

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA

INCIDENCIA DE FACTORES CLIMÁTICOS EN EL RENDIMIENTO DE
CULTIVARES ELITE DE ARROZ

por

Ignacio MACEDO YAPOR

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

MONTEVIDEO
URUGUAY
2014

Tesis aprobada por:

Director: -----

Ing. Agr. Fernando Blas Pérez de Vida

Ing. Agr. Guillermo Siri

Ing. Agr. Oswaldo Ernst

Fecha: 4 de febrero de 2014

Autor: -----

Ignacio Macedo Yapor

AGRADECIMIENTOS

Al director de la tesis Ing. Agr., MSc., PhD Fernando Blas Pérez de Vida.

A los funcionarios de INIA Treinta y tres.

A mi familia, amigos, compañeros de generación y docentes.

A la Lic. Belky Mesones, encargada de biblioteca en Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria, Sede Treinta y Tres.

A Facultad de Agronomía

TABLA DE CONTENIDO

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES	VII
I. <u>INTRODUCCIÓN</u>	1
II. <u>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</u>	2
A. DESARROLLO DE LA PLANTA DE ARROZ	2
1. <u>Aspectos generales</u>	2
2. <u>Etapa vegetativa</u>	2
3. <u>Etapa reproductiva</u>	2
4. <u>Etapa de llenado de grano y maduración</u>	3
B. INCIDENCIA DE LA TEMPERATURA	3
1. <u>Aspectos generales</u>	3
2. <u>Incidencia en la etapa vegetativa</u>	5
3. <u>Incidencia en la etapa reproductiva</u>	6
4. <u>Incidencia en la etapa de maduración (llenado de granos)</u>	8
5. <u>Prácticas culturales para aliviar los daños por frío</u>	9
a. Manejo del nitrógeno	9
b. Manejo del agua	9
C. INCIDENCIA DE LA RADIACIÓN SOLAR	10
1. <u>Aspectos generales</u>	10
2. <u>Incidencia en la etapa vegetativa</u>	11
3. <u>Incidencia en la etapa reproductiva</u>	11
4. <u>Incidencia en etapa de maduración (llenado de granos)</u>	12
D. RENDIMIENTO Y COMPONENTES	13
1. <u>Aspectos generales</u>	13
2. <u>Número de panojas por unidad de área</u>	14
3. <u>Granos por panoja (espiguillas/ panoja)</u>	14
4. <u>Granos chuzos y semillenos (% de esterilidad)</u>	15
5. <u>Peso de granos</u>	16
6. <u>Importancia relativa de los componentes del rendimiento</u>	18
E. CARACTERIZACIÓN DE GENOTIPOS ÍNDICAS Y JAPÓNICAS	19
1. <u>Diferencias en respuesta a la temperatura</u>	19
2. <u>Diferencias en respuesta a la radiación solar</u>	20
F. CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA DE LA ZONA ESTE	20

1. <u>Aspectos generales</u>	20
2. <u>Precipitaciones</u>	21
3. <u>Temperatura</u>	21
4. <u>Radiación solar</u>	23
G. CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA DE LAS ZAFRAS ESTUDIADAS ..	24
H. BRECHA TECNOLÓGICA	28
1. <u>Definiciones</u>	28
a. Brecha tecnológica	28
b. Reserva tecnológica	28
2. <u>Aspectos generales</u>	28
3. <u>Situaciones en otros países</u>	29
4. <u>Las causas de las brechas tecnológicas</u>	29
III. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u>	31
A. INTRODUCCIÓN	31
B. UBICACIÓN	31
C. FUENTE DE DATOS	31
1. <u>Fuente de datos de características agronómicas</u>	31
2. <u>Diseño experimental de los ensayos</u>	32
3. <u>Determinación y registros</u>	32
4. <u>Fuente de datos climáticos</u>	33
D. CULTIVARES INCLUIDOS EN EL ESTUDIO	34
E. METODOLOGÍA EMPLEADA	34
F. ANÁLISIS ESTADÍSTICO	36
1. <u>Rendimiento y componentes</u>	36
2. <u>Rendimiento y parámetros climáticos</u>	36
IV. <u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u>	38
A. RENDIMIENTO	38
1. <u>Subtipos</u>	38
2. <u>Épocas de siembra</u>	39
3. <u>Interacción entre subtipos y épocas de siembra</u>	40
4. <u>Fecha de siembra</u>	41
5. <u>Zafra</u>	44
B. COMPONENTES DEL RENDIMIENTO	44
1. <u>Épocas de siembra</u>	44
a. Épocas temprana e intermedia	44
b. Época tardía	45

2. <u>Subtipo</u>	47
3. <u>Interacción de subtipos y épocas de siembra</u>	48
C. INFLUENCIA DE FACTORES CLIMÁTICOS SOBRE RENDIMIENTO EN DISTINTAS ÉPOCAS Y DIFERENTES SUBTIPOS DE ARROZ...	50
1. <u>Factores climáticos sobre rendimiento</u>	50
2. <u>Influencia de factores climáticos sobre rendimiento para el subtipo <i>Índica</i> en épocas de siembras tempranas e intermedias</u>	54
3. <u>Influencia de factores climáticos sobre rendimiento para el subtipo <i>Índica</i> en épocas de siembras tardías</u>	55
4. <u>Influencia de factores climáticos sobre rendimiento para el subtipo <i>Japónica</i> tropical en épocas de siembras tempranas e intermedias</u>	57
5. <u>Influencia de factores climáticos sobre rendimiento para el subtipo <i>Japónica</i> tropical en épocas de siembras tardías</u>	58
D. BRECHA TECNOLÓGICA PARA EL PERÍODO EN ESTUDIO.....	58
1. <u>Brecha tecnológica a inicio y fin del período</u>	58
2. <u>Reserva tecnológica</u>	59
V. <u>CONCLUSIONES</u>	60
VI. <u>RESUMEN</u>	62
VII. <u>SUMMARY</u>	63
VIII. <u>BIBLIOGRAFÍA</u>	64

LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro No.	Página
1. Temperaturas críticas mínimas, máximas y óptimas (°C) en diferentes etapas de desarrollo de la planta de arroz.....	5
2. Horas de sol reales para la serie de años 1981-1990.....	23
3. Promedio de temperaturas medias de los meses de enero, febrero y marzo, para las zafras bajo estudio y serie histórica	25
4. Promedio de temperaturas mínimas de los mese de enero, febrero y marzo, para las zafras bajo estudio y serie histórica	26
5. Promedio de la horas de sol de los mese de enero, febrero y marzo para las zafras bajo estudio y serie histórica	27
6. Brechas de rendimiento para el arroz de riego en países seleccionados	29
7. Años de evaluación por variedad	34
8. Resumen de los períodos en los que se estudio la incidencia de las variables climáticas sobre el rendimiento y componentes de éste.....	35
9. Rendimiento según época de siembra	39
10. Rendimiento según época de siembra y subtipo	41
11. Significancia y coeficientes beta estandarizados (<i>path</i>) para componentes del rendimiento en épocas temprana e intermedia	44
12. Significancia y coeficientes beta estandarizados (<i>path</i>) para componentes del rendimiento para épocas tardías	45
13. Significancia y coeficientes beta estandarizados (<i>path</i>) de componentes de rendimiento según subtipo	46
14. Significancia y coeficientes beta estandarizados (<i>path</i>) de componentes de rendimiento por épocas para el subtipo <i>Japónica tropical</i>	47

15. Significancia y coeficientes beta estandarizados (<i>path</i>) de componentes de rendimiento por épocas para el subtipo <i>Indica</i>	47
16. Significancia y coeficientes beta estandarizados (<i>path</i>) de factores climáticos para todas las épocas de siembra y subtipos	48
17. Significancia y coeficientes beta estandarizados (<i>path</i>) de factores climáticos para el subtipo <i>Índica</i> en épocas tempranas e intermedias.....	52
18. Significancia y coeficientes beta estandarizados (<i>path</i>) de factores climáticos para el subtipo <i>Índica</i> en épocas tardías	53
19. Significancia y coeficientes beta estandarizados (<i>path</i>) de factores climáticos para el subtipo <i>Japónica</i> tropical en épocas tardías ...	56

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).....	22
2. Evolución de los rendimientos nacionales y las horas de sol acumuladas en enero, febrero, marzo	24
3. Rendimiento según época de siembra	39
4. Rendimiento según época se siembra y subtipo	40
5. Rendimiento según fecha de siembra para todos los subtipos, índicas y japónicas tropicales	42
6. Rendimiento según fecha de siembra en épocas tardías	43
7. Rendimiento en siembras tempranas e intermedias, según zafra.....	43
8. Rendimiento según radiación 20 días pos floración.....	49
9. Rendimiento según No. de días con T < 15°C 10 días pre – 10 días pos .	50

10. Rendimiento según temperatura máxima 20 días previo a la floración	51
11. Rendimiento según temperatura máxima 20 días previo a la floración para <i>Índicas</i> en épocas tempranas e intermedias	52
12. Rendimiento según No. de días con $T < 15^{\circ}\text{C}$ 20 días pos para subtipo <i>Índica</i> en épocas tardías	54
13. Rendimiento según temperatura máxima 20 días previo a la floración para el subtipo Japónica tropical en épocas tempranas e intermedias	55

I. INTRODUCCIÓN

Es conocida la situación que vive el sector arrocero en cuanto a lo elevado que son los costos hoy en día, esto lleva a que los márgenes económicos sean estrechos. Más allá de los motivos de esta situación que no se pretenden abordar en este trabajo, esto exige la necesidad de altos rendimientos por parte de los productores.

En el Este del Uruguay se ha registrado un incremento en la productividad de 128 Kg/ha/año en los últimos 15 años, asociado al uso de cultivares de alto rendimiento, prácticas culturales mejoradas y condiciones ambientales favorables, obteniéndose rendimientos entorno a 8 ton/ha (Pérez de Vida, 2011). En igual periodo y bajo un manejo estándar, la productividad de los cultivares comerciales a nivel experimental se ha incrementado en 109 Kg/ha/año.

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 las variables significativamente asociadas a las variaciones en rendimiento (Pérez de Vida, 2011), supone un relativo agotamiento del paquete tecnológico que podría impactar en las tasas de ganancia del futuro cercano.

El presente trabajo estudia el comportamiento productivo en estas condiciones de las principales variedades en cultivo del país, en relación a la ocurrencia de factores climáticos con el objetivo de entender la interacción de genotipos y el ambiente. Además se estudia el potencial productivo a través de rendimientos experimentales y comerciales, y su relación (brecha tecnológica), así como su evolución (reserva tecnológica), con el objetivo de identificar oportunidades y desafíos en el sector arrocero del Este del país.

II. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

A. DESARROLLO DE LA PLANTA DE ARROZ

1. Aspectos generales

Las variedades de arroz cultivada pertenecen en gran parte 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 las condiciones climáticas, la variedad, la fecha de siembra, el inicio del riego, las malezas, la fertilización, las plagas y enfermedades, entre otros (Gamarra, 1996).

El ciclo de un cultivar de arroz puede ser influenciado por el fotoperiodo y la temperatura. Los cultivares insensibles al fotoperiodo son característicos de la agricultura moderna, por lo tanto la temperatura es el factor climático con mayor influencia en el ciclo (Yoshida, 1981).

El arroz es una planta que se rige por suma térmica, existiendo una diferencia varietal importante. El crecimiento de la planta de arroz se puede dividir en tres etapas: la etapa vegetativa, la etapa reproductiva y la etapa de llenado de grano y maduración.

2. Etapa vegetativa

Esta etapa va desde la germinación hasta la diferenciación del primordio floral (Chebataroff, 2012).

En esta fase se determina el número de macollos que se corresponde con el número potencial de panojas; también se determina el estado de las hojas que funcionarán durante la etapa reproductiva (De Datta, 1981).

3. Etapa reproductiva

Comprende desde la diferenciación del primordio hasta el 50% de la floración.

Según Yoshida (1981), este periodo se menciona como bastante constante, pero varía con el cultivar y el clima en un rango entre 27 y 46 días. El periodo que va desde la diferenciación del primordio hasta comienzo de la floración es la etapa en que la planta de arroz es más vulnerable a condiciones climáticas adversas.

Tanaka, citado por Castro y Porto (1994), reportan que durante la fase reproductiva se determina el número y tamaño de los granos, así como el estado de las hojas que contribuyen a la maduración.

4. Etapa de llenado de grano y maduración

Esta etapa comienza con el 50% de la floración y termina cuando la humedad promedio del grano es de alrededor del 20%, significando que no hay más deposición de carbohidratos en el grano y comienza un periodo de pérdida de humedad. Las condiciones en esta etapa determinan el último componente del rendimiento, el 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).

B. INCIDENCIA DE LA TEMPERATURA

1. Aspectos generales

El arroz es una planta de origen tropical que sobrevive en un amplio rango de temperaturas (de 10 a 50°C), siendo más afectado por las mínimas extremas de temperatura que por las máximas extremas (Chang et al., citados por Ferreira y Mountauban, 1998).

El factor climático con mayor influencia en el ciclo del cultivo es la temperatura, donde 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 nuestras condiciones es DD50 (Degree Day 50°F) (Roel, 1997).

Durante la estación de crecimiento, la temperatura media, la suma de temperatura, el rango, patrones de distribución y los cambios diarios o la

combinación de éstos, quizá están altamente correlacionados con el rendimiento en grano (Moomaw y Vergara, citados por De Datta, 1981).

Altos rendimientos en grano en países templados como en países tropicales han sido atribuidos a bajas temperaturas durante la madurez. Esto es porque el periodo de madurez se extiende debido a la menor temperatura, dándole mayor tiempo al llenado de granos (De Datta, 1981).

Según Yoshida (1981), daños comunes por frío son, el fracaso en la germinación, retraso en la emergencia de plántulas, retraso del crecimiento, descoloración 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. De todos estos, alta esterilidad de espiguillas, retraso en la floración y madurez irregular son comunes en muchos países.

Entre las temperaturas críticas (bajas-altas), la temperatura afecta el rendimiento en grano, afectando el macollaje, formación de espiguillas y maduración. Usualmente hay una temperatura óptima para los diferentes procesos fisiológicos y éstos varían en algún grado con la variedad (Yoshida, 1981).

Según De Datta (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.

Yoshida (1981) reportó las temperaturas críticas mínimas, máximas y óptimas (en °C) para el crecimiento y desarrollo del arroz.

Cuadro No. 1. Temperaturas críticas mínimas, máximas y óptimas (°C) en diferentes etapas de desarrollo de la planta 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

* refiere a temperaturas medias diarias excepto para germinación.

