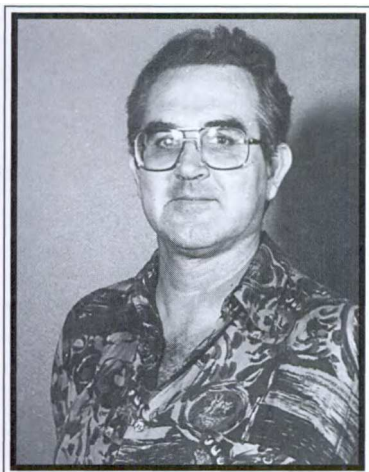


Capítulo 6

Estadística Aplicada a la Selección Recurrente



Francisco J. P. Zimmermann

Francisco J. P. Zimmermann

Investigador del Centro Nacional de Pesquisa de Arroz e Feijão (CNPAP) de la Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), Caixa Postal 179, 74001-970 Goiânia, Goiás, Brasil

Contenido

Introducción

Tamaño de la Parcela

Diseño Experimental

 Bloques completos al azar

 Bloques incompletos

Número de Repeticiones

Ejemplo de Aplicación de los Bloques Aumentados de Federer

Referencias

Introducción

La selección recurrente es una metodología que se desarrolla en tres etapas: evaluación, selección y recombinación. La ganancia genética que se obtiene con los ciclos de recurrencia depende de que esas etapas se realicen bajo criterios y metodologías bien definidos. La estadística es una herramienta que contribuye en la primera etapa de este proceso, ayudando en la identificación de aquellos genotipos de mayor potencial para la selección.

En la selección recurrente, al igual que en otros métodos del mejoramiento genético vegetal, las evaluaciones se pueden dividir en dos fases distintas, según los objetivos del fitomejorador. En la fase inicial no hay, de manera general, gran preocupación por estimar varianzas y comparar tratamientos; más bien el objetivo es seleccionar las líneas, basándose en características cualitativas (fenotipo de las plantas), u ordenar las líneas según sus rendimientos en relación con el testigo. Esto se aplica a la selección recurrente fenotípica.

La etapa final se caracteriza por una necesidad de mayor precisión estadística, ya que se colocan en competición las mejores líneas, las cuales no sólo se comparan entre sí sino también con las variedades utilizadas por los agricultores. Esta fase requiere la realización de experimentos en red a los niveles departamental, regional, nacional y hasta internacional. Esto es aplicable a la selección recurrente con evaluación de progenies.

Uno de los principales objetivos de casi todos los programas de mejoramiento es incrementar el rendimiento de grano de las líneas desarrolladas. Por lo tanto, en esos casos los investigadores deben tomar algunas decisiones relacionadas con las técnicas experimentales que serán

utilizadas en el campo, entre las cuales se pueden destacar: el tamaño de la parcela, el diseño experimental y el número de repeticiones. Algunas de estas técnicas se pueden escoger de manera específica en función de la etapa de trabajo en la cual serán utilizadas, pero otras pueden ser constantes para cualquiera de las fases. Muchas veces las mejores alternativas para cada caso son conflictivas o impracticables; por lo tanto, se puede decir que no hay una alternativa ideal o única.

Tamaño de la Parcela

El primer problema que se debe resolver es el del tamaño de la parcela. Ese será determinado por el número y el largo de los surcos de siembra, los cuales a su vez serán afectados por la necesidad de utilizar bordes o no, y también por la disponibilidad de semillas. En general, se sabe que en el arroz hay el efecto del borde sobre el rendimiento y otras características (Gómez y Gómez, 1976; Zimmermann, 1980).

Gómez y Gómez (1976) han mostrado que en arroz de riego, con espaciamiento de siembra de 20 cm, hay efecto del borde cuando no se deja un área sin sembrar entre las parcelas. Ese efecto es mayor cuanto más cercanos estén sembrados los materiales. Los Cuadros 1 y 2, obtenidos de Zimmermann (1980), indican que se debe considerar un factor adicional, que es el efecto del borde lateral de las parcelas. Este efecto no es igual para todos los materiales y en algunos casos puede ser más marcado; en el Cuadro 1 se observa que IAC 25 e IRAT 13 redujeron sus rendimientos, mientras que Fernandes los incrementó. Gómez y Gómez (1976) también mostraron que hay distintos efectos de competición entre materiales diferentes, o sea, efecto de competición entre líneas vecinas.

Cuadro 1. Efecto del borde lateral en la producción de granos del arroz.

Surco	Producción según cultivar (%)			
	Media de 5 cultivares	IAC 25	IRAT 13	Fernandes
Primer surco externo	100	100	100	100
Surco contiguo al externo	84	79	78	128
Cuatro surcos centrales	88	90	80	96

Cuadro 2. Efecto del borde de la extremidad del surco en la producción de granos del arroz.

