizado
Efecto directo de Pan/m ² en Y	0,394
Indirecto por GrTot	-0,120
Indirecto por P1000	0,254
Indirecto total	0,133
Efecto total	0,527
Efecto directo de GrTot en Y	0,652
Indirecto por P1000	-0,608
Indirecto total	-0,680
Efecto total	-0,028
Efecto directo de P1000 en Y	0,883
Indirecto por GrTot	-0,449
Indirecto total	-0,336
Efecto total	0,547

Pan/m^2 = panojas por metro cuadrado; Y = rendimiento; GrTot = granos totales por panoja; P1000 = peso de mil granos.

Pan/m^2 tiene el efecto total mayor que el directo debido a su efecto indirecto por P1000 . GrTot tiene un efecto total despreciable, debido al alto efecto indirecto por P1000 . Para el conjunto de todos los cultivares no ocurre esto, GrTot tiene un efecto importante sobre el rendimiento en condiciones óptimas.

V. DISCUSIÓN

En Uruguay el descenso en rendimiento en siembras tardías ha sido ampliamente reportado (Chebataroff 1981, Blanco et al. 1993, Pérez de Vida 2010a). Los resultados obtenidos en este trabajo son coincidentes con los reportes mencionados: el rendimiento fue significativamente superior en siembras realizadas hasta el 15 de noviembre respecto a las posteriores a dicha fecha, caracterizadas como realizadas en épocas de siembra tardías. La disminución de rendimiento en la ES tardía se debe a las condiciones ambientales que capta el cultivo durante la etapa reproductiva y comienzos de llenado de granos, con mayor incidencia de temperaturas bajas y menor radiación (Pérez de Vida, 2010a).

En ES temprana e intermedia, los cultivares del subtipo Índica (El Paso 144 e INIA Olimar) y Japónica tropical (INIA Tacuarí y Parao) tienen estadísticamente similar rendimiento; en ES tardía el rendimiento de ambos subtipos disminuye, siendo el de Índicas significativamente menor. Esto coincide con lo reportado Blanco et al. (1993), Macedo (2014). La disminución en rendimiento es menor en Japónica tropical, por ser más tolerante al frío en etapas reproductivas, lo que concuerda con lo reportado por Yoshida (1981), Pérez de Vida, citado por Pérez de Vida (2010a). Blanco, citado por Pérez de Vida (2010a), agrega que Tacuarí posee mayor adaptabilidad a condiciones de siembra tardías, debido a un ciclo más corto a floración.

En el conjunto de los datos, la regresión de rendimiento en función de zafra presenta un coeficiente de regresión positivo y significativo ($b=104$ kg/ha/zafra). Pérez de Vida (2013), Macedo (2014) obtuvieron una tasa de incremento similar, 128 y 110 kg/ha/año, respectivamente. El aumento en la productividad a lo largo de la serie, considerando que el manejo de los ensayos no ha variado sustancialmente, se puede deber a que se incorporaron cultivares durante el periodo estudiado (INIA Olimar en 1999-2000 y Parao en 2006-2007).

La misma regresión, usando solamente el cultivar El Paso 144 sembrado en ES temprana e intermedia, presenta una tendencia al aumento ($b=54$ kg/ha/zafra). Entre los posibles factores que explican esta variación se analizó fecha de siembra y de floración en función de zafra, de lo cual se concluye que el ciclo a floración del cultivo se ha acortado de manera significativa en la serie bajo estudio. Esto se puede explicar por varios factores: aumento de la temperatura media en el período estudiado, haciendo que la suma térmica se complete en menor número de días, de acuerdo a Macedo et al. (2018) existe una disminución en las probabilidades de ocurrencia de temperaturas menores a 15 °C en los meses de enero y febrero, determinado principalmente por una reducción en los últimos años (1994-2018); establecimiento de la lámina de riego más temprana, la cual provoca un acortamiento del ciclo en Olimar y EP144 (Cantou et al., 2009).

Los resultados obtenidos para componentes de rendimiento son similares a los presentados por Castro y Porto (1994), Baez y Toledo (1998), Pérez de Vida et al. (2011a), Hernández et al. (2014), con valores similares, así como diferencias entre cultivares.