2. Incidencia en la etapa vegetativa

Para nuestras condiciones, en la zona Este del país hay menor probabilidad de ocurrencia de periodos muy fríos en las primeras etapas del cultivo, retrasando la emergencia y su crecimiento (Gamarra, 1996).

Sasaki, citado por Toriyama y Heu (1982), reporta positiva correlación entre: germinación a bajas temperaturas y crecimiento inicial de plántulas; y crecimiento radicular y establecimiento de plántulas.

Las bajas temperaturas críticas para el macollaje son de 9 °C (Chamura y Honma, citados por Toriyama y Heu, 1982). Hay un rango de temperaturas mínimas entre cultivares por debajo de las cuales estos no tienen crecimiento, este varía entre 9 y 18 °C. Cuando la temperatura es alta el macollaje aumenta, el intervalo foliar se acorta y cada hoja es más larga.

Según Yoshida (1981), 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.

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

Las bajas temperaturas durante la elongación de hojas ocasionan daños irreversibles como esterilidad de las espiguillas, mientras que la muerte de plantas es el resultado indirecto del amarillamiento de las hojas y de la imposibilidad de las raíces de absorber nutrientes (Vergara, citado por Ferreira y Mountauban, 1998).

3. Incidencia en la etapa reproductiva

El periodo reproductivo del arroz, comprendido entre el desarrollo de la panícula y la antesis, es sumamente sensible a las bajas temperaturas. Estos periodos 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 los rendimientos del país, limitando el uso de cultivares de origen tropical (Blanco et al., 1993).

Además del efecto de bajas temperaturas, diversos autores han reportado la incidencia de altas temperaturas en inducir la esterilidad durante la antesis. Los daños por altas temperaturas en esta etapa se darían a muy altas temperaturas, según Munakata, citado por Ferreira y Mountauban (1998), a temperaturas del día y la noche de 35 y 30 °C respectivamente. Estas son difíciles de alcanzar en la zona Este del país, siendo por lo tanto las bajas temperaturas las más problemáticas.

Según Stansel (1975), hay tres fases en la etapa reproductiva donde las bajas temperaturas pueden afectar la producción:

1ª etapa: durante la iniciación de la panoja, que ocurre aproximadamente 4 semanas previas a la floración.

2ª etapa: durante la meiosis, de 10 a 12 días previos a la primera panoja visible.

3ª etapa: durante la antesis, ocurre 1 a 3 días después de que las flores emergieron por sobre la vaina de la hoja bandera y se continua por alrededor de 14 días.

Stansel (1975) encontró que durante la iniciación de la panícula, temperaturas inferiores a 15 °C determinan que el número de espiguillas por panoja disminuya.

Estudios realizados en Japón demostraron que plantas en estado de formación de primordio floral sometidas a temperaturas de 17 °C durante cinco días, resultaron completamente estériles (Tanaka, citado por Lavecchia, 1991).

Satake y Hayase, citados por De Datta (1981) encontraron que la etapa más sensible a las bajas temperaturas es en el estado de joven microspora después de la división meiótica.

Con un propósito práctico 14–7 días previos a la floración comúnmente llamado “botting stage”, (es cuando la distancia entre las aurículas de la hoja bandera y la penúltima hoja es 0 centímetros), es considerado el estadio más sensible a bajas temperaturas. El segundo estadio más sensible es la floración propiamente dicha (Yoshida, 1981).

Nishiyama et al., citados por De Datta (1981) mostraron que la temperatura crítica para inducir esterilidad es de 15-17 °C para variedades tolerantes al frío y 17–19 °C para variedades sensibles.

Temperaturas tan bajas como 12 °C no inducirían esterilidad si solo duraran dos días, pero inducirían un 100% de esterilidad si duraran seis días (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 80–100% de esterilidad de espiguillas.

El efecto del frío puede ser menos severo en el periodo previo a la floración en comparación con la esterilidad que puede ocurrir durante la antesis (Yoshida, 1981).

La mínima temperatura para la apertura de flores es reportada desde 15 a 18 °C en variedades japónicas, a 21 a 22 °C para variedades índicas (Toriyama y Heu, 1982).

4. Incidencia en la etapa de maduración (llenado de granos)

Según Munakata, citado por Ferreira y Mountauban (1998), el óptimo de temperatura para la maduración es entre 20 y 23 °C. Alrededor del día 20 del periodo de llenado, hay una lenta declinación en madurez por bajas temperaturas y una alta declinación por altas temperaturas.

Tanaka, citado por Toriyama y Heu (1982), indica que las temperaturas mínimas para la maduración de grano son entre 21 y 18 °C.

La maduración del grano es adversamente afectada por temperaturas menores a 17 °C (Nishiyama, citado por Ferreira y Mountauban, 1998).

Cuando hay carencia de carbohidratos, algunos granos maduran a expensas de otros, alcanzando de ese modo un peso casi constante (Yoshida y Parao, citados por Blanco, 1991). Según Murata, citado por Blanco (1991), registró que cuanto mayor es la temperatura durante el periodo más activo del llenado de grano, menor es el peso de grano.

Fukushige, citado por Toriyama y Heu (1982), confirma que el efecto de la temperatura sobre la madurez de grano es a través del impacto en la tasa fotosintética y velocidad de traslocación.

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).

El peso de 1000 granos de una misma variedad casi siempre es constante bajo diferentes ambientes. Sin embargo el peso de 1000 granos de una misma variedad en un periodo de tres semanas después de la floración bajo una temperatura media de 22 °C el peso de 1000 granos fue de 24 g, mientras que a 28 °C fue de 21 g (Yoshida, 1981).

Según Yoshida (1981), en los trópicos la temperatura media es tan alta como 29 °C, no es perjudicial para el llenado de granos cuando la radiación solar es alta. Esto nos dice que las variedades índicas están mejor adaptadas a

altas temperaturas, mientras que las variedades japónicas requieren menores temperaturas para un mejor llenado.

5. Prácticas culturales para aliviar los daños por frío

a. Manejo del nitrógeno

Cuando la temperatura es moderadamente baja (16 °C) el porcentaje de esterilidad se incrementa con el aumento de nitrógeno suplementado (Yoshida, 1981).

Según Yoshida (1981), 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.

Toriyama y Heu (1982), reportaron que cantidades de nitrógeno aplicadas más allá del óptimo, causan excesivo desarrollo de hojas, retardo en la floración e incrementa la susceptibilidad a daños por frío.

b. Manejo del agua

Satake, citado por Ferreira y Mountauban (1998), reportó que la esterilidad de las plantas de arroz fue significativamente menor a 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, que las protege del frío.

La esterilidad en parte es causa de la ocurrencia de bajas temperaturas desde embarrigado a floración. El manejo del agua es extremadamente importante en este periodo para aliviar el daño por frío, ya que la capacidad de calor del agua es mayor que la del aire, por lo tanto el agua de inundación en el cultivo de arroz provoca que en la noche la temperatura del agua esté 2 a 3 °C por encima de la temperatura ambiente.

C. INCIDENCIA DE LA RADIACIÓN SOLAR

1. Aspectos generales

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 los componentes de rendimiento. Sin embargo durante la etapa reproductiva tiene un pronunciado efecto en el número de espiguillas. Durante el llenado la reducción en rendimiento es considerada debido a una disminución en el porcentaje de espiguillas llenas (Yoshida, 1981).

Según Yoshida (1981), la radiación solar en la etapa reproductiva tuvo el mayor efecto en rendimiento en grano, seguido por la etapa de llenado y luego la etapa vegetativa con muy poco efecto.

A su vez 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).

En los trópicos, la radiación solar es mayor en la temporada seca que en la húmeda. Consecuentemente el rendimiento en la temporada seca es mayor (Yoshida, 1981).

Según Roel y Baethgen (2005), en un estudio de 31 zafras, encontraron que las frecuencias de producciones altas en rendimientos eran prácticamente nulas en zafras catalogadas como Niño y también las frecuencias de producciones bajas en zafras catalogadas como La Niña.

Stansel (1975), concluye que hay cuatro factores que determinan la radiación solar que el cultivo recibe:

- el largo del día.
- la máxima intensidad de radiación solar que se puede esperar en un día claro.
- nubosidad.

- sombreado entre plantas.

Los dos primeros factores están dados por la ubicación geográfica y el momento del año, por lo que es importante la fecha en la cual el cultivo entra en el periodo crítico. Para años normales cuanto más temprano llegue a primordio, más posibilidades de mejores condiciones de luz y temperatura.

2. Incidencia en la 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 que con 4 o 6. El punto de saturación de luz corresponde a 8 horas de sol 40 días previos a panojado y a 6 horas en los 20 días previos (Munakata, citado por Ferreira y Mountauban, 1998).

Según Murata y Togari, citados por Ferreira y Mountauban (1998), la radiación solar diaria promedio existente durante las seis semanas posteriores al trasplante (momento en que la cantidad de macollos alcanza un valor máximo) no mostro ninguna correlación significativa con el número máximo de macollos por metro cuadrado, pero en cambio presento una correlación muy alta con la cantidad de macollos que producían inflorescencia.

3. Incidencia en la etapa reproductiva

El periodo más crítico a requerimientos de luz se extiende desde la diferenciación de la panícula a 10 días previos a la madurez. Esto abarca 42 días, donde la floración se encuentra en el medio del periodo (Stansel, 1975).

Ensayos realizados por Lucas, citado por Stansel (1975) mostraron una reducción promedio en el rendimiento de 6,5% por cada 1% de reducción en la radiación solar durante el periodo crítico para radiación.

En trabajos realizados por Steinmetz et al. (2013), se encontró que para grupos precoces se observaron 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.

Bajos niveles de luz durante el inicio de primordio a floración, o floración a cosecha reduce el rendimiento en grano considerablemente (Murty y Sahu, 1987).

También según Murty y Sahu (1987), baja luz desde 10 días previos a la antesis hasta 20 días posteriores a la misma es altamente crítico. En un trabajo se demostró que baja radiación solar el día de la antesis, especialmente durante el periodo de la antesis, es crucial en causar esterilidad.

El uso más eficiente de la radiación solar ocurre previo a la floración, por mayor acumulación de materia seca en los tallos, para traslocarla posteriormente en el llenado de granos (Williams, citado por Ferreira y Mountauban, 1998).

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

4. Incidencia en etapa de maduración (llenado de granos)

Sato, citado por Lavecchia (1991), estudió el efecto de la temperatura sobre el rendimiento durante el verano (julio-agosto en Japón) y la intensidad de luz durante la maduración. A través de una serie de correlaciones, concluyó que los altos rendimientos estaban asociados a la temperatura media del aire, 27 °C julio-agosto y 400 horas de luz acumuladas durante setiembre-octubre.

La acumulación de 14.000 cal/cm² o de 200 horas luz durante 30 días antes de la cosecha parecen ser muy importantes (Aspiras, citado por Lavecchia, 1991).

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

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).

D. RENDIMIENTO Y COMPONENTES

1. Aspectos generales

Cada etapa de crecimiento contribuye al rendimiento en grano, y sobre cada una de éstas afectan los factores ambientales.

El rendimiento de grano de arroz (Kg/ha) puede ser explicado por la siguiente fórmula:

$$\text{Panojas/m}^2 * \text{Granos/ panoja} * \text{Peso 1000 granos} * \% \text{ de granos llenos} * 10^{-5}$$

$$\text{Kg/ha} = \text{No. espiguillas/m}^2 * \% \text{ de espiguillas llenas} * \text{Peso de 1000 granos} * 10^{-5}$$

Según Tanaka, citado por Blanco (1991), la producción de materia seca durante el periodo de llenado de grano es determinada por la habilidad potencial de la población fotosintetizante (fuente) y por la capacidad de los granos de aceptar los fotosintatos (fosa). La fosa está compuesta por: número de panojas por unidad de área, número de granos por panoja, porcentaje de granos llenos y peso de grano.

El número de panojas es determinado predominantemente durante el periodo vegetativo, los granos por panoja y tamaño de grano durante la fase reproductiva o de desarrollo de la panoja y el porcentaje de granos llenos durante el desarrollo de la panícula y antesis (Tanaka, citado por Blanco, 1991). El tamaño de fosa es determinado antes de la floración y tiene relativa importancia la influencia climática antes y después de la floración; dependiendo del clima el tamaño de fosa es o no limitante para el rendimiento de grano (Yoshida y Parao, citados por Blanco, 1991).

Horie et al., citados por Ferreira y Mountauban (1998), establecen que 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 fue asociada con baja densidad de espiguillas y baja tasa de llenado de grano.

Baja energía solar y alta temperatura van en detrimento de obtener un alto índice de cosecha. Por esta razón, la producción de granos en áreas templadas puede ser más eficiente para una variedad dada, ya que el índice de

cosecha es mayor. Las causas fisiológicas para esa variación en el índice de cosecha entre e intra variedades de arroz no ha sido entendida (Yoshida, citado por De Datta, 1981).

2. Número de panojas por unidad de área

En un clima templado la radiación solar tiene un efecto favorable sobre el número de granos por metro cuadrado, a través de un aumento en el número de panojas por metro cuadrado (Stansel, Murata, citados por Blanco, 1991).

Sin embargo, ni la temperatura ni la radiación solar durante el crecimiento vegetativo afectaron el número de granos por metro cuadrado en IRRI (Yoshida y Parao, citados por Blanco, 1991).

Según Murata y Matsushima, citados por Ferreira y Mountauban (1998), la cantidad de panojas por metro cuadrado se establece durante el periodo 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.

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 panojas por metro cuadrado es dependiente de la densidad de siembra y del porcentaje de emergencia. El óptimo número de panojas para obtener una alta producción es más atribuible a la variedad que al manejo de la influencia ambiental (Yoshida, 1981).

3. Granos por panoja (espiguillas/panoja)

Existen factores ambientales que determinan el número de flores producidas, así plantas energéticamente ricas al momento de formación de primordio floral favorecen la formación de flores. Es por ello que la capacidad de almacenamiento de reservas en tallo y la capacidad fotosintética resultan importantes para la definición de destinos productivos. La temperatura es otro factor que condiciona la formación de fomas, encontrándose la óptima alrededor de 22 °C, es allí donde el número de espiguillas obtenidas es mayor (Arguissain, citado por Ferreira y Mountauban, 1998).