Porción del surco	Producción según cultivar (%)			
	Media de 5 cultivares	IAC 25	IRAT 13	Fernandes
Primeros 0.5 m	100	100	100	100
Segundos 0.5 m	73	65	76	68
3.0 m centrales	61	61	57	52

En relación con el borde de los extremos de las líneas, la situación es un poco más simple ya que todas las variedades presentan una disminución similar en el rendimiento, a medida que aumenta la distancia del extremo de la parcela (Cuadro 2). Este efecto permite al fitomejorador dejar de utilizar bordes para las extremidades en caso de que disponga de poca semilla, condición común en los proyectos de selección recurrente y en las etapas iniciales de los trabajos de mejoramiento. Su efecto es aproximadamente el mismo para todos los materiales y, por lo tanto, la posibilidad de que una línea u otra se beneficie es prácticamente nula.

En general, por la naturaleza de los proyectos de selección recurrente, se evalúan y se seleccionan plantas S_0 o líneas S_1 o S_2 , de las cuales no se debe esperar mucha uniformidad para características como rendimiento, altura de plantas, ciclo vegetativo, ángulo de las hojas, capacidad competitiva, etc. Por lo tanto, los efectos del borde observados en materiales homogotos como la

variedad IAC 25 y otras deben ocurrir, y de manera más marcada, en líneas aún en proceso de selección y fijación.

En conclusión, se debe utilizar principalmente el borde lateral. Para esto la recomendación es que, para condiciones de secano, se siembren en cada parcela por lo menos cuatro surcos (espaciados alrededor de 50 cm), y para las siembras con riego se siembren de 6 a 10 surcos (espaciados a 20 cm). El largo debe ser de por lo menos 5.0 m, lo que permite el uso de borde también en las extremidades.

Diseño Experimental

El segundo problema por resolver es la escogencia de un diseño experimental adecuado. Las alternativas pueden ser los bloques completos al azar o los bloques incompletos (Federer, 1956; Cochran y Cox, 1971; Martínez-Garza, 1972; Gómez y Gómez, 1976; Pimentel-Gomes, 1990).

Bloques completos al azar

Estos contienen todos los materiales en evaluación en cada repetición. Cuando se tiene un gran número de tratamientos, sin embargo, generalmente se descartan porque requieren grandes áreas, las cuales difícilmente serán homogéneas como se precisa para una eficiente utilización del método. No obstante, en algunas situaciones especiales este diseño puede ser la alternativa más efectiva.

Una manera de utilizar el diseño de bloques completos al azar es mediante la división de las líneas en grupos más pequeños, y haciendo que cada grupo que contenga testigos comunes (TC) sea un experimento; como consecuencia, se debe hacer un análisis conjunto de los materiales. Esta técnica es llamada 'análisis de grupos de experimentos con tratamientos comunes' (Pimentel-Gomes, 1990).

Para una mejor ilustración del empleo de este diseño se propone como ejemplo un ensayo con 200 líneas, las cuales se dividen en 10 grupos de 20 materiales. Por lo tanto, se trabajará con 10 experimentos en bloques completos al azar con 20 líneas más los tratamientos TC, y con un número 'r' de repeticiones. Si $TC = 4$ y $r = 3$, el total de parcelas será 720. Aún así, este ensayo es muy grande y de difícil manejo, pero es una mejor y más confiable alternativa que la propuesta anterior. Cabe resaltar que para los análisis conjuntos, los errores experimentales de cada grupo se deben considerar homogéneos. En caso contrario habrá que hacer correcciones en el número de grados de libertad de la interacción tratamiento x experimento y del residuo.

Otra alternativa para el uso de este diseño es la que presentan Gómez

y Gómez (1976) bajo el nombre de 'bloques completos en grupos balanceados'. Esta alternativa es útil en situaciones donde se está trabajando con generaciones avanzadas y ya se conocen características de las líneas como altura de las plantas, ciclo vegetativo, reacción a enfermedades, etc. En este caso, las líneas se reúnen en grupos homogéneos, preferiblemente del mismo número de líneas, según los intereses del investigador. El análisis se hace con un diseño de parcelas subdivididas anidadas, donde las parcelas son los grupos y las subparcelas las líneas. En los ensayos pertenecientes a proyectos de selección recurrente que se han manejado, la segregación de las líneas no ha permitido organizar grupos homogéneos de materiales, de manera que esta propuesta no ha sido aplicada.