En el conjunto de todos los cultivares, en condiciones generales (todas las épocas de siembra), las variables climáticas que afectan significativamente al rendimiento son TMÍN 2 y RAD 2, siendo que las variaciones en RAD 2 explican en mayor medida las variaciones en rendimiento que TMÍN 2. El período de 10 días pre y 10 días pos anthesis engloba eventos fenológicos críticos para la concreción del rendimiento: microesporogénesis, floración y llenado temprano de granos (Magalhães Junior et al. 2004, Satake, citado por Steinmetz 2004, Hayase et al., citados por Fageria 2007, Pérez de Vida 2011b). Los carbohidratos asimilados en dicha fase explican de 60-80% del rendimiento (Yoshida 1981, Murata y Matsushima, citados por Fageria 2007), lo cual explica en parte el beta estandarizado alto de la variable. En diversos trabajos se reporta que sombrear las plantas en etapa reproductiva y/o llenado de granos reduce significativamente el rendimiento, ya sea por reducción en P1000 (Yoshida, 1981) o incremento en %Est (Yoshida 1981, Pérez de Vida 2013, Pozzobon¹). Bajas temperaturas durante microesporogénesis y floración pueden causar esterilidad en las espiguillas, reduciendo el rendimiento (Magalhães Junior et al. 2004, Pérez de Vida 2011b).

De Datta y Zarate, citados por De Datta (1981) correlacionan radiación solar durante 45 días previos a madurez (incluye aproximadamente 15 días pre floración y 30 pos floración) con rendimiento en grano, con coeficientes de 0,50 a 0,77, ambos significativos; así, aunque la radiación pos floración es importante en determinar rendimiento en grano, es posible que la radiación en períodos anteriores sea igual de importante, o más. Yoshida y Parao (1976), en un experimento en el cual se sombreaba al cultivo en diferentes grados, durante 25 días durante la etapa vegetativa, reproductiva o de llenado de granos encontraron que el mayor efecto de la radiación sobre el rendimiento se da en la etapa reproductiva. Ferreira y Montauban (1998) reportan que la variable climática con más incidencia sobre el rendimiento fue la temperatura media alrededor de floración y en llenado de grano. Sheehy et al. (2006), trabajando con modelos de estimación de rendimiento encontraron que la respuesta del cultivo a la temperatura (excluyendo altas temperaturas que causan esterilidad) son del orden de 0,5 ton/ha/°C, una vez separados los efectos de otras variables ambientales. Klering et al. (2008), ajustando modelos de predicción de rendimiento en Rio Grande do Sul, reportan que número de días con temperatura mínima menor o igual a 15 °C y radiación solar son indicadores agrometeorológicos del rendimiento, respondiendo por parte de la variabilidad en el rendimiento del cultivo. Steinmetz et al. (2013), estimando la

¹ Pozzobon, F. G. s.f. Produtividade, componentes de rendimento, qualidade dos grãos e índices morfofisiológicos de arroz irrigado em ambiente subtropical em diferentes níveis de radiação solar (en prensa).

productividad de arroz irrigado en función de radiación solar global y temperatura mínima del aire en el sur de Brasil, encontraron que para cultivares de ciclo medio, las variables más importantes en explicar la productividad fueron radiación solar global media desde diferenciación de la panoja a inicio de floración y media de temperatura mínima de inicio de floración a madurez de los granos. Macedo (2014), encontró que las variables climáticas con más efecto sobre el rendimiento son radiación en llenado de granos, incidencia de bajas temperaturas entorno a floración y temperatura máxima en prefloración. Deng et al. (2015), estudiando la respuesta de un grupo de cultivares pertenecientes a los subtipos Índica y Japónica tropical a diferentes condiciones de temperatura y radiación, en el valle del Río Yangtze, China, encontraron coeficientes de correlación significativos entre rendimiento relativo y temperatura promedio en el período reproductivo y de llenado de granos, con valores de 0,3555 y 0,6697, respectivamente ($P=0,01$). Los valores absolutos obtenidos de coeficiente de correlación entre rendimiento relativo y radiación promedio en el período reproductivo y de llenado de granos fueron 0,4364 y 0,5723, respectivamente.

En el análisis de rendimiento en función de componentes de rendimiento, se obtuvo que las variaciones en %Est explican en mayor medida las variaciones en rendimiento, seguido por P1000 y Pan/m², los dos últimos con similar valor de beta estandarizado. El desarrollo de espiguillas es sensible a factores ambientales, fallas en polinización o desarrollo impiden que el grano se llene en la fase siguiente, lo cual disminuye el rendimiento por menor capacidad de fosa. P1000 está determinado por metabolismo de carbohidratos y partición, por lo tanto se puede reducir por falla metabólica (Moldenhauer y Gibbons, 2002). Para la obtención de un rendimiento óptimo es necesario Pan/m² óptima, con madurez uniforme (Gravois y Helms, citados por Fageria, 2007), este componente se ha reportado como el factor más importante en obtener altos rendimientos (Yoshida 1981, Wells y Faw, citados por Moldenhauer y Gibbons 2002, Fageria 2007). Ferreira y Montauban (1998) reportan que el componente que afecta de manera más importante al rendimiento, de modo general, es %Est. Para Macedo (2014), en siembras tardías, P1000 fue el componente más importante, seguido de GrTot y %Est. Existe una correlación de alto valor negativo entre GrTot y P1000, lo cual ocurre frecuentemente debido a que la fuente es limitante para el tamaño de fosa (Fageria, 2007), generando competencia por carbohidratos (Ferreira y Montauban, 1998). El efecto total de GrTot es despreciable debido al efecto indirecto por P1000, resultado de la correlación negativa entre ambos.