La cantidad de granos por panoja se determinan en el periodo que va desde 32 a 5 días antes del panojamiento, (en los arroces de clima templado),

siendo el resultado de la diferencia entre número de primordios diferenciados y la cantidad que degeneran. El número de primordios se ve sumamente afectado por el suministro de nitrógeno durante la diferenciación de la panoja (32-20 días antes del panojamiento), mientras que el nivel de radiación solar y otros factores ambientales afectan la cantidad que degeneran en el estado de división reduccional (15-5 días antes del panojado) (Murata y Matsushima, citados por Ferreira y Mountauban, 1998).

La temperatura media y la radiación solar durante el desarrollo de la panoja afectan el número de granos por panoja (Murata, Yoshida y Parao, citados por Blanco, 1991). Entre un rango moderado de 24 a 29 °C, la baja temperatura durante el estado reproductivo aparece como favorable para aumentar el número de granos.

Yoshida y Parao, citados por Blanco (1991), reportaron una correlación lineal negativa entre número de granos por planta y la temperatura media diaria. A su vez la radiación solar durante esta fase está correlacionada positivamente con el número de granos por metro cuadrado y por panoja.

El número de granos por panoja depende del número de flores producidas y del número de esas flores que son polinizadas; y son determinados inmediatamente después de la diferenciación del punto de crecimiento de vegetativo a reproductivo, mientras que el máximo peso de grano es determinado durante el periodo reproductivo (máximo tamaño de gluma) y durante el periodo de llenado de grano (peso final de grano) (Jones et al., citados por Ferreira y Mountauban, 1998).

4. Granos chuzos y semillenos (% de esterilidad)

El término porcentaje de esterilidad no es usado estrictamente, y se refiere al porcentaje de granos infértiles más los granos parcialmente llenos.

Murata et al., citados por Ferreira y Mountauban (1998), reportaron que el incremento del número de espiguillas compite entre sí por los carbohidratos, de modo que las más débiles ubicadas en la parte inferior de la panoja no lograrán ser fertilizadas o abortarán los granos.

La tendencia del porcentaje de granos llenos de descender con el incremento del número de granos parece ser un carácter interno de la variedad (Yoshida y Parao, citados por Blanco, 1991).

Condiciones climáticas desfavorables como bajas o altas temperaturas en la etapa de división meiótica y antesis pueden inducir esterilidad, y durante madurez pueden interrumpir el llenado de algunas espiguillas. A su vez bajas temperaturas y poca disponibilidad de luz durante la formación de la panoja aumentan el número de espiguillas estériles. Éste está dado por las espiguillas no fertilizadas más las llenadas parcialmente, lo que ocurre cuando hay mucho sombreado. La fecundación exitosa determinará el desarrollo de la espiguilla en grano (Yoshida, 1981).

Por otra parte también identifica algunos factores que afectan el porcentaje de espiguillas llenas:

- aplicaciones altas de nitrógeno, dependiendo de la variedad.
- el vuelco asociado a altos niveles de nitrógeno, interrumpe la sección por la cual se transportan los asimilados.
- baja radiación solar determina que el porcentaje de espiguillas llenas disminuya a medida que aumenta el número de espiguillas por metro cuadrado. Cuando la radiación solar es baja la actividad de la fuente puede ser insuficiente para producir suficientes carbohidratos para soportar el crecimiento de todas las espiguillas.
- bajas temperaturas del aire (menores a 20 °C) si persisten por varios días en embuche y panojado.
- altas temperaturas que acortan el periodo de llenado.
- fuertes vientos pueden causar esterilidad en floración a través del desecamiento de la planta.
- déficit hídrico durante floración.

5. Peso de granos

Mientras que en trigo y cebada hay un considerable margen en el tamaño de grano (Evans, citado por Ferreira y Mountauban, 1998) no ocurre lo mismo en arroz, ya que el grano está rígidamente encerrado por la lema y la pálea, cuyos tamaños quedan determinados unos cinco días antes de la antesis por lo que no pueden adquirir más tamaño que el permitido por la cáscara.

El nivel de radiación durante las dos semanas previas a la antesis influye en el tamaño de las cáscaras, por este motivo el tamaño de grano es estable entre las variedades (Murata et al., citados por Ferreira y Mountauban, 1998).

Horie et al., citados por Ferreira y Mountauban (1998), realizaron estudios en diferentes localidades sobre la duración del periodo de llenado, concluyendo que las diferentes localidades determinan diferencias principalmente en la duración del periodo vegetativo. En la duración de la fase reproductiva las diferencias fueron pequeñas, mientras que existieron diferencias de casi 13 días en la duración del periodo de llenado de grano. Esto es comúnmente reconocido, ya que la prolongación del periodo de llenado de grano es importante en determinar alta producción.

Al integrar el número de flores por panoja con el número de panojas por unidad de área se obtiene el componente base que determina el número potencial de fosas. Este número de fosas resulta importante en la medida que su tamaño condiciona la actividad de la fuente, es decir un reducido número de flores no permite que la actividad fotosintética se exprese en todo su potencial durante el periodo de llenado de granos debido a que una baja demanda de fotosintatos limita la fotosíntesis por retrocontrol (Arguissain, citado por Ferreira y Mountauban, 1998).

La variabilidad en el peso de grano entre los mismos cultivares fue descrita como muy restringida. El peso constante para un determinado cultivar se puede deber al tamaño de la cáscara rígida, determinando durante el crecimiento reproductivo. Cuando hay carencia de carbohidratos algunos granos maduran a expensas de otros, alcanzando de este modo un peso casi constante. Murata, citado por Blanco (1991), registro que cuanto mayor es la temperatura durante el periodo más activo del llenado de grano, el peso de grano es menor.

El peso individual de grano en la cosecha es determinado por el suministro de asimilados (por la fotosíntesis o de almacenados) durante el periodo de llenado de grano desde anthesis hasta la madurez (Hay y Walker, citados por Castro y Porto, 1994).

Según Yoshida (1981), el llenado de grano se explica desde un 60 a 100% por fotosíntesis (de las tres hojas superiores) durante el periodo de llenado, la contribución para el llenado de carbohidratos de reserva acumulados hasta la floración pueden ser de hasta un 40%.

Yoshida y Parao, citados por Blanco (1991), en estudios de sombreado en diferentes etapas de crecimiento, encontraron que el sombreado en la etapa

reproductiva y de maduración reduce el peso de los 1000 granos. Baja radiación solar en estos periodos combinada a una alta población conduce a una significativa reducción en el peso.

El peso de grano puede ser más afectado por la duración que por la tasa de llenado de grano (Hay y Walker, citados por Castro y Porto, 1994).

Si la cantidad de carbohidratos traslocados es suficiente, todos los granos se llenarán y serán pesados. Además si por alguna razón el número de flores por panoja es bajo, puede ocurrir que se llenen todos, pero el rendimiento igual será bajo. Si por el contrario, hay más flores que las que puedan ser llenadas con carbohidratos, entonces los granos de la base serán más chicos y habrá muchos que no se llenarán. Esto puede ocurrir por ejemplo, si se dan condiciones de baja luminosidad durante el llenado de grano, lo que reduce la fotosíntesis y por lo tanto la producción de carbohidratos. En esta situación la planta tiene el potencial, pero éste no se alcanza por condiciones climáticas adversas, principalmente la falta de radiación (Gamarra, 1996).

6. Importancia relativa de los componentes del rendimiento

En general el incremento de las panojas por metro cuadrado es el componente más importante del rendimiento, asociado a la producción de arroz, mientras que el porcentaje de granos llenos por panoja y el total de granos por panoja, tienen secundaria y terciaria importancia respectivamente. El peso de grano fue catalogado como de menor importancia en determinar la producción de arroz (Gravois et al., citados por Ferreira y Mountauban, 1998).

Si descomponemos al rendimiento en: número de espiguillas por unidad de área, porcentaje de espiguillas llenas y peso de 1000 granos, entre todos explican un 81% de la variación del rendimiento donde el número de espiguillas por unidad de área explicaría un 60% y las otras dos un 21%. En otras localidades el porcentaje de espiguillas llenas ha sido más limitante que el número de espiguillas por metro cuadrado (Yoshida y Parao, citados por Yoshida, 1981).

El peso de 1000 granos raramente es limitante en la mayoría de las condiciones y dada la pequeña variación en el peso de éstos, la densidad de espiguillas fértiles es lo que efectivamente determina la producción (Yoshida, 1981).

E. CARACTERIZACIÓN DE GENOTIPOS ÍNDICAS Y JAPÓNICAS

1. Diferencias en respuesta a la temperatura

Según Stansel (1975), el pasaje a estado reproductivo está en función de cada variedad. Se congregan en tres grandes grupos de maduración:

- madurez tardía: son las sensibles al fotoperiodo, requieren un largo de día determinado, son la mayoría de las variedades índicas.
- madurez temprana: las variedades japónicas no son (o muy poco) sensibles al fotoperiodo. El total de días a estado reproductivo se da por acumulación de unidades térmicas (UT). Esta se da por la media de °C/día, con temperaturas mayores a 10 °C acumula (temperatura base) pero no se acumulan más de 15 UT/día.
- hay una interacción de temperatura y fotoperiodo. Este grupo es de madurez intermedia.

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 (japónicas).

A su vez define el óptimo rango de temperaturas para la actividad fotosintética: variedades índicas, 25-35 °C y para variedades japónicas 18-33 °C.

Las variedades índicas son marcadamente más afectadas por las variaciones climáticas principalmente por temperatura, seguido por horas de sol. La distribución del parénquima clorofiliano es diferente en índicas y japónicas (clorenquima más compacto). En japónicas al ser más compacto conserva mas la temperatura siendo esto importante en la etapa de plántula.

En trabajos en la EEE durante 1996, conducidos por Zorrilla, se encontró que en siembras tempranas de agosto con temperaturas del suelo de 16-17 °C, El Paso 144 (índica) mostró más bajos porcentajes de germinación y emergencia que INIA Caraguatá (japónica) y ésta que INIA Tacuarí (japónica), coincidiendo con la conocida debilidad al frío de El Paso 144 en otras etapas del cultivo.

Por otra parte Munakata, citado por Ferreira y Mountauban (1998), reportó que el incremento del número de panojas a altas temperaturas (30 °C) es mayor en variedades índicas.

Según Stansel, citado por Ferreira y Mountauban (1998), en variedades índicas temperaturas menores a 10 °C por tres o más días causan daños durante el llenado de grano y maduración. Por su parte variedades japónicas soportan 2 a 3 °C menos que las índicas.

La mínima temperatura para la apertura de flores es reportada desde 15 a 18 °C en variedades japónicas (Terao, citado por Ferreira y Mountauban, 1998) y 21 a 22 °C para variedades índicas (Vergara et al., citados por Toriyama y Heu, 1982).

2. Diferencias en 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 índicas mostraron buenas producciones sobre un amplio rango de IAF, por su parte variedades japónicas requieren un específico índice foliar para una máxima producción. Algunas evidencias muestran diferentes capacidades fotosintéticas bajo variables intensidades de radiación, ya que el espesor de las hojas y el contenido de clorofila son características varietales de probable asociación con eficiencia fotosintética (Chang, citado por Ferreira y Mountauban, 1998).

F. CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA DE LA ZONA ESTE

1. Aspectos generales

Los daños por frío en la etapa reproductiva incrementan la esterilidad de grano, lo que se traduce en bajos rendimientos. En la zona Este la ocurrencia de bajas temperaturas es factible aún en los meses más cálidos, determinando que con siembras en época óptima (octubre y parte de noviembre) igualmente exista el riesgo de daños por frío.

La inclusión en este trabajo de épocas no favorables de siembra (fines de noviembre y diciembre) intenta reflejar con mayor claridad lo expresado anteriormente y caracterizar los distintos subtipos de arroz en condiciones

extremas, para que pueda reflejar la situación planteada en el 75% del área de siembra del país, en primaveras lluviosas.

2. Precipitaciones

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 propios de cada región (Deambrosi et al., citados por Ferreira y Mountauban, 1998). 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.

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.

3. Temperatura

La ocurrencia de fríos y la falta de radiación solar son dos importantes limitantes de la producción de arroz en nuestro país y a su vez una de las principales causas de inestabilidad de los rendimientos (Blanco et al., citados por Ferreira y Mountauban, 1998).

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.

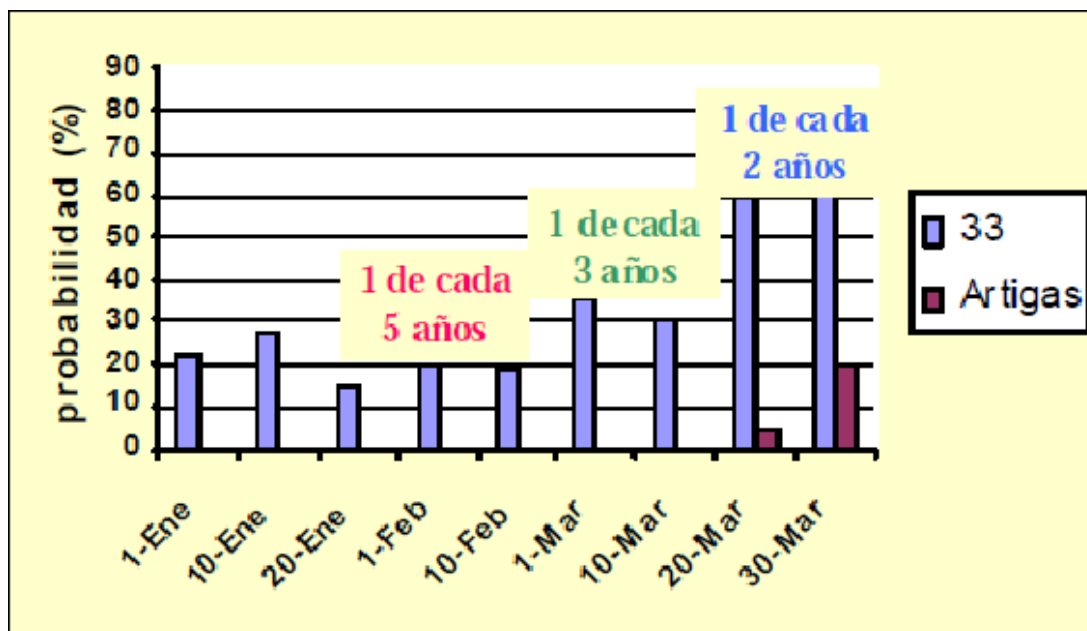


Figura No. 1. Probabilidad de temperaturas mínimas decádicas menores a 15 °C, en la Estación Agrometeorológica de la Unidad Experimental Paso de la Laguna-INIA Treinta y Tres y en la Estación Agrometeorológica de CALNU-Artigas (serie histórica: 1972-1993) (Roel, 1997).

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%.