Bloques incompletos

Abarcan los siguientes diseños: reticulados cuadrados; reticulados rectangulares; bloques incompletos generalizados (BIG) balanceados o no (Cochran y Cox, 1971; Gómez y Gómez, 1976; Pimentel-Gomes, 1990) y los bloques aumentados de Federer (Federer, 1956; Martínez-Garza, 1972).

Reticulados cuadrados y reticulados rectangulares. Los primeros exigen que el número de tratamientos sea un cuadrado perfecto (9, 16, 25, 36, ...), y los segundos requieren el formato de un rectángulo con sus lados iguales a 'n' y 'n+1', ($3 \times 4 = 12$; $4 \times 5 = 20$; ...). Estos tipos de diseño hacen necesario descartar algunas líneas antes de que sean evaluadas o añadir más materiales para completar el número requerido por el diseño. Una alternativa es dividir el número de líneas en dos o tres grupos, lo cual requiere que tales grupos sean analizados en conjunto y que se

apliquen todos los cuidados necesarios para ese tipo de análisis, tal como se menciona para el diseño de bloques completos.

Retomando el ejemplo anterior, donde el interés es evaluar 200 líneas, el número total de parcelas varía entre 588 (para 196 tratamientos y tres repeticiones, en reticulado cuadrado) y 660 (para 212 tratamientos y cuatro testigos, divididos en dos ensayos con tres repeticiones, en reticulado rectangular). Los análisis de estos diseños se presentan en Pimentel-Gomes y García (1991).

Diseños de bloques incompletos generalizados (BIG) y balanceados (BIGB). Los diseños BIG no presentan las restricciones mencionadas porque pueden tener, en teoría, cualquier número de tratamientos. Sin embargo, hay excepciones, principalmente cuando se pretende trabajar con diseños balanceados, donde uno de los inconvenientes es el gran número de parcelas.

Un diseño de bloques incompletos es balanceado (BIGB) cuando todos los tratamientos presentan el mismo número de repeticiones y cada pareja de tratamientos aparece el mismo número de veces en el bloque. Cochran y Cox (1971) y Fisher y Yates (1971) presentan cuadros de posibles soluciones para este problema; las alternativas muestran que un BIGB con 91 tratamientos tendrá 910 parcelas.

Para los no balanceados, el mayor problema es que las comparaciones de medias se hacen con prácticamente cada pareja de tratamientos, con varianzas diferentes; eso hace que el proceso sea lento, complejo y de resultado aproximado.

Bloques aumentados de Federer (BAF). Para éstos, las líneas se dividen en grupos y en cada uno de ellos se añaden los testigos; ese conjunto conforma un bloque. El punto común

entre los grupos son los testigos que se repiten en cada bloque (Federer, 1956; Martínez-Garza, 1972). La utilización de testigos comunes en todos los bloques permite que se haga un análisis de varianza. El efecto de los bloques, cuando se presente, se puede corregir mediante el ajuste de los promedios, los cuales en este caso corresponderán al rendimiento individual de cada línea.

Algunas ventajas de los BAF son: se logra tener bloques más homogéneos y un número de parcelas más manejable; como cada línea se siembra en una sola parcela, la necesidad de semillas es mínima; los bloques no precisan tener el mismo tamaño, o sea, que las líneas se pueden dividir en grupos de tamaño variable. En el ejemplo con las 200 líneas, el material se puede dividir en 20 grupos de 10 líneas, adicionando cada grupo con cuatro testigos; por lo tanto, cada bloque tendrá 14 parcelas para un total de 280.

Los resultados que presenta el Cuadro 3 indican que hay una gran diferencia entre el número de líneas, de ensayos y de parcelas totales trabajadas para los distintos diseños experimentales. El número de líneas varió entre 174 y 212. Un estudio de costo/beneficio muestra claramente la ventaja de utilizar el diseño 'bloques aumentados de Federer', ya que permite evaluar un número correcto de líneas, presenta buena precisión en la estimación del error experimental y requiere un bajo número de parcelas en un único ensayo, lo cual implica menor inversión de recursos.

Se han comparado varios diseños en cuanto a su eficiencia para la selección de líneas. Rangel y Zimmermann (manuscrito en preparación) compararon los reticulados cuadrados (10 x 10) con dos y tres repeticiones, con los bloques aumentados de Federer de

siete (5 + 2) y 12 (10 + 2) parcelas por bloque. Considerando los dos sistemas para el cual se realizó el estudio, los resultados mostraron un índice de concordancia en la selección entre 20% y 44% para una intensidad de selección de 25%, y entre 33% y 57% para una intensidad de selección de 30% (Cuadro 4). Para las comparaciones solamente entre los reticulados, el índice mínimo de concordancia fue de 80% y para los BAF el índice varió entre 32% y 48%.

Los resultados en cuanto a la eficiencia