En el presente trabajo, las variaciones en %Est se explican por variaciones en RAD 2 y TMÍN 2, con beta estandarizado similar; las mismas variables climáticas que afectan directamente a rendimiento. Sobre rendimiento el efecto cuantitativo de radiación es considerablemente mayor que el de temperatura mínima, lo cual se puede deber a que la radiación afecta a otros componentes que no se detectan por los modelos que se intentaron ajustar para componentes en función de variables climáticas. Tanaka y Matsushima, citados por Fageria (2007) reportaron que la cantidad de carbohidratos almacenados en la vaina en la etapa de floración produjo un incremento en el llenado de

espiguillas, debido a que actúan como buffer en casos de condiciones desfavorables para la planta. La acumulación de grandes cantidades de carbohidratos en la vaina previo a anthesis reduce la degeneración de espiguillas (Hayashi, citado por Fageria, 2007). La ocurrencia de temperaturas por debajo de 15 °C en el período pre-floración, específicamente en la microesporogénesis, puede perturbar el normal desarrollo de los granos de polen, afectado su viabilidad, y por ende reducir la fertilidad de las flores (Satake, citado por Steinmetz 2004, Hayase et al., citados por Fageria 2007, Pérez de Vida 2011b). El aumento en esterilidad de granos trae aparejada la reducción en rendimiento, sin posibilidades de compensación a través de la expansión de otros componentes de rendimiento. El período de mayor susceptibilidad en arroz se estima en 10 a 15 días prefloración (Pérez de Vida, 2011b).

Considerando solo las épocas de siembra óptimas (temprana e intermedia), no se logra ajustar un modelo relacionando rendimiento de grano en función de clima; lo que permite inferir que en fechas de siembra óptimas la influencia del clima sobre el rendimiento menor que en siembras tardías.

Con el conjunto de datos referidos en el párrafo anterior, a lo contrario de cuando se incluyen siembras tardías, %Est no tiene efecto significativo sobre el rendimiento, porque el cultivo capta en la etapa reproductiva mejores condiciones ambientales, no inductivas de esterilidad. En dicho escenario, los componentes de rendimiento más importantes son Pan/m² y P1000. De modo similar Macedo (2014), reporta que en las mismas épocas de siembra el único componente significativo afectando al rendimiento fue Pan/m², lo cual indicaría que en siembras tempranas e intermedias obtener la población adecuada es el principal factor influenciando el rendimiento del cultivo.

Por otra parte, en los cultivares del subtipo Índica en condiciones generales, la variable climática que globalmente incide sobre el rendimiento de forma más importante es RAD 2. TMÍN 2 también explica de forma significativa el rendimiento, aunque con beta estandarizado menor que radiación, y similar al obtenido en el conjunto de todos los cultivares. En este subgrupo de datos, a lo contrario de lo que ocurre en el conjunto de todos los cultivares en condiciones generales, mayor DÍAST<15 afecta de manera positiva al rendimiento, lo cual se puede deber a que en condiciones de mayor temperatura media nocturna es esperable un incremento en costos metabólicos (Hernández et al., 2012), por lo que temperaturas frescas pueden promover un mejor balance energético; alta temperatura diurna y radiación solar, y bajas temperaturas nocturnas aparentemente promueven más panojas por metro cuadrado sin mayor reducción en número de espiguillas (De Datta, 1981). Matsushima y Tsunoda, citados por De Datta (1981) reportan que en el norte de Japón, bajas temperaturas nocturnas (16–21 °C), excepto durante el macollaje y tarde en la maduración, favorece la producción de grano. A diferencia de estos, Macedo (2014) reporta que el rendimiento en cultivares del subtipo Índica sembrados en época de siembra tardía, la única variable ambiental que afecta al rendimiento es DÍAST<15 en llenado de granos. Ghadirnezhad y

Fallah (2014) estudiando el efecto de bajas temperaturas en rendimiento y componentes de rendimiento, encontraron que bajas temperaturas (13 °C durante 15 días, en la etapa de floración) tuvieron efecto significativo en número y largo de panoja, número de granos (llenos, medios, vacíos y totales), como resultado, hubo reducción significativa en rendimiento. La interacción entre variedad y temperatura mostró que hay variedades más tolerantes al frío, en las cuales la reducción de rendimiento fue del orden de 19%, mientras que en las susceptibles la reducción fue 29%.