Se destaca que en la región Este del país aún durante el mes de enero existe la probabilidad real de sufrir los problemas de frío. No siendo así en el extremo Norte del país, donde 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.

Existen algunas diferencias de temperatura promedio entre las zonas donde se produce arroz en el país.

Una zona Centro-Norte con una temperatura 2 °C superior a la temperatura de la zona Este. Y 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 periodo comprendido entre los meses de setiembre y abril (Lavecchia, 1991).

4. Radiación solar

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 No. 2. Horas de sol reales para la serie de años 1981-1990

Localidad	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	Periodo
Treinta y Tres	220.3	226.7	272.2	257.7	197.0	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

Fuente: 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 periodo vegetativo del cultivo (oct.-nov.), sin embargo en las etapas que son citadas en la bibliografía como las de mayor demanda lumínica (etapa reproductiva y de llenado que en la mayoría de los cultivos transcurren 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 2, 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 1981/82 hasta la zafra 1996/97.

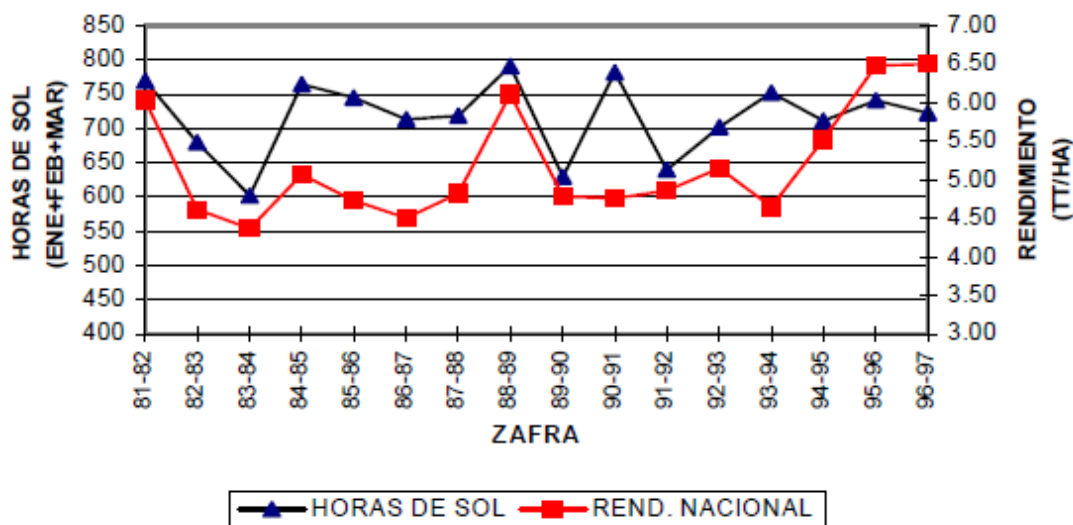


Figura No. 2. Evolución de los rendimientos nacionales y las horas de sol acumuladas en enero, febrero y marzo

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 (Roel, 1997), el promedio de la serie histórica es de 716 horas de sol acumuladas en los meses de enero, febrero y marzo.

En la zafra 1990/91 a pesar de que las horas de sol acumuladas en el periodo fueron altas, los rendimientos fueron bajos debido a la incidencia de bajas temperaturas durante el mismo.

G. CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA DE LAS ZAFRAS ESTUDIADAS

Se presenta la información de las temperaturas medias y mínimas, y de la heliofanía de los meses donde ocurre la floración y el llenado de grano de la mayoría de los cultivos, registrados en la Estación Agrometeorológica de la Unidad Experimental Paso de la Laguna-INIA Treinta y Tres, en cada una de las zafras estudiadas desde 1996/97 hasta 2010/11 y la comparación con los datos promedios de la serie histórica (S.H), que comprende treinta años, de 1980 a 2009 y de las serie de años (X Zafras) que se incluyen en este trabajo, que comprende quince años.

Cuadro No. 3. Promedio de temperaturas medias de los meses de enero, febrero y marzo, para las zafras bajo estudio y serie histórica

Zafra	Enero	Febrero	Marzo	Período
1996/97	25,1	22,0	20,7	22,6
1997/98	21,1	21,5	19,8	20,8
1998/99	21,6	21,8	22,7	22,0
1999/00	23,5	22,5	19,8	21,9
2000/01	23,9	23,9	23,1	23,6
2001/02	22,6	21,7	22,4	22,3
2002/03	23,0	22,9	21,0	22,3
2003/04	23,2	21,8	21,1	22,0
2004/05	24,0	23,1	20,8	22,6
2005/06	23,0	22,3	20,8	22,0
2006/07	23,8	23,6	21,8	23,1
2007/08	22,5	22,8	21,0	22,1
2008/09	22,6	22,7	21,8	22,4
2009/10	23,6	23,7	21,6	23,0
2010/11	25,0	22,7	20,4	22,7
S.H	23,9	23,2	21,8	23,0
X Zafras	23,2	22,6	21,3	22,4

Cuadro No. 4. Promedio de temperaturas mínimas de los meses de enero, febrero y marzo, para las zafras bajo estudio y serie histórica

Zafra	Enero	Febrero	Marzo	Período
1996/97	18,4	16,3	14,2	16,3
1997/98	16,2	16,6	14,8	15,8
1998/99	15,9	15,8	17,1	16,3
1999/00	16,6	16,5	13,4	15,5
2000/01	18,6	18,4	18,5	18,5
2001/02	17,0	16,3	18,5	17,3
2002/03	16,3	17,5	15,3	16,4
2003/04	17,0	15,0	14,4	15,5
2004/05	16,2	16,5	14,1	15,6
2005/06	16,5	15,8	14,8	15,7
2006/07	16,9	17,3	17,1	17,1
2007/08	16,5	17,8	15,2	16,5
2008/09	16,1	16,5	16,6	16,4
2009/10	17,8	19,2	15,9	17,6
2010/11	18,7	16,8	13,9	16,5
S.H	17,6	17,4	16,1	17,0
̄ Zafras	17,0	16,8	15,6	16,5

En cuanto a la temperatura media solo en dos de las quince zafras esta fue superior a los promedios históricos. Tanto para los años que la temperatura media fue superior como inferior a la de la serie histórica, estas diferencias no superan mas allá de un grado al promedio de la serie histórica excepto en dos zafras 1997/98 y 1999/00 con 20,8 y 21,9 °C respectivamente.

En lo que respecta a la temperatura mínima en cuatro de las quince zafras estudiadas ésta fue mayor que el promedio de la serie histórica. En cinco de las zafras las diferencias con la temperatura mínima promedio de la serie histórica fue mayor a un grado, estando estas cinco por debajo del promedio histórico y solo una por encima (2000/01) con 18,5 °C.

Cuadro No. 5. Promedio de las horas de sol de los meses de enero, febrero y marzo para las zafas bajo estudio y serie histórica

Zafra	Enero	Febrero	Marzo	Período
1996/97	9,0	6,7	8,3	8,0
1997/98	6,5	7,0	5,9	6,5
1998/99	7,2	8,5	7,4	7,7
1999/00	9,5	7,3	6,8	7,9
2000/01	8,1	7,9	5,6	7,2
2001/02	8,1	7,8	4,5	6,8
2002/03	10,4	6,5	6,2	7,7
2003/04	8,6	9,6	7,8	8,7
2004/05	9,1	7,5	6,6	7,7
2005/06	7,3	7,5	7,2	7,3
2006/07	8,7	7,5	4,8	7,0
2007/08	9,0	7,5	7,4	8,0
2008/09	8,2	8,6	7,0	7,9
2009/10	8,9	5,8	7,4	7,4
2010/11	8,2	7,6	7,6	7,8
S.H	8,6	7,6	6,1	7,4
̄ X Zafas	8,5	7,5	6,7	7,6

Como se aprecia en el cuadro, en nueve años de los quince estudiados, la heliofania fue superior que el promedio histórico. Se aprecia también el gran aumento ocurrido de las horas de sol en la zafra 2003/04 que supera a la serie histórica en 1,3 horas de sol para el periodo en consideración.

H. BRECHA TECNOLÓGICA

1. Definiciones

a. Brecha tecnológica

Se define como el cociente entre el rendimiento con la tecnología experimental y el rendimiento promedio de los productores. Se trata de un indicador que estima la reserva de conocimiento tecnológico que podrán ir

adoptando los productores en el futuro, siempre y cuando esa tecnología experimental sea aplicable a escala comercial (Díaz y Abadie, 1997).

b. Reserva tecnológica

Es la diferencia en los valores de brechas tecnológicas entre el final y el comienzo del período en estudio. Trata de cuantificar la dinámica del proceso de adopción de tecnología a través del cambio de las brechas tecnológicas en ese periodo (Díaz y Abadie, 1997).

2. Aspectos generales

En muchos países en desarrollo, los rendimientos del arroz de riego se ubican apenas entre las 4 y 6 toneladas/ha, en tanto que el rendimiento potencial de las variedades modernas de arroz está entre 10 y 11 toneladas/ha, en condiciones de trópico húmedo (FAO, 2004).

La brecha de rendimiento entre los alcanzables y los obtenidos a nivel de finca varía entre 10 y 60 por ciento (FAO, 2004).

3. Situaciones en otros países

Cuadro No. 6. Brechas de rendimiento para el arroz de riego en países seleccionados

País	Rendimiento agrícola real de arroz de riego (ton/ha).	Rendimiento agrícola potencial (ton/ha).	Brecha (ton/ha).	Brecha (%)
India (zona norte)	4	6,8	2,8	70%
República de Corea	7	7,6	0,6	9%
Filipinas	5,5	7,5	2	36%
Vietnam	6,5	8,5	2	31%
Egipto	8,5	10,4	1,9	22%
Madagascar	4,1	6	1,9	46%
Italia	6	9	3	50%
Brasil (Santa Catarina)	5,5	8,5	3	55%

Fuente: adaptado de FAO (2004)

Como se puede apreciar existe una gran variación entre países, tanto en rendimientos comerciales como rendimientos potenciales.

También se aprecia las diferencias existentes entre países en cuanto a brecha, encontrándose resultados muy contrastantes como por ejemplo el caso de India con una brecha del 70% y el caso de República de Corea con solo un 9%.

4. Las causas de las brechas tecnológicas

Los factores que causan brechas de rendimiento pueden clasificarse según su modalidad y el grado en el cual contribuyen a las brechas:

- biofísicos: clima/condiciones atmosféricas, suelos, agua, presión por plagas, malezas.
- técnicos/manejo: labranza, selección de variedades/semillas, agua, nutrientes, malezas, plagas y manejo en poscosecha.

- socioeconómicos: nivel socioeconómico, tradiciones y conocimiento de los agricultores, tamaño de la familia, ingresos/gastos/inversiones del hogar.
- institucionales/políticos: política del gobierno, precios del arroz, crédito, oferta de insumos, tenencia de la tierra, mercado, investigación, desarrollo, extensión.
- transferencia de tecnología y vínculos: idoneidad y servicios del personal de extensión; integración entre investigación, desarrollo y extensión; resistencia de los agricultores frente a la nueva tecnología; conocimientos y habilidades; vínculos débiles entre el personal de extensión de los sectores público, privado y no gubernamental.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

A. INTRODUCCIÓN

El siguiente trabajo tiene como objetivo la evaluación de la incidencia de la temperatura y la radiación, en diferentes etapas del cultivo, sobre el rendimiento y componentes de éste.

B. UBICACIÓN

Los ensayos de los que se tomaron los datos, se realizaron en la Unidad Experimental Paso de la Laguna, a 28 Km al Este 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 ubicaron en suelos Solods, de la Unidad La Charqueada, los mismos son adecuados para el cultivo de arroz por presentar un horizonte sub superficial Bt (B- textural) el cual minimiza las pérdidas de agua por percolación y una topografía plana (1-2% de pendiente) que facilita la inundación con el agua de riego.

C. FUENTE DE DATOS

1. Fuente de datos de características agronómicas

Los datos de comportamiento agronómico de los distintos cultivares se obtuvieron de los ensayos de evaluación final de cultivares del Programa de Mejoramiento Genético de Arroz (PMGA) del Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA).

Los ensayos se instalan en diferentes épocas de siembra, en la Unidad Experimental Paso de la Laguna y abarcan preferentemente todo el periodo potencial de siembra en nuestras condiciones (octubre a diciembre), con la finalidad de comparar el comportamiento de las variedades y líneas experimentales en dichos ambientes contrastantes.

Las fechas extremas permiten evaluar la respuesta de los cultivares a condiciones de baja temperatura en la etapa reproductiva y de llenado de grano.

2. Diseño experimental de los ensayos

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

La rotación utilizada en los campos de mejoramiento donde se realiza la evaluación final de cultivares es de tres años de pasturas y un año de arroz. La densidad usada en la mayoría de los años es de 165 Kg de semilla/ha.

La fertilización para la totalidad de años en estudio varía, pero esta variación es ínfima, por lo que en promedio de todos los años es la siguiente:

Fertilización basal: 12,6 Kg de N/ha; 72 Kg de P_2O_5 /ha y 12,6 Kg de K_2O /ha.
Fertilización nitrogenada: 27,6 Kg de N/ha en macollaje y 27,6 Kg de N/ha en primordio (inicio elongación de entrenudos).

En lo que respecta al manejo de malezas en la totalidad de años en estudio también varió tanto el producto utilizado como las dosis, pero lo más repetitivo fue la utilización de: Propanil + Facet + Command (3,5 L/ha; 1,4 L/ha; 0,85 L/ha) respectivamente. En algunos casos también se apreció la utilización de Cyperex (0,2 kg/ha).

El manejo de enfermedades también se controla en estos ensayos, y se lleva a cabo a través de la utilización de fungicidas, existen variaciones de los productos utilizados a lo largo de los años en estudio, lo que si se mantiene es el momento de aplicación y la filosofía de uso de modo preventivo cuando el cultivo presenta el 50% de floración. Existen casos de dobles aplicaciones, una en embuchado y la otra a fin de floración, esto más que nada en épocas de siembra tardía ya que las condiciones ambientales son más favorables para el desarrollo de enfermedades.

3. Determinación y registros

Para los cultivos en evaluación se determinaron las características productivas, rendimiento y componentes de rendimiento.

Los componentes evaluados por variedad son:

- rendimiento de grano a cosecha.
 - número de panojas por metro cuadrado.
 - granos totales por panoja.
 - porcentaje de esterilidad.
 - peso de 1000 granos.
-
- en la cosecha se procede al desborde de un surco a cada lado y 0,25 m en cada cabecera, cosechando por lo tanto 2,4 m².
 - la trilla se realiza con una trilladora experimental eléctrica estacionaria marca Almaco. Previamente se realiza un muestreo con dos tomas (en surcos distanciados a 0,20 m) de 0,30 m lineales para la estimación de componentes de rendimiento.
 - 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 y vacíos por panoja cuya suma da el número de granos totales.
 - se determina a través de la siguiente fórmula, (granos totales-granos llenos)/granos totales*100.
 - se pesa una sub muestra de cinco gramos y se cuenta el número de granos que contiene, obteniéndose el peso de 1000 granos por regla de tres.

4. Fuente de datos climáticos

La información climática fue recabada en la Unidad Experimental Paso de la Laguna, donde funciona una Estación Agrometeorológica Convencional desde el año 1972. El objetivo de esta estación es el de obtener información detallada de clima y hacerla disponible para los diferentes proyectos de investigación.

Para este trabajo se recopilaron datos diarios de: temperatura máxima, mínima y media, también datos de radiación ($\text{cal/cm}^2/\text{día}$) y heliofanía (horas de sol reales), de los meses de octubre a abril inclusive, desde la zafra de 1996/97 hasta la zafra de 2010/11.

D. CULTIVARES INCLUIDOS EN EL ESTUDIO

El Paso 144: variedad tipo índica, de alto potencial de rendimiento.

INIA Tacuarí: variedad tipo japónica tropical, de alto potencial de rendimiento y tolerante a bajas temperaturas.

INIA Olimar: variedad tipo índica, de alto potencial de rendimiento.

Parao: variedad tipo japónica tropical, de alto potencial de rendimiento, tolerante a bajas temperaturas, y resistente a enfermedades de tallo y *Pyricularia spp.*

En el siguiente cuadro se presenta los años de evaluación de cada cultivar en este trabajo y el primer año que fue evaluado cada cultivar.

Cuadro No. 7. Años de evaluación por variedad

Cultivar	Inicio de evaluación	Años de evaluación
El Paso 144	1989-90	15
INIA Tacuarí	1989-90	15
INIA Olimar	1999-00	12
Parao	2006-07	5

E. METODOLOGÍA EMPLEADA

Se tomó como referencia de día cero al 50% de floración. A partir de éste se determinaron cinco periodos para relacionar la incidencia climática sobre el rendimiento y los componentes de éste, a medida que se van determinado durante el ciclo del cultivo.

La elección de los periodos se basó en antecedentes bibliográficos que los citan como críticos para la determinación de los distintos componentes del rendimiento, y ser particularmente afectados por los diversos factores climáticos.

El periodo 20 días previos a la floración es representativo de parte de la etapa reproductiva en la que la bibliografía cita como el estadio más susceptible a la incidencia del clima, principalmente la temperatura.

En el periodo 10 días previos a la floración, ocurre la división reduccional que se cita como muy susceptible a bajas temperaturas.

El periodo de 10 días previo a la floración más 10 días posteriores a la floración marca el final de la etapa reproductiva y el comienzo del llenado de grano y maduración, donde los antecedentes bibliográficos son coincidentes en afirmar que las bajas temperaturas inducen esterilidad.

Luego en los 10 días posteriores a la floración ocurre la polinización y fertilización de las flores los cuales también son sensibles a la incidencia climática. El último periodo 20 días posteriores a la floración, es representativo de la etapa de llenado de grano.

Cuadro No. 8. Resumen de los periodos en los que se estudio la incidencia de las variables climáticas sobre el rendimiento y componentes de éste

			Días previos a la floración			Días posteriores a la floración				
			20	10	0	10	20			
Panojas/m ² ; Granos/ panoja; % esterilidad Rendimiento			20 pre							Temp min, med y Radiación
Panojas/m ² ; Granos/ panoja; % esterilidad Rendimiento				10 pre						Temp min, med y Radiación
% esterilidad; Rendimiento				10 pre + 10 pos						Temp min, med y Radiación
% esterilidad; peso de 1000; Rendimiento						10 pos				Temp med y Radiación
% esterilidad; Peso de 1000; Rendimiento							20 pos			Temp med max y Radiación

F. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Para el análisis estadístico se utilizó el programa estadístico JMP 7.0, de SAS Institute Inc.

1. Rendimiento y componentes

Se hicieron modelos de regresión con el fin de predecir cual o cuales de los componentes explica en mayor medida el rendimiento, tanto para distintas épocas como para los distintos subtipos.

El modelo de regresión utilizado es: $Y = a + bx + bx^2 + \varepsilon$

Donde: Y = al rendimiento.

a = término independiente o intercepto.

b = Parámetro (pendiente)

x = Panojas/m²; Grtot/panoja; Peso de 1000 granos; % esterilidad.

ε = Error experimental.

2. Rendimiento y parámetros climáticos

Para este caso, primero se procedió a realizar un modelo de regresión múltiple utilizando el método STEPWISE. Se utilizó la metodología forward (hacia adelante) y de las variables explicativas que eligió el modelo se seleccionaron algunas basándose en fundamentos biológicos.

Este método selecciona algunas variables de todas las posibles para todos los periodos en consideración.

Luego con las variables seleccionadas se construye el modelo. Después se procedió a realizar regresiones lineales tanto de primer como de segundo orden con aquellos parámetros climáticos que fueron significativos.

El/los modelos de regresión utilizados son: $Y = a + bx + bx^2 + \varepsilon$

$$Y = a + bx + \varepsilon$$

Donde: Y = Rendimiento.

a = Término independiente o intercepto.

b = Parámetro (pendiente)

x = Panojas/m²; Grtot/panoja; Peso de 1000 granos; % esterilidad.

ε = Error experimental.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. RENDIMIENTO

La media general de rendimiento en esta serie de experimentos fue de 7.75 Mg ha⁻¹; considerando solo siembras en fechas óptimas (octubre y noviembre) el rendimiento fue de 8.41 Mg ha⁻¹. Dichos valores son 14% y 24% superiores respectivamente a la media de productividad en el área comercial (6.78 Mg ha⁻¹) en el mismo período.¹ En el mencionado trabajo se identifica que 20% del área comercial fue sembrado fuera del período óptimo; en el presente estudio, la incidencia de siembras tardías fue mayor (44% de los casos). El mayor rendimiento en siembras tempranas e intermedias ha sido ampliamente reportado en Uruguay, coincidiendo con (Gamarra, 1996). La diferencia con el promedio de rendimientos comerciales permite estimar una brecha tecnológica (24%) que resulta de las menores registradas en cultivos extensivos en Uruguay, a diferencia del trigo que presentaba una brecha del 202 % para el año 1991 (Díaz y Abadie, 1997). Así mismo, dicho rendimiento experimental representaría el actual potencial “realizable” del cultivo y es aprox. el 70% del potencial “biológico” (Pérez de Vida, 2011).

1. Subtipos

El rendimiento físico de los subtipos incluidos en este análisis no varió significativamente (Prob = 0,63) en el conjunto de los años. Los rendimientos promedios obtenidos fueron de 7.77 Mg ha⁻¹ y 7.68 Mg ha⁻¹, para índica y japónica tropical, respectivamente. Esta productividad es indicativa del potencial de los actuales cultivares comerciales en un abanico de siembra desde 1° de octubre al 20 de diciembre.

¹ Pérez de Vida, F. s.f. Aspectos de ecofisiología del cultivo de arroz en Uruguay: incidencia de factores climáticos en la productividad. (en prensa)

2. Épocas de siembra

Las fechas de siembra de los experimentos estudiados se categorizaron para su análisis en siembras tempranas, (desde el 1/10 hasta el 31/10), intermedias (desde el 1/11 hasta el 30/11) y tardías (a partir del 30/11). Los rendimientos obtenidos en los cultivares elite presentaron diferencias estadísticamente significativas ($\text{Prob} > ,0001$) entre estos periodos de siembra. La separación de medias ($\alpha = 0,05$), indica que el comportamiento de las épocas temprana e intermedia fue similar (rendimientos 8.32 y 8.64 Mg ha^{-1} , respectivamente), mientras que en épocas tardías el rendimiento disminuía significativamente (figura 1). Estos resultados confirman de modo parcial lo reportado.

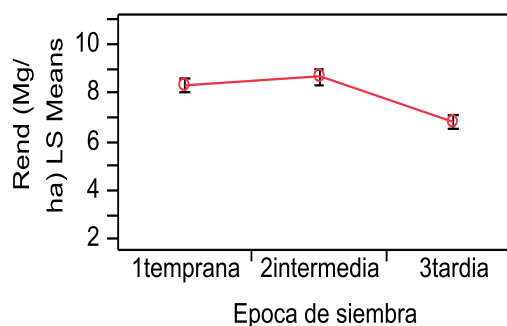


Figura No. 3. Rendimiento según época de siembra

Cuadro No. 9. Rendimiento según época de siembra

Level		Least Sq Mean
2. intermedia	A	8.64
1. temprana	A	8.32
3. tardía	B	6.80

LSMeans Differences Tukey HSD $\alpha=0.050$ $Q=2.35329$. Niveles con distinta letra son distintos significativamente

3. Interacción entre subtipos y épocas de siembra

Los resultados de la interacción fueron estadísticamente significativos (Prob > F 0,0002). Según se aprecia en cuadro 10 y figura 4, los genotipos del subtipo índica se vieron más afectados en épocas tardías respecto al subtipo japónica tropical a pesar de no ser diferencias estadísticamente significativas (7.02 Mg ha^{-1} vs 7.46 Mg ha^{-1} respectivamente).

La depresión en el rendimiento al pasar de época temprana a tardía en índicas fue mayor que en japónicas tropicales, pasando las primeras de 8.54 Mg ha^{-1} a 7.02 Mg ha^{-1} (-1.52 Mg), y las segundas de 7.98 Mg ha^{-1} a 7.46 Mg ha^{-1} (-0.52 Mg).

Estas diferencias entre subtipos en las distintas épocas de siembra en parte serían explicadas por la mayor tolerancia a bajas temperaturas en periodos reproductivos que presenta el subtipo japónica tropical, coincidiendo con Yoshida (1981). Los cultivares índica presentan un mayor potencial en fechas tempranas, superando estadísticamente a los genotipos japónica tropical en siembras intermedias y posteriores.

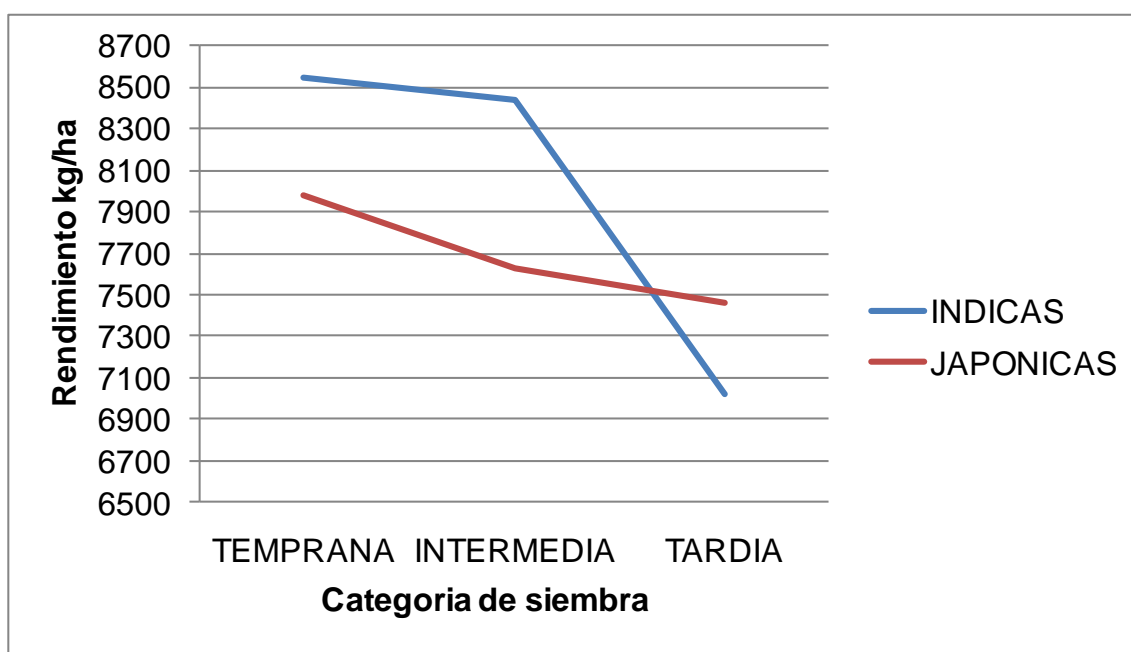


Figura No. 4. Rendimiento según época se siembra y subtipo

Cuadro No. 10. Rendimiento según época de siembra y subtipo

Época	Subtipo					Rendimiento (Mg ha ⁻¹)
Temprana	Índica	A				8.54
Intermedia	Índica	A	B			8.43
Temprana	Japónica trp.	A	B	C		7.98
Intermedia	Japónica trp.		B	C	D	7.63
Tardía	Japónica trp.			C	D	7.46
Tardía	Índica				D	7.02

Como se aprecia en el cuadro 10, para el subtipo japónica tropical no existen diferencias significativas en cuanto a época de siembra, se podría decir que es un subtipo que se comporta estable en todo el rango de siembra; en cambio, en el subtipo índica se obtuvieron diferencias significativas entre épocas, diferenciándose la siembra tardía de la temprana e intermedia, las cuales resultan similares.

4. Fecha de siembra

La fecha de siembra es de las principales prácticas de manejo para obtener altos rendimientos en nuestro país (Gamarra, 1996), en el análisis realizado se ajustó una regresión para explicar la variación del rendimiento en función de fecha de siembra (prob. $F > 0,0001$); el modelo de mayor ajuste es de tipo cuadrático con los siguientes parámetros: Rendimiento (Mg ha⁻¹) = $8.10 - 0.036 \cdot \text{Días después oct1} - 0.00077 \cdot (\text{Días después oct1})^2$ ($R^2=0.24^{**}$) para todos los subtipos; para índicas y japónicas tropicales fue: Rend (Mg/ha) = $9.73 - 0.033 \cdot \text{Días despues oct1} - 0.000856 \cdot (\text{Días despues oct1})^2$ ($R^2=0.31$) y Rend (Mg/ha) = $8.75 - 0.013 \cdot \text{Días despues oct1} - 0.0007388 \cdot (\text{Días despues oct1})^2$ ($R^2=0.13$) respectivamente.