En el análisis de rendimiento en función de componentes se obtuvo que el componente que explica mejor las variaciones en rendimiento es %Est, con beta estandarizado negativo, similar al obtenido en el conjunto de todos los cultivares. El efecto total de %Est es aumentado por la correlación alta y negativa con P1000: al aumentar %Est disminuye P1000, lo cual no es la resultante de un proceso de compensación entre componentes, sino resultante de las condiciones ambientales que perjudican la concreción de rendimiento a través de ambos componentes. P1000 tiene un beta estandarizado total alto, aumentado por la correlación alta y negativa existente entre P1000 y %Est.

Por otra parte, Pan/m² tienen un efecto similar, positivo y significativo sobre el rendimiento, así como GrTot. Este componente cuando se integran también los datos de Japónica tropical no resultaba relevante en la conformación del rendimiento de grano. Los cultivares Índicas en el estudio son los menor tamaño de fosa por panícula y mayor macollaje efectivo (Pan/ m²).

Éstos resultados para Índica son similares a los reportados por Macedo (2014), donde se señala que el %Est es el componente más relevante en explicar las variaciones en rendimiento. El análisis de variables climáticas en los componentes solo ajustó un modelo para %Est; según este a mayores niveles de RAD 2 y TMÍN 2, la esterilidad de granos es reducida y por ende el rendimiento es mayor. Los valores de beta estandarizado para esas variables son similares a los obtenidos para el conjunto de todos los cultivares.

Considerando las siembras óptimas y los cultivares del subtipo Índica, no se logró ajustar un modelo que explique rendimiento, en función de variables climáticas o de componentes, indicando menor incidencia del clima cuando se siembra en épocas óptimas. Esto coincide con Ferreira y Montauban (1998), que reportan que cuando se incluyen siembras tardías en Índica, los factores climáticos explican en mayor medida el rendimiento, a través de su efecto en esterilidad. Macedo (2014) obtiene que Pan/m² es el único componente que afecta a rendimiento de forma significativa, y al explicar rendimiento por variables climáticas la única significativa fue temperatura máxima en llenado de granos. En las condiciones del Este de Uruguay, donde se desarrolla la mayor área de la actividad arrocera se puede inferir que las condiciones climáticas en general deparan una baja interacción de cultivares Índicas adaptados con las condiciones climáticas cuando se realiza la siembra en el inicio de la estación de cultivo (siembras

tempranas e intermedias, abarcando principalmente fin de septiembre y octubre hasta mediados de noviembre).

En los cultivares del subtipo Japónica tropical se ajusta un modelo con r^2 bajo para rendimiento en función de variables climáticas, lo cual indica que las variaciones en rendimiento se explican en baja medida por variaciones en variables climáticas (RAD 2). Ferreira y Montauban (1998) reportan que para Tacuarí, la temperatura explica en parte al rendimiento, aunque en menor medida que para EP144; heliofanía presenta cierta incidencia sobre el rendimiento. Macedo (2014) no encontró variables climáticas que incidan significativamente sobre rendimiento.

Al ajustar un modelo de rendimiento en función de componentes de rendimiento se obtiene que el con mayor efecto total sobre rendimiento es %Est, al igual que en el conjunto de todos los cultivares, aunque con menor beta estandarizado. El valor absoluto de %Est es aumentado por su efecto indirecto por P1000. En este subtipo, los componentes P1000 y Pan/m² tienen efecto total positivo sobre el rendimiento. El efecto total de GrTot es muy bajo debido al efecto indirecto por P1000. Ferreira y Montauban (1998) coinciden parcialmente con este trabajo, ya que reportan que en variedades japónicas el componente más importante en siembras tardías es %Est. Macedo (2014) reporta que el componente que más explica las variaciones en el rendimiento es P1000; mientras que los demás componentes tienen efecto significativo, con beta estandarizado similar.

El componente %Est es el único sobre el cual el efecto del clima es significativo, a través de las variables TMÍN 2 y RAD 2, similar a lo que ocurre en el conjunto de todos los cultivares. A pesar de la reportada mayor tolerancia a bajas temperaturas de estos cultivares Japónica estudiados respecto a El Paso 144 e INIA Olimar en condiciones controladas (Pérez de Vida y Díaz, 2010b), los resultados descriptos no difieren a los obtenidos para los cultivares del subtipo Índica. Así mismo la menor incidencia de esterilidad por bajas temperaturas en estadio reproductivo de INIA Tacuarí respecto a El Paso 144, fue reportado por Blanco y Pérez de Vida (1994), en condiciones de campo así como una mayor adaptación a siembras tardías (Blanco, citado por Pérez de Vida, 2010a).