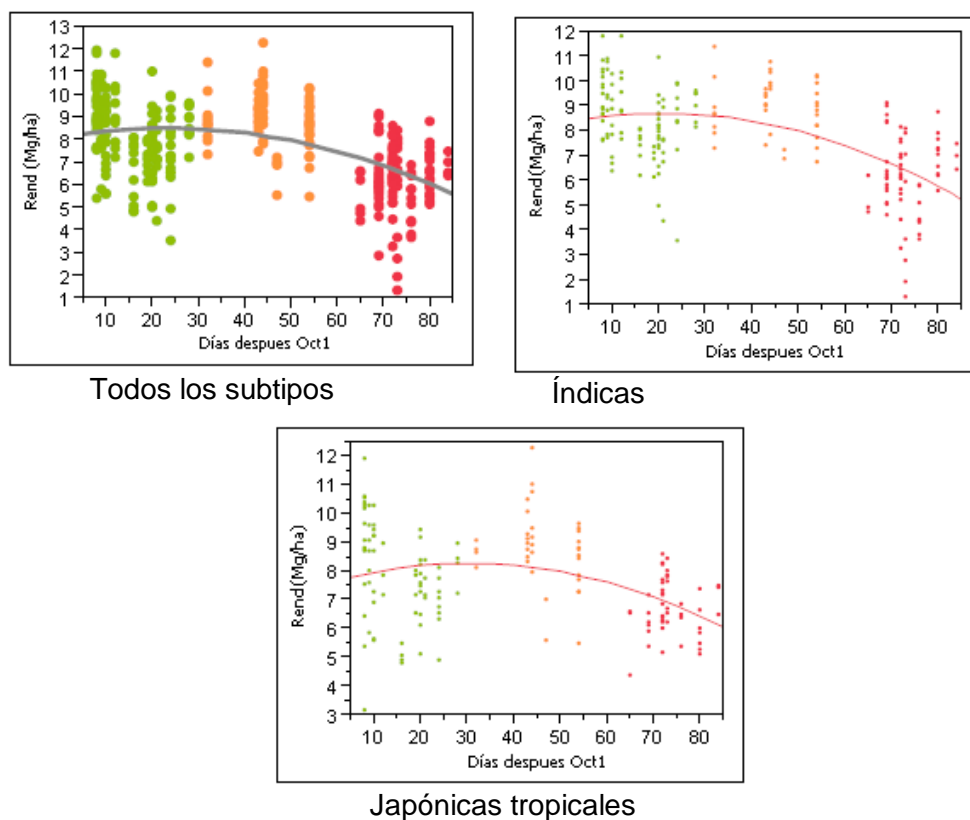


Figura No. 5. Rendimiento según fecha de siembra para todos los subtipos, índicas y japónicas tropicales

Como se aprecia en la figura 5 los rendimientos no se ven afectados por variaciones en la fecha de siembra en un período de hasta 50 días posteriores al 1º de octubre para todos los subtipos; este se identifica como periodo óptimo para las condiciones del Este del país. El rendimiento máximo (8.53 Mg ha⁻¹) se obtendría el día 26/10. En lo que respecta a los diferentes subtipos se puede apreciar claramente que presentan distintas caídas en el rendimiento, mientras que para índicas esa caída arranca aproximadamente a partir del día 35 para japónicas tropicales comienza el día 55. También difieren en la tasa de pérdida de rendimiento por cada día de atraso en la fecha de siembra, 33 kg/ha/día y 13 kg/ha/día para índicas y japónicas tropicales respectivamente. A partir de fines de noviembre se presenta una mayor tasa en

la reducción del potencial. La menor disponibilidad de información de siembras en fechas intermedias podría condicionar la evolución de la tasa de reducción del rendimiento.

Dada la escasa elasticidad de la fenología del cultivo, a medida que se atrasa la fecha de siembra, los estadios de mayor demanda de radiación por el cultivo transcurren en períodos de menor oferta de energía (por ej. en llenado de granos se dispone de -14% a -24%, en siembras de fin de noviembre y mediados de diciembre, respectivamente, relativo a una fecha óptima [15 de octubre], (Pérez de Vida, 2010).

En igual sentido se presenta menor temperatura media y mayor probabilidad de ocurrencia de temperaturas por debajo de 15° C, todo lo cual afecta negativamente la concreción del rendimiento (Roel, 1997). Los actuales resultados indicarían que las diferencias en dichos parámetros climáticos fueron relevantes en la serie estudiada, afectando a las siembras tardías. La caída en rendimiento en este período de siembras tardías significó una pérdida diaria de 0.084 Mg/ha ($R^2=0.24^{**}$).

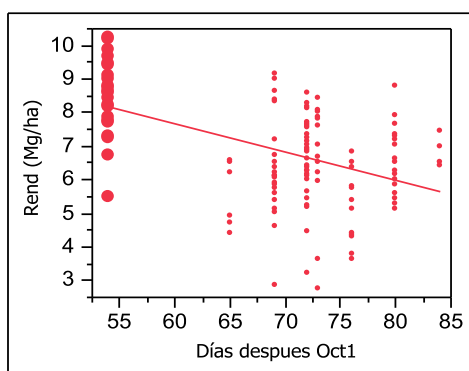


Figura No. 6. Rendimiento según fecha de siembra en épocas tardías

5. Zafra

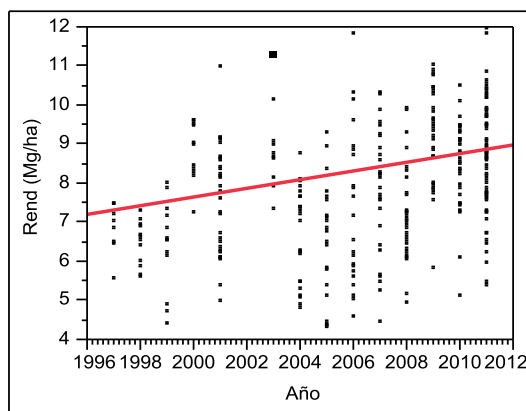


Figura No. 7. Rendimiento en siembras tempranas e intermedias, según zafra

Como se aprecia en la figura 7, existe una alta variabilidad del rendimiento según el año. Se obtuvieron diferencias estadísticamente significativas ($\text{Prob} > F < ,0001$), encontrándose zafras muy contrastantes que difieren en aprox. 3 toneladas.

La regresión rendimiento vs zafra resulta significativa con $b=0.11 \text{ Mg ha}^{-1}\text{año}^{-1}$ ($R^2=0.11^{**}$). Considerando que los cultivares fueron comunes a todos los años y las prácticas de manejo no han tenido mayores modificaciones, el incremento en la productividad sería explicada por condiciones climáticas favorables, como lo reportada por Pérez de Vida (2013) para la misma serie de años en condiciones comerciales. En dicho estudio se obtuvo un incremento de $0,128 \text{ Mg ha}^{-1}\text{año}^{-1}$. En el mismo las variaciones en rendimiento en el período se atribuyeron principalmente a efectos ambientales, dados por menor incidencia de bajas temperaturas y mayor disponibilidad de radiación.

B. COMPONENTES DEL RENDIMIENTO

1. Épocas de siembra

a. Épocas temprana e intermedia

El rendimiento en las fechas de siembra de mayor productividad y para el conjunto de los cultivares mencionados fue explicado por un modelo ($R^2 =$

0,11) que integra los cuatro componentes del rendimiento: panojas/m² (Pan/m²), granos totales/panoja (GrTot), % de esterilidad (%Est) y peso de 1000 granos (P1000). De estos componentes solo la variable Pan/m² resultó estadísticamente significativa ($p = 0,0007$), con un valor de $p=0,307$. Otros componentes como la capacidad de la panoja (GrTot) y el peso de granos (P1000) resultan con probabilidades de 12%, configurando una tendencia a contribuir a la concreción del rendimiento.

Esto estaría indicando que en siembras tempranas e intermedias obtener la población adecuada es el principal factor que definirá el rendimiento del cultivo. Los valores promedios obtenidos para este componente fueron de 536 panojas/m² con un CV=19.4%.

Cuadro No. 11. Significancia y coeficientes beta estandarizados (path) para componentes del rendimiento en épocas temprana e intermedia

Componente	Prob> t 	Std Beta
Pan/m ²	0,0007	0,307
GrTot	0,1197	0,169
%Est	0,1531	-0,118
P1000	0,1178	0,168

b. Época tardía

En fechas de siembra posteriores a noviembre, todos los componentes del rendimiento se asocian a las variaciones en rendimiento, siendo estadísticamente significativos ($R^2 = 0,42$).

Cuadro No. 12. Significancia y coeficientes beta estandarizados (path) para componentes del rendimiento para épocas tardías

Componente	Prob> t 	Std Beta
Pan/m ²	0,0077	0,204
GrTot	<,0001	0,471
%Est	<,0001	-0,423
P1000	<,0001	0,481

En este período de siembras cobran importancia otros componentes del rendimiento y pierde relevancia Pan/m². El valor de coeficiente path para este componente pasa de 0,307 a 0,204 en épocas tempranas e intermedia respecto a tardía (cuadros 11 y 12); en esta última, se obtuvo un valor promedio de 552 panojas/m² con CV%=23.7. Esto estaría asociado a que los estadios relevantes para la definición de este componente –definido tempranamente en el ciclo del cultivo-, transcurren en un ambiente de temperaturas no limitantes. Por otra parte, en %Est resulta p=0,117 en épocas tempranas e intermedias (%Est=18.0) y en siembras tardías p=0,481 (%Est= 27.0). En estas fechas de siembra, resultan condiciones climáticas limitantes para la formación y concreción de aquellos componentes del rendimiento de definición más tardía en el ciclo del cultivo. De modo concomitante, su importancia se ve reflejada en los valores de coeficiente path, que en general aumentan indicando la asociación de las variables mencionadas con el rendimiento.

2. Subtipo

Los componentes del rendimiento tienen diferente relevancia en la conformación del rendimiento de los subtipos de arroz utilizados en este estudio; indicando fortalezas y debilidades de los mismos en las condiciones ambientales en que se evaluaron.

En el subtipo japónica tropical el principal componente asociado a las variaciones en rendimiento resultó el peso de granos (P1000) según coeficiente path, $p=0.390^{***}$. En este subtipo el P1000 es menor que en índica (23 gr vs 25,8 gr en promedio), así como resultó más variable ($cv=16.1\%$ vs. 6.6%). Por otra parte, los componentes que contribuyen a la definición del tamaño de “fosa” resultan significativos, con mayor importancia en el número de granos por panoja.

Cuadro No. 13. Significancia y coeficientes beta estandarizados (path) de componentes de rendimiento según subtipo

Componente	Japónica tropical		Índica	
	Prob> t	Std Beta	Prob> t	Std Beta
Pan/m²	0,009	0,229	0,006	0,194
GrTot	0,001	0,335	0,009	0,180
%Est	0,002	-0,272	<,0001	-0,487
P1000	0,0002	0,390	0,032	0,161

En el subtipo índica, el principal componente resulta %Est ($p=-0.487^{***}$). Esto reflejaría la menor tolerancia a bajas temperaturas en etapas reproductivas que caracteriza a los cultivares índica incluidos en este estudio (El Paso 144 e INIA Olimar) (Pérez de Vida, 2008), mientras que los restantes componentes tuvieron una incidencia significativa pero de menor valor.

En general en cultivares japónica tropical, y en particular en las variedades INIA Tacuarí e INIA Parao dicha tolerancia es mayor (Pérez de Vida, 2008). En estos últimos, la incidencia de esterilidad en los rendimientos es significativa, pero podría indicar la ocurrencia de vaneamiento debido a la

incidencia de enfermedades del tallo (*Rhizoctonia oryzae sativae* y *Sclerotium oryzae*), a restricciones en radiación durante el llenado de granos, y en menor medida como resultante del estrés por bajas temperaturas. Los valores promedios de %Est para los cultivares indica fueron 22,8% mientras que para japónica tropical fue de 20%, -diferencia estadísticamente no significativa-.

El componente No. de panojas/m², es más importante en explicar la variación de rendimientos en cultivares japónica tropical que en cultivares indica; en general, éstas presentan mayor macollaje por lo que se alcanza un número de Pan/m² mayor (573), menos limitante en la expresión del rendimiento. El número de Pan/m² para el subtipo japónica tropical (509) fue significativamente inferior al de indicas.

El número de granos totales/panoja es un componente más relevante en japónicas tropical; este subtipo se caracteriza por menor macollaje como antes mencionado, por lo cual el incremento en la capacidad de la panoja es el principal mecanismo de compensación necesario para lograr el tamaño de “fosa” (granos/m²) que se requiere en un cultivar de alta productividad. El tamaño de la panoja (granos totales) fue significativamente mayor en japónicas tropical que en indicas (130.5 vs 96.5 P=0.001).

3. Interacción de subtipos y épocas de siembra

En los cultivares INIA Tacuarí e INIA Parao sembrados en épocas tempranas e intermedias (cuadro 14) los componentes GrTot y P1000 fueron estadísticamente significativos en la variación de los rendimientos. En fechas tardías de siembra, el componente de mayor relevancia en la variación de los rendimientos resultó el P1000; siendo en estos casos significativos además Pan/m² y %Est.

Cuadro No. 14. Significancia y coeficientes beta estandarizados (path) de componentes de rendimiento por épocas para el subtipo japónica tropical

Cultivares Japónica Tropical

Componente	Épocas de siembra			
	Temprana e intermedia		Tardías	
	Prob> t	Std Beta	Prob> t	Std Beta
Pan/m ²	0,134	0,181	0,008	0,343
GrTot	0,002	0,453	0,225	0,182
%Est	0,879	-0,018	0,006	-0,368
P1000	0,023	0,329	0,005	0,430

En el subtipo índica en épocas de siembra tempranas e intermedias los componentes de mayor relevancia fueron el Pan/m², y %Est. En épocas tardías este componente adquiere mayor relevancia, junto a GrTot y P1000. El número de Pan/m² tienen incidencia menor ($p=0.136$, Prob=0.109), lo cual se podría asociar a una mayor capacidad de macollamiento en condiciones de temperatura no limitantes, obteniéndose un desarrollo de la canopia (Pan/m²) que limita en menor grado la expresión del rendimiento.

Cuadro No. 15. Significancia y coeficientes beta estandarizados (path) de componentes de rendimiento por épocas para el subtipo índica

Cultivares índica

Componente	Épocas de siembra			
	Temprana e intermedia		Tardías	
	Prob> t	Std Beta	Prob> t	Std Beta
Pan/m ²	0,006	0,331	0,109	0,136
GrTot	0,948	0,007	0,001	0,300
%Est	0,052	-0,224	0,0007	-0,397
P1000	0,601	-0,057	0,0006	0,407

En los cuadros 14 y 15 se puede apreciar que para ambos subtipos aumenta la importancia de la esterilidad al pasar de época temprana e

intermedia a tardía. Los valores de %Est se incrementan de 17% a 28% para índicas y de 16,5% a 26% en japónicas tropical. Así mismo, en épocas tardías, para ambos subtipos el P1000 resulta de alta relevancia en la variación de los rendimientos; este resultado se asociaría a la mayor probabilidad de incidencia de condiciones climáticas con menor oferta de radiación y temperaturas no adecuadas durante el llenado de grano.

C. INFLUENCIA DE FACTORES CLIMÁTICOS SOBRE RENDIMIENTO, EN DISTINTAS ÉPOCAS Y DIFERENTES SUBTIPOS DE ARROZ

1. Factores climáticos sobre rendimiento

Considerando el conjunto de casos disponibles, el rendimiento fue ajustado de acuerdo a un modelo compuesto por el grupo de variables en cuadro 16 ($R^2=0.26^{**}$). Tres parámetros climáticos resultaron significativos: Rad 20díasPos ($p=0.413$), número de días con temperatura $< 15^{\circ}$ C en 10díasPre+10díasPos ($p=-0.278$) y Tmáx 20díasPre ($p=0.203$).

Cuadro No. 16 Significancia y coeficientes beta estandarizados (path) de factores climáticos para todas las épocas de siembra y subtipos

Factor climático y periodo según 50% floración	Pr	Std beta
T máx - 20díasPre	0,008	0,203
T máx - 10díasPre+10díasPos	0,184	-0,160
T máx - 20díasPos	0,768	-0,031
T mín - 10díasPre+10díasPos	0,279	-0,112
T mín - 20díasPos	0,186	0,110
Días con ta.<15°C - 10díasPre+10díasPos	0,012	-0,278
Rad - 20díasPos	<,0001	0,413

Pérez de Vida (2011), Pérez de Vida y Ramírez (2012) identificaron que el rendimiento en condiciones comerciales en la región Este fue explicado por variables climáticas similares a las identificadas en este estudio.

En el análisis independiente de estos parámetros climáticos resulta que Rad 20díasPos, presenta un ajuste de polinomio de segundo grado ($R^2=0.19$, $\text{Prob} > F < 0,0001$).

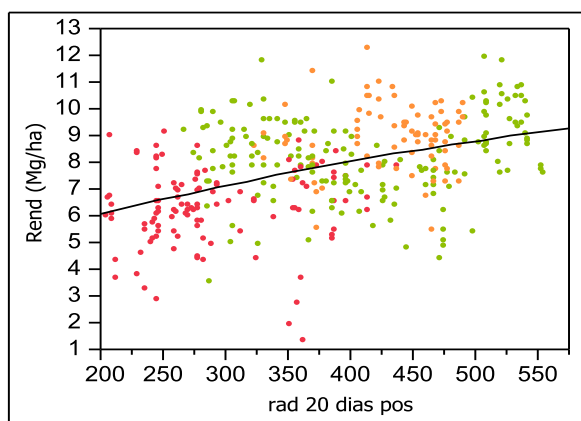


Figura No. 8. Rendimiento según radiación 20 días pos floración

Los valores promedios obtenidos en esta serie de experimentos para radiación durante inicio de llenado de granos fueron de $378 \text{ cal cm}^2 \text{ día}^{-1}$ y

CV%=23.9. Como se aprecia en el figura 8, la ecuación por cada incremento unitario en la radiación existe un incremento de aproximadamente 8,5 kg de arroz. ($\text{Rend Mg ha}^{-1} = 6,1 + 0,0085X - 0,0066X^2$). A medida que aumenta la radiación se incrementa la actividad fotosintética del cultivo aumentando la producción de carbohidratos que darían soporte al aumento en el rendimiento. Sin embargo, a niveles superiores de disponibilidad de energía solar, resulta una menor tasa de incremento en la productividad debido a la saturación de los fotosistemas (Azcon-Bieto y Talón, 2008).

La incidencia de estrés por bajas temperaturas en estadios reproductivos se evalúa mediante la ocurrencia de número de días con temperaturas inferiores a 15°C; ésta resultó estadísticamente significativa ($R^2=0,10$, $\text{Prob} > F < 0,0001$) con un modelo $\text{rend Mg ha}^{-1} = 8,70 - 0,171X$ (figura 9).

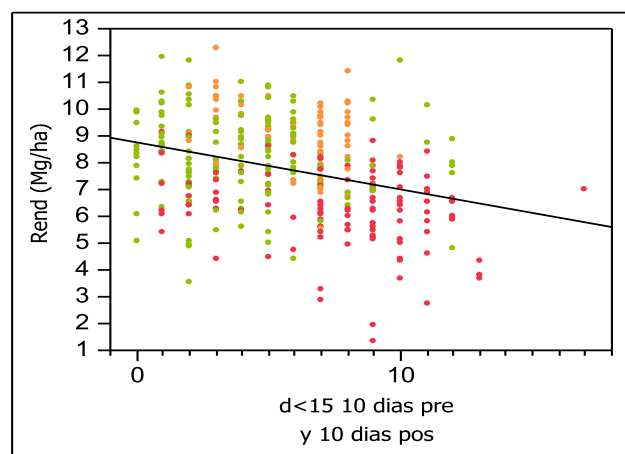


Figura No. 9. Rendimiento según No. de días con $T < 15^{\circ}\text{C}$ en período 10 días pre – 10 días pos

Dicha regresión evidencia la relación existente entre este parámetro climático y el rendimiento (figura 9). Las bajas temperaturas previo a la floración afectan la formación de granos de polen los cuales resultan no viables impidiéndose así la fecundación y por lo tanto la formación de grano. Esto lleva a un aumento en el % de esterilidad y por ende una disminución en el

rendimiento. Durante la floración y posteriormente la existencia de bajas temperaturas también afecta la formación de granos a pesar de que no se haya afectado la viabilidad de los granos de polen; los procesos afectados son germinación del tubo polínico, desarrollo temprano del embrión e interferencia en el inicio de llenado de granos, coincidiendo con Yoshida (1981), que dice que las bajas temperaturas pueden ser más severas al momento de la anthesis que en los días previos, incrementando el % de granos de bajo peso y vanos. De acuerdo a la ecuación ajustada en el modelo que por cada día con temperaturas mínimas por debajo del umbral de 15°C en este periodo el rendimiento decrece en 0.170 Mg ha⁻¹. El valor promedio obtenido para este parámetro climático fue de 5.6 días con temperaturas por debajo de 15°C con un desvío estándar de 3.1 días. Esta media es similar a la reportada por Roel (1997), Pérez de Vida (2011) que contabilizan 3.0 y 2.8 días con Temp. Mín. < 15°C en períodos de 10 días durante los meses de enero y febrero respectivamente, en la serie de años 1973-2012 en UEPL.

En lo que respecta a la temperatura máxima 20 días previo a la floración, el modelo también fue estadísticamente significativo ($R^2=0.10$, $\text{Prob} > F < 0,0001$). El modelo ajustado fue de tipo cuadrático ($\text{Rendimiento Mg ha}^{-1} = 6.10+0.400X+0.029X^2$).

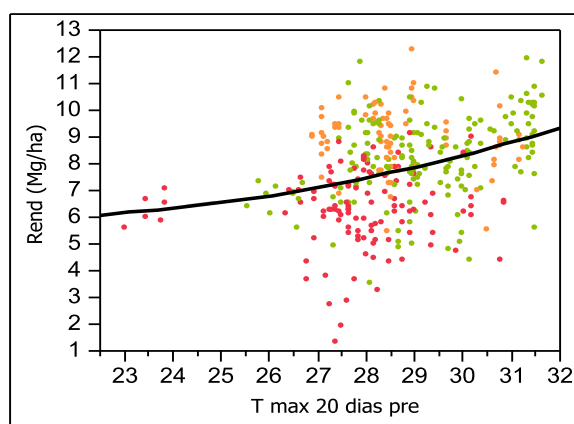


Figura No. 10. Rendimiento según temperatura máxima 20 días previo a la floración

Como se parecía en la figura 10 existe una relación positiva entre rendimiento y temperaturas máximas en un período de 20 días previo a la floración. Este comprende parte del período reproductivo (embuche), en el cual se da la definición del tamaño de la panícula y número de ellas. La incidencia positiva de condiciones climáticas cálidas se da en condiciones en que la media para este parámetro climático fue de 28.7 °C (CV%=5.1). Es ampliamente reportado que el cultivo de arroz tiene como rango óptimo para su desarrollo y crecimiento entre 22-35°C (Stansel, 1975), 25-30 hasta un máximo de 35°C (Yoshida, 1981), siendo en general más afectado en su crecimiento por bajas más que por altas temperaturas (Godwin et al., citados por Ferreira y Mountauban, 1998). En este estudio, se obtuvo que por cada aumento unitario en la temperatura máxima promedio del período (20 días) se daría un incremento de 0.4 Mg ha⁻¹ en el rendimiento.

2. Influencia de factores climáticos sobre rendimiento para el subtipo índica en épocas de siembras tempranas e intermedias

El modelo obtenido mediante “stepwise” fue estadísticamente significativo (R² de 0.12, Prob>F 0,001); los parámetros climáticos seleccionados por el mismo se detallan en cuadro 17.

Cuadro No. 17. Significancia y coeficientes beta estandarizados (path) de factores climáticos para el subtipo índica en épocas tempranas e intermedias

Factor climático y periodo según 50% floración	p-valor	Std beta
T máx - 20díasPre	0,001	0,346
T máx -10díasPos	0,655	0,0589
T mín -10díasPos	0,249	-0,227
Días con ta.<15°C - 10díasPos	0,578	-0,119

De los parámetros climáticos seleccionados por el modelo únicamente la temperatura máxima media durante 20 días pre-floración fue estadísticamente significativa con p=0,347. El mejor ajuste entre esta variable y rendimiento fue un polinomio de segundo grado (Rendimiento (Mg ha⁻¹)=7.50+0.258X-0.0035 X²) (R²=0.11**).

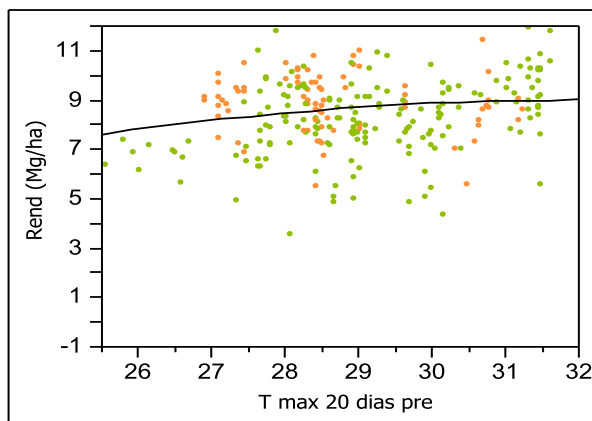


Figura No. 11. Rendimiento según temperatura máxima 20 días previo a la floración para indicas en épocas tempranas e intermedias

El valor medio de temperatura máxima en este periodo fue de 29.3 °C con un desvío estándar de 1.5°C. La incidencia positiva de las temperaturas en el rango observado 25-32, ha sido reportada como se mencionó. En particular en este subtipo de origen tropical su efecto podría incluir el adelantamiento de eventos fenológicos relevantes (por ej. floración) por mayor acumulación térmica; aunque no identificado por el modelo, esto podría coincidir en la ocurrencia de menor probabilidad de estrés por bajas temperaturas nocturnas.

3. Influencia de factores climáticos sobre rendimiento para el subtipo índica en épocas de siembras tardías

En condición de siembras tardías, se identifica un modelo estadísticamente significativo ($R^2=0.25$, $\text{Prob}>F<0,0008$). Las variables incluidas representan la ocurrencia de eventos de estrés por bajas temperaturas entorno a floración afectando la concreción del rendimiento y la disponibilidad de radiación en etapa temprana de llenado de granos (cuadro 18). Siendo la única variable significativa estadísticamente, la de mayor importancia relativa fueron los números de días con temperaturas menores a 15°C 20 días pos.

Cuadro No. 18. Significancia y coeficientes beta estandarizados (path) de factores climáticos para el subtipo indica en épocas tardías

Factor climático y periodo según 50% floración	p- valor	Std beta
T max 20 días pre	0,1934	-0,16955
d< 15 20 días pos	0,0004	-0,50132
rad 10 días pos	0,2736	0,134363

El número de días con temperatura mínima inferior a 15°C durante 20 días pos-floración fue el parámetro climático seleccionado por el modelo como fuera mencionado. En este caso el modelo estadísticamente significativo ($R^2=0.18$, $\text{Prob} > F < 0,0006$) resultante fue $\text{Rend (Mg/ha)} = 7,67 - 0,173728 * d < 15 \text{ 20 días pos}$

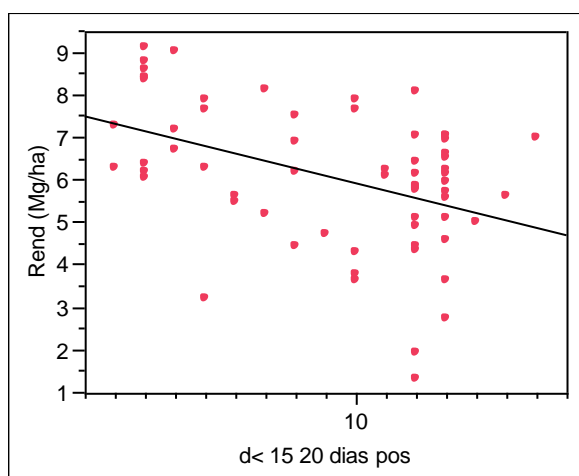


Figura No. 12. Rendimiento según No. de días con $T < 15^{\circ}\text{C}$ 20 días pos para subtipo indica en épocas tardías

En condiciones de siembra tardía se obtiene una reducción de 173 kg por cada día con $ta.<15^{\circ}\text{C}$. El valor promedio para el periodo en consideración de este parámetro climático fue de 7,27 días con un desvío estándar de 2,93 días.