La incidencia de RAD 2 se explica por las mismas vías citadas en los conjuntos de datos nombrados anteriormente. Generalmente, la duración de llenado de granos de Japónica es ligeramente más larga que la de Índica (Jennings et al., citados por Fageria, 2007). Los cultivares Japónica en el presente estudio presentan una mayor duración del área foliar pos-floración que las Índicas², lo que en parte podría compensar la baja radiación asociada a siembras tardías, por una mayor duración del periodo de llenado. Sin embargo, de acuerdo a estos resultados no lograría reducir la incidencia de esterilidad de granos asociada a baja radiación.

² Pérez de Vida, F. 2018. Com. personal.

En condiciones óptimas, donde la expresión del potencial de rendimiento en cultivares del subtipo Japónica tropical se maximiza, no se ajusta un modelo significativo de rendimiento en función de parámetros climáticos, situación que ocurre en el conjunto de todos los cultivares y en Índica, lo cual evidencia una menor influencia del clima en siembras óptimas, sin importar el subtipo.

En el análisis de rendimiento en función de componentes se obtuvo que los componentes de mayor relevancia para el mismo los son P1000 y Pan/m², ambos significativos y con beta estandarizado similar, Considerando las épocas de siembra tempranas e intermedias, el componente %Est no explica las variaciones en rendimiento, de modo contrario a como si ocurre si se consideran todas las épocas de siembra. En siembras óptimas, el clima tiene efecto significativo sobre GrTot; mientras que GrTot tiene un importante efecto indirecto debido a su correlación negativa (compensación entre componentes) con P1000. Esto ocasiona que hace que su efecto total sea de menor cuantía. Por lo contrario Macedo (2014), reporta que GrTot es el único componente con efecto significativo sobre el rendimiento. Ferreira y Montauban (1998) de modo coincidente a estos resultados obtienen que en siembras normales en cultivares de subtipo Japónica tropical %Est pierde importancia, siendo Pan/m² el componente más importante afectando al rendimiento.

VI. CONCLUSIONES

Como se ha reportado en diversas publicaciones, en este estudio de largo plazo se concluye que en las condiciones del Este del Uruguay, la producción de arroz se maximiza cuando el cultivo desarrolla su ciclo comenzando con siembras tempranas o intermedias (1/10 a 15/11, en esta serie de 20 años). En siembras tardías el rendimiento decae de manera significativa, debido a peores condiciones ambientales -régimen de temperaturas y radiación incidente- en momentos de importancia crítica para el cultivo. Ante condiciones ambientales menos favorables, el rendimiento en los cultivares del subtipo Japónica tropical disminuye en menor medida que en los del subtipo Índica.

Durante el período en estudio hubo un incremento significativo de rendimiento, el cual se atribuye parcialmente a la incorporación de nuevos cultivares (INIA Olimar y Parao), a un ciclo de cultivo a floración más breve dado por una mayor tasa de acumulación térmica. Los factores de manejo (control de malezas, fertilización nitrogenada, riego) se consideran como con mínimas variaciones durante la serie de estudio.

En el conjunto de todas las épocas de siembra y para todos los cultivares, (subtipos Índica y Japónica tropical), el porcentaje de esterilidad de granos es el componente cuyas variaciones explican en mayor medida las variaciones en rendimiento. A su vez, las variaciones en porcentaje de esterilidad son explicadas por variaciones en temperatura mínima y radiación entorno a floración; esas variables climáticas también son las más importantes afectando directamente al rendimiento. Sin embargo, una mayor proporción de las variaciones en rendimiento se explica por variaciones en radiación, y en menor proporción por bajas temperaturas (temperatura mínima).

Para el conjunto de todos los cultivares y el conjunto de los cultivares del subtipo Japónica tropical, los componentes cuyas variaciones explican en mayor medida las variaciones en rendimiento en siembras óptimas -en cuyos casos es esperable una escasa incidencia de bajas temperaturas en estadios reproductivo y floración-, fueron número de panojas por metro cuadrado y peso de 1000 granos.

En estas condiciones, considerando el conjunto de todos los cultivares y el conjunto de los cultivares del subtipo Índica, se constató que las variables climáticas estudiadas no explicaron las variaciones del rendimiento de forma significativa.

VII. RESUMEN

En los últimos 20 años el rendimiento nacional de arroz ha aumentado a una tasa de 150 kg/ha/año, explicado por cultivares de alto rendimiento, prácticas culturales mejoradas y condiciones ambientales favorables, siendo el rendimiento nacional para la zafra 2016-2017 8,5 ton/ha. El presente trabajo tiene como objetivo estudiar, en una serie de 20 zafras, el comportamiento productivo en condiciones experimentales en relación a factores climáticos, logrando entender la interacción entre genotipos adaptados a las condiciones ambientales locales, y el ambiente, definido por variables ambientales. Para este fin se utilizan datos de la evaluación final de cultivares, del “Programa de Mejoramiento Genético de Arroz” (PMGA) de INIA Treinta y Tres, para los cultivares El Paso 144, INIA Tacuarí, INIA Olimar y Parao. Los datos climáticos usados son registros diarios tomados en la estación INIA Treinta y Tres, las variables a analizar se seleccionaron en base a la bibliografía y se descartaron variables cuya correlación con otras variables era muy alta, siendo las que se analizaron temperatura máxima, temperatura mínima, días con temperatura mínima inferior a 15°C y radiación solar por heliofanía. En base al ciclo del cultivo y de la bibliografía se definieron cuatro períodos, tomando como día 0 el en que se alcanza el 50 por ciento de floración: el período que abarca de 40 a 20 días prefloración, 20 días pre floración 10 días pre y 10 días pos floración y 20 días pos floración. Para analizar los efectos de componentes y clima sobre el rendimiento se utilizó un promedio de las repeticiones de cada unidad experimental, mediante el análisis de sendero. Para su elaboración se ajustó un modelo que estima rendimiento a partir de los componentes, del cual se obtuvo el beta estandarizado y el coeficiente de determinación R^2 . En cuanto a componentes en función de variables climáticas primero se procedió a realizar un modelo de regresión múltiple utilizando el método STEPWISE. Se utilizó la metodología mixta. Este método selecciona algunas variables de todas las posibles para todos los períodos en consideración. Se obtuvo que la producción de arroz se maximiza cuando el cultivo se siembra en fechas tempranas o intermedias (1/10 a 15/11, en esta serie de 20 años), en siembras tardías el rendimiento decae de manera significativa, debido a peores condiciones ambientales (temperaturas y radiación incidente) en momentos de importancia crítica para el cultivo, siendo que el rendimiento en los cultivares del subtipo Japónica tropical disminuye en menor medida que en los del subtipo Índica. En el conjunto de todas las épocas de siembra y para todos los cultivares, el porcentaje de esterilidad de granos es el componente cuyas variaciones explican en mayor medida las variaciones en rendimiento. A su vez, las variaciones en porcentaje de esterilidad son explicadas por variaciones en temperatura mínima y radiación entorno a floración; esas variables climáticas también son las más importantes afectando directamente al rendimiento. Sin embargo, una mayor proporción de las variaciones en rendimiento se explica por variaciones en radiación, y en menor proporción por bajas temperaturas (temperatura mínima). Para el conjunto de todos los cultivares y el conjunto de los

cultivares del subtipo Japónica tropical, los componentes cuyas variaciones explican en mayor medida las variaciones en rendimiento en siembras óptimas -en cuyos casos es esperable una escasa incidencia de bajas temperaturas en estadios reproductivo y floración-, fueron número de panojas por metro cuadrado y peso de 1000 granos. En estas condiciones, considerando el conjunto de todos los cultivares y el conjunto de los cultivares del subtipo Índica, se constató que las variables climáticas estudiadas no explicaron las variaciones del rendimiento de forma significativa.

Palabras clave: Arroz; *Oriza sativa*; Rendimiento; Componentes; Clima; Temperatura mínima; Radiación.

VIII. SUMMARY

In the last 20 years, rice national yield has increased at a rate of 150kg/ha/year, explained by high yielding cultivars, improved cultural practices and favorable environmental conditions, being that national yield for 2016-2017 was 8500 kg/ha. The objective of this work is to study, in a series of 20 years, the productive behavior in experimental conditions, in relation to climatic factors, being able to understand the interaction between adapted genotypes, and the environment, defined by environmental variables. To this end, data from final evaluation of cultivars was used, from “Programa de Mejoramiento Genético de Arroz” (PMGA) of INIA Treinta y Tres, for cultivars El Paso 144, INIA Tacuarí, INIA Olimar and Parao. The climatic data used are daily records taken at the INIA Treinta y Tres station, the variables to be analyzed were selected based on the bibliography and were discarded those variables whose correlation with other variables was very high, were analyzed maximum temperature, minimum temperature, days with minimum temperature below 15 ° C and solar radiation by heliophany. Based on the crop cycle and the bibliography, four periods were defined, taking as day 0 the one in which 50 percent of flowering is reached: the period that covers from 40 to 20 days pre flowering, 20 days pre flowering 10 days pre and 10 days after flowering and 20 days after flowering. To analyze the effects of components and climate on the yield, an average of the repetitions of each experimental unit was used, by means of the path analysis. For its elaboration, a model that estimates performance from the components was adjusted, from which the standardized beta and the coefficient of determination R^2 were obtained. As for components based on climatic variables, we first proceeded to perform a multiple regression model using the STEPWISE method. The mixed methodology was used. This method selects some variables of all possible for all periods under consideration. Rice production is maximized when the crop is sown in early or intermediate dates (1/10 to 15/11), in late sowing the yield decreases significantly, due to worse environmental conditions (temperature and radiation) at times of critical importance for the crop, yield in cultivars of Japonica tropical subtype of decreases less than in those of Indica subtype. In the set of all the sowing seasons and for all the cultivars, the percentage of sterility is the component whose variations explain largely the variations in yield, variations in percentage of sterility are explained by variations in minimum temperature and radiation around flowering; these climatic variables are also the most important directly affecting yield. However, a greater proportion of the variations in yield is explained by variations in radiation, and less by low temperatures (minimum temperature). For the set of all cultivars and the set of cultivars of the tropical subtype, the components whose variations explain largely the variations in yield in optimum sowings -in which cases a low incidence of low temperatures in reproductive and flowering stages is expected. -, were number of panicles per square meter and weight of 1000 grains. Under these conditions, considering the set of all the cultivars and the set of cultivars of Indica subtype, it was

found that the climatic variables studied did not explain the variations of yield in a significant way.

Key words: Rice; *Oriza sativa*; Yield; Yield Components; Weather; Minimum temperature; Radiation.

IX. BIBLIOGRAFÍA

1. Blanco, P.; Pérez De Vida, F.; Roel, A. 1993. Tolerancia a fríos de los nuevos cultivares precoces INIA Yerbal e INIA Tacuarí. In: Reunião da Cultura do Arroz Irrigado (20^a., 1993, Pelotas). Anais. Porto Alegre, UEPAE. pp. 77-80.
2. Baez, D. G.; Toledo, E. D. 1998. Análisis de crecimiento y componentes del rendimiento en cultivares de arroz II. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 146 p.
3. Cantou, G.; Roel, A.; Castiglioni, J. I.; Ugarte, J. M. 2009. Efecto del momento de la inundación en INIA Olimar y El Paso 144. In: Arroz: resultados experimentales 2008-2009. Montevideo, Uruguay, INIA. p. irr. (Actividades de Difusión no. 571)
4. Carracelas, G.; Guilpart, N.; Grassini, P.; Cassman, K. 2017. Evolución del rendimiento del arroz producido en Uruguay y comparación con otros países arroceros. In: Zorrilla, G.; Martínez, S.; Saravia, H. eds. Arroz 2017. Montevideo, INIA. pp. 51-55 (Serie Técnica no. 233).
5. Castro, L. A.; Porto, A. 1994. Análisis de crecimiento y componentes de rendimiento en cultivares de arroz. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 159 p.
6. Chebataroff, N. 1981. Variedades de arroz en certificación en el país. CIAAB. Miscelánea no. 26. 30 p.
7. _____. 2012. Arroz uruguayo. Buenos Aires, Hemisferio Sur. 352 p.
8. De Datta, S. K. 1981. Principles and practices of rice production. (en línea). New York, Wiley. 618 p. Consultado jul. 2018. Disponible en http://books.irri.org/0471097608_content.pdf
9. Deng, N.; Ling, X.; Sun, Y.; Zhang, C.; Fahad, S.; Peng, S; Cui, K.; Nie, L.; Huang, J. 2015. Influence of temperature and solar radiation on grain yield and quality in irrigated rice system. European Journal of Agronomy. 64: 37-46.
10. Fageria, N. K. 2007. Yield physiology of rice. Journal of Plant Nutrition. 30: 843-879.
11. Ferreira, E.; Mountauban, F. 1998. Incidencia de factores climáticos sobre rendimiento y componentes y vías de construcción del rendimiento en cultivares de arroz. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 186 p.

12. Gamarra, G. 1996. Arroz: manual de producción. Montevideo, Hemisferio Sur. 440 p.
13. Ghadirnezhad, R.; Fallah, A. 2014. Temperature effect on yield and yield components of different rice cultivars in flowering stage. (en línea). *International Journal of Agronomy* 2014: s.p. Consultado jul. 2018. Disponible en <https://www.hindawi.com/journals/ija/2014/846707/cta/>
14. Hernández, G.; Lucas, T.; Moreira, G. 2012. Efecto del desarrollo de la canopia en el rendimiento de cultivares de arroz de alto potencial según densidad de siembra y fertilización nitrogenada. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 104 p.
15. Klering, E. V.; Fontana, D. C.; Berlato, M. A.; Cargnelutti, A. F. 2008. Modelagem agrometeorológica do rendimento de arroz irrigado no Rio Grande do Sul. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 43 (5): 549-558.
16. Kobata, T.; Ishi, H.; Iwasaki, H. 2017. A reduction in spikelet number and fertility causes yield vulnerability in high-yielding rice. *Agronomy Journal*. 109 (1): 175-184.
17. Li, G.; Xue, L.; Gu, W.; Yang, C.; Wang, S.; Ling, Q.; Qin, X.; Ding Y. 2009. Comparison of yield components and plant type characteristics of high-yield rice between Taoyuan, a 'special eco-site' and Nanjing, China. *Field Crops Research*. 112: 214-221.
18. Macedo, I. 2014. Incidencia de factores climáticos en el rendimiento de cultivares elite de arroz. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 66 p.
19. _____.; Oxley, A.; Roel, A. 2018. Principales requerimientos climáticos: ¿cambió algo con 21 años más de datos? *In*: Zorrilla, G.; Martínez, S.; Saravia, H. eds. Arroz 2018. Montevideo, INIA. pp. 3-5 (Serie Técnica no. 246).
20. Magalhães Júnior de, A. M.; Terres, A. L.; Fagundes, P. R.; Franco, D. F.; Andres, A. 2004. Aspectos genéticos, morfológicos e de desenvolvimento de plantas de arroz irrigado. *In*: Magalhães Júnior de, A. M.; Gomes, A. da S. eds. Arroz irrigado no Sul do Brasil. Brasília, EMBRAPA. Informação Tecnológica. pp. 143-150.
21. Moldenhauer, K. A. K.; Gibbons, J. H. 2002. Rice morphology and development. *In*: Smith, C. W.; Dilday, R. H. eds. Rice: origin, history, technology, and production. Hoboken, New Jersey, Wiley. pp. 103-128.
22. Pérez de Vida, F. 2010a. Aspectos de la ecofisiología del cultivo de arroz en Uruguay: importancia de la fecha de siembra en la productividad. *In*:

- Arroz: resultados experimentales 2009-2010. Montevideo, Uruguay, INIA. p. irr. (Actividades de Difusión no. 611).
23. _____.; Días Solís, S. 2010b. Respuesta a bajas temperaturas en estadios reproductivos de cultivares de arroz. In: Arroz: resultados experimentales 2009-2010. Montevideo, Uruguay, INIA. p. irr. (Actividades de Difusión no. 611).
 24. _____.; Molina, F.; Blanco, P. 2011a. Evaluación final de cultivares. In: Arroz: resultados experimentales 2010-2011. Montevideo, Uruguay, INIA. p. irr. (Actividades de Difusión no. 651).
 25. _____. 2011b. Potencial del rendimiento en arroz. Aspectos de la ecofisiología del cultivo de arroz en Uruguay: potencial biológico en la Región Este. In: Arroz: resultados experimentales 2010-2011. Montevideo, Uruguay, INIA. p. irr. (Actividades de Difusión no. 651).
 26. _____. 2013. Efectos de la baja radiación solar en cultivares de arroz. In: Arroz-soja: resultados experimentales 2012-2013. Montevideo, Uruguay, INIA. p. irr. (Actividades de Difusión no. 651).
 27. Roel, A. 1997. Ecofisiología del cultivo. In: Arroz: resultados experimentales 1996-1997. Montevideo, Uruguay, INIA. pp. 1-7 (Actividades de Difusión no. 135).
 28. Sheehy, J. E.; Mitchell, P. L.; Ferrer, A. B. 2006. Decline in rice grain yields with temperature: models and correlations can give different estimates. *Field Crops Research*. 98: 151–156.
 29. Steinmetz, S. 2004. Influência do clima na cultura do arroz irrigado no Rio Grande do Sul. In: Magalhães Júnior de, A. M.; Gomes, A. da S. eds. Arroz irrigado no Sul do Brasil. Brasília, EMBRAPA. Informação Tecnológica. pp. 45-74.
 30. _____.; Deibler, A. N.; Da Silva, J. B. 2013. Estimativa da produtividade de arroz irrigado em função da radiação solar global e da temperatura mínima do ar. (en línea). *Ciencia Rural*. 43 (2): 206-211. Consultado 31 may. 2018. Disponible en <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84782013000200003>
 31. Yoshida, S.; Parao, F. T. 1976. Climatic influence on yield and yield components of lowland rice in the tropics. (en línea). In: Symposium on Climate and Rice (1976, Los Baños, Philippines). Proceedings. Los Baños, Philippines, International Rice Research Institute. pp. 471-494. Consultado may. 2018. Disponible en <https://books.google.com.uy/books?id=ZnSjud7Bk74C&pg=PP4&dq=climateandrice&hl=es&sa=X&ved=0ahUKewjSIIS4of7aAhUHHZAKHSHNAiMQ6AEIMDAC#v=onepage&q&f=false>

32. _____. 1981. Fundamentals of rice production. (en línea). Los Baños, Philippines, International Rice Research Institute. 269 p. Consultado may. 2018. Disponible en http://books.irri.org/9711040522_content.pdf