4. Influencia de factores climáticos sobre rendimiento para el subtipo Japónica tropical en épocas de siembras tempranas e intermedias

Al igual que para el subtipo índica en épocas tempranas e intermedias, el parámetro seleccionado por el modelo fue la temperatura máxima 20 días previos a la floración, el cual fue estadísticamente significativo ($R^2=0.26$, $\text{Prob} > F < 0,0001$). El coeficiente beta estandarizado fue 0,505. La regresión de este parámetro climático y rendimiento ajustó un polinomio de segundo grado ($\text{Rend Mg ha}^{-1} = -8.97 + 0.572X + 0.0069X^2$)

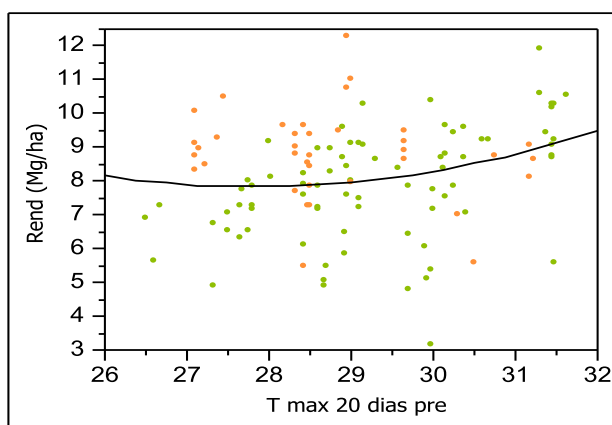


Figura No. 13. Rendimiento según temperatura máxima 20 días previo a la floración para el subtipo japónica tropical en épocas tempranas e intermedias

En término comparativo, el subtipo japónica tropical presentó una respuesta de 0.570 Mg ha^{-1} , mientras que en índicas este incremento fue de 0.258 Mg ha^{-1} , por unidad de aumento en temperatura máxima media del periodo, en similar rango de temperaturas (figuras 11 y 13). Estas diferencias podrían asociarse a una mayor eficiencia en el tipo de planta de los cultivares japónica tropical involucrados en este estudio (INIA Tacuarí e INIA Parao), en función del desarrollo de IAF óptimos menores a los cultivares índica (por ej. El Paso 144, Pérez de Vida y Ramírez, 2012). En condiciones de mayor temperatura sería esperable un incremento en costos metabólicos (respiración) (Hernández et al., 2012), los cuales son mayores en cultivares con mayor desarrollo foliar y autosombreado.

5. Influencia de factores climáticos sobre rendimiento para el subtipo japónica tropical en épocas de siembras tardías

En este grupo de casos, el modelo identificado incluye los parámetros climáticos indicados en el cuadro 19 ($R^2=0.04$ Prob $> F < 0.6$).

Cuadro No. 19. Significancia y coeficientes beta estandarizados (path) de factores climáticos para el subtipo japónica tropical en épocas tardías

Factor climático y periodo según 50% floración	p-valor	Std beta
T max10 días pos	0,2370	-0,22304
T min10 días pos	0,9999	-0,00001
d< 15 20 días pre	0,3128	-0,20453

Como se aprecia en el cuadro 19, ninguno de los parámetros seleccionados por el modelo fue estadísticamente significativo.

Esto quizá este explicado a que para estas épocas de siembra al momento del periodo crítico del cultivo la variabilidad en cualquiera de los parámetros climáticos no fue suficiente como para generar variabilidad en los rendimientos, lo que no quiere decir que para estas épocas los rendimientos no sean menores, ya que la oferta climática si es menor, como se mostró anteriormente al analizar todas las épocas en conjunto.

D. BRECHA TECNOLÓGICA PARA EL PERIODO EN ESTUDIO

1. Brecha tecnológica a inicio y fin del periodo

A inicio del periodo en estudio (1996/97), los rendimientos obtenidos a nivel comercial fueron de 5,69 Mg/ha, mientras que los obtenidos a nivel experimental fueron de 7,06 Mg/ha. Esto representaría una brecha tecnológica para ese momento del 24%. Para el final del periodo (2010/11), los rendimientos comerciales fueron de 7,61 Mg/ha y los experimentales de 8,75, indicando una brecha en torno al 15%.

2. Reserva tecnológica

Se aprecia del punto anterior que la brecha a lo largo de los años va disminuyendo, esto quiere decir que la tasa de incremento en el rendimiento obtenida por los productores es mayor que la existente a nivel experimental, coincidiendo con Perez de Vida (2013), que reporta tasas de productividad de 2,06% a nivel comercial, mientras que a nivel de investigación la tasa es de 1,50 %.

Las diferencias entre las brechas tecnológicas del comienzo y fin del periodo es la reserva tecnológica, la cual en este caso fue del 9%.

Existe un agotamiento importante de la brecha lo que indica que los productores hoy en día están muy cerca de los techos de producción.

V. CONCLUSIONES

Para siembras en épocas tardías el rendimiento se vio afectado negativamente respecto a épocas tempranas e intermedias, las cuales entre si no tuvieron diferencias.

Se encontró una fuerte interacción entre subtipos y fechas de siembra.

Se pudo apreciar una estabilidad en el rendimiento para el subtipo japónica tropical en cualquier época de siembra, a diferencias de las índicas que deprimen significativamente su rendimiento en épocas tardías.

Se encontró una notoria caída en el rendimiento para fechas de siembra 50 días posteriores al 1^{ero} de octubre, el 24% de la variación en el rendimiento fue explicado por esta variable, obteniendo un máximo de 8,53 Mg/ha para el día 26 de octubre.

La variabilidad interanual es muy marcada para el periodo en estudio. En promedio la tasa anual de incremento en rendimiento fue de 110 Kg/ha/año, considerando que tanto las prácticas de manejo como el recambio varietal fueron prácticamente nulas, este incremento podría deberse a condiciones climáticas favorables.

El número de panojas por unidad de área fue el que explicó en mayor proporción la variabilidad en el rendimiento en épocas de siembra temprana e intermedia; mientras que en épocas tardías este pierde importancia y los otros componentes como el porcentaje de esterilidad, granos por panoja y peso de mil granos, son los que explican en mayor proporción la variabilidad del rendimiento.

Los componentes responsables en explicar la variabilidad del rendimiento fueron diferentes entre los subtipos, mientras que para índicas el porcentaje de esterilidad cobró alta relevancia, en japónica tropical lo fue el número de panojas por unidad de área, el tamaño de la panoja y el peso de mil granos.

Ambos subtipos presentan incrementos significativos en porcentaje de esterilidad de granos en épocas de siembra tardía.

De los factores climáticos estudiados, la radiación 20 días pos floración fue el de mayor relevancia, seguido de el número de días con temperaturas inferiores a 15°C 10 días pre y 10 días pos floración.

Para ambos subtipos en época de siembra normal (octubre y noviembre), las variaciones en rendimiento no se ajustaron de modo significativo a modelos que incluían las variables climáticas analizadas. Durante el periodo crítico del cultivo (20 días pre a 20 días post 50% de floración) no existieron limitantes en radiación ni temperaturas; podría considerarse que la variabilidad en el rendimiento esté afectada por otras variables no cuantificadas en este estudio.

Para índicas en épocas tardías, los días con $t < 15^{\circ}\text{C}$ durante el llenado de granos fue el parámetro climático que explicó en mayor medida la variabilidad en el rendimiento.

Ningún parámetro climático explicó la variabilidad en el rendimiento para japónicas tropicales en épocas tardías.

En incremento en la tasa en productividad a lo largo de los años ha sido mayor a nivel comercial que a nivel experimental, lo que llevó a que la brecha tecnológica se redujera en un 9% en todo el periodo, encontrándose tanto los productores como la investigación cercanos a los techos de producción. Esto genera así la necesidad de generar nuevos cultivares para levantar esos techos de producción o practicas de manejo que impacten en el sector ya sea para aumentar la producción o disminuir costos de producción.

VI. RESUMEN

El siguiente trabajo trata sobre como inciden los factores climáticos (temperatura y radiación) en determinadas etapas fenológicas del cultivo de arroz sobre el rendimiento y los componentes de éste. También trata de estimar la brecha tecnológica que existe actualmente en el Uruguay, y se compara con situaciones de otros países. El trabajo se realizó en la Estación Experimental del Este, INIA Treinta y Tres. La base de datos utilizada se extrajo de los ensayos de Evaluación final de cultivares en el cual se comparan distintas épocas de siembra del Programa de Mejoramiento Genético de Arroz. Se obtuvo la información de cuatro cultivares: El Paso 144, INIA Olimar, INIA Tacuarí y Parao, los dos primeros pertenecientes al subtipo indica, y los dos últimos al subtipo japónica tropical. Se registró la fecha de 50% de floración la cual fue tomada como día cero, a partir de esto se determinaron cinco periodos para relacionar la incidencia climática sobre el rendimiento y componentes de rendimiento a medida que estos se van generando y concretando durante el ciclo del cultivo. La incidencia climática por periodo y el análisis de componentes de rendimiento se analizó por regresiones lineales simples de primer y segundo orden y para la totalidad de los periodos por regresiones múltiples utilizando el método Stepwise. Estos análisis se realizaron tanto para épocas de siembra óptimas como para épocas desfavorables para el cultivo (tardías). También se estimó tanto la brecha como la reserva tecnológica para el periodo en consideración.

Palabras clave: *Oryza sativa*; Factores climáticos; Rendimiento; Componentes del rendimiento; Brecha tecnológica.

VII. SUMMARY

The following paper discusses how they affect the climatic factors (temperature and radiation) at certain phenological stages of rice cultivation on yield and components of this. It also attempts to estimate the technological gap that currently exists in the Uruguay, and compared to situations in other countries. The work was conducted at the Experimental Station East Treinta y Tres INIA. The database used was extracted from the final evaluation test cultivars which compares different sowing Program Rice Breeding. Information was obtained from four cultivars: El Paso 144, INIA Olimar, INIA Tacuarí and Parao, the first two states indica subtype, and the last two tropical japonica subtype. Registration date is 50% bloom which was taken as day zero from this five periods were determined to relate the climatic impact on yield and performance components as they are generated during the cycle and summing the crop. Climatic incidence per period and analyzing performance components analyzed by simple linear regression first and second order and for the entire periods by multiple regression using Stepwise method. These analyzes were performed for both optimal planting times to unfavorable times for cultivation (late). It was also estimated both the technological gap and the reserve for the period under consideration.

Keywords: *Oryza sativa*; Climatic factors; Yield; Yield components; Technological gap.

VIII. BIBLIOGRAFÍA

1. AZCON-BIETO, J.; TALON, M. 2008. Fundamentos de fisiología vegetal. 2a. ed. Madrid, McGraw-Hill Interamericana. 656 p.
2. BLANCO, P. 1991. Growth and assimilate partitioning in rice cultivars of different maturity groups. Thesis M.SC. Fayetteville, Arkansas, USA. University of Arkansas. 141 p.
3. _____.; PÉREZ DE VIDA, F.; ROEL, A. 1993. Tolerancia a fríos de los nuevos cultivares precoces INIA Yerbál e INIA Tacuarí. In: Reunião da Cultura do Arroz Irrigado (20^a, 1993, Pelotas). Anais. Porto Alegre, UEPAE. pp. 77-80.
4. CASTRO, L.; PORTO, A. 1994. Análisis de crecimiento y componentes de rendimiento en cultivares de arroz. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 159 p.
5. CHEBATAROFF, N. 2012. Arroz uruguayo. Montevideo, Hemisferio Sur. 352 p.
6. DE DATTA, K. 1981. Principles and practices of rice production. New York, John Wiley and Sons. 618 p.
7. DÍAZ, R.; ABADIE, T. 1997. Rendimiento potencial y brechas tecnológicas de trigo en el Uruguay y el Cono Sur. In: Kohli, M; Martino, D. eds. Explorando altos rendimientos en trigo. Colonia, INIA. pp. 1-20.
8. FAO. 2004. El arroz y la reducción de la brecha de rendimiento. Roma. 2 p.
9. 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. Facultad de Agronomía. 186 p.
10. GAMARRA, G. 1996. Arroz; manual de producción. Montevideo, Uruguay, Hemisferio Sur. 440 p.
11. 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. Facultad de Agronomía. 118 p.

12. LAVECCHIA, A. 1991. Arroz; fertilización nitrogenada en la zona Norte del país. Montevideo, INIA. 20 p. (Serie Técnica no. 17)
13. MURTY, K.S.; SAHU, G. 1987. Impact of low-light stress on growth and yield of rice. In: International Rice Research Institute ed. Weather and rice. Los Baños, Philippines, IRRI. pp. 93-101.
14. PÉREZ DE VIDA, F. 2008. Ecofisiología del cultivo. In: Arroz; resultados experimentales 2007-2008. Treinta y Tres, Uruguay, INIA. pp. 14-20 (Actividades de Difusión no. 545).
15. _____. 2010. Ecofisiología del cultivo. In: Arroz; resultados experimentales 2009-2010. Treinta y Tres, Uruguay, INIA. pp. 1-7 (Actividades de Difusión no. 611).
16. _____. 2011. Ecofisiología del cultivo. In: Arroz; resultados experimentales 2010-2011. Treinta y Tres, Uruguay, INIA. pp. 1-4 (Actividades de Difusión no. 651).
17. _____; RAMÍREZ, D. 2012. Ecofisiología del cultivo. In: Arroz; resultados experimentales 2011-2012. Treinta y Tres, Uruguay, INIA. pp. 1-6 (Actividades de Difusión no. 686).
18. _____. 2013. Ecofisiología del cultivo. In: Arroz- soja; resultados experimentales 2012-2013. Treinta y Tres, Uruguay, INIA. pp. 7-10 (Actividades de Difusión no. 713).
19. ROEL, A. 1997. Ecofisiología del cultivo. In: Arroz; resultados experimentales 1996-1997. Treinta y Tres, Uruguay, INIA. pp. 2-7 (Actividades de Difusión no. 135).
20. _____; BAETHGEN, W. 2005. Asociación entre las fases del “el niño” y la producción arrocera del Uruguay. Montevideo, INIA. 19 p. (Serie Técnica no.148)
21. STANSEL, J.W. 1975. Effective utilization of sunlight. In: Six decades of rice research in Texas. College Station, Texas A&M University Press. pp. 43-50 (Research Monograph no. 4).
22. STEINMETZ, S.; NUNES DEIBLER, A.; BAPTISTA DA SILVA, J. 2013. Estimativa da produtividade de arroz irrigado em função da radiação solar global e da temperatura mínima do ar. *Ciência Rural* (Santa Maria). 43 (2): 206-211.

23. TORIYAMA, K.; HEU, M.H. 1982. Rice research strategies for areas of nonoptimal temperatures. In: International Rice Research Institute ed. Rice research strategies for the future. Los Baños, Philippines, IRRI. pp. 223-237.
24. YOSHIDA, S. 1981. Fundamentals of rice crop science. Los Baños, Philippines, IRRI. 269 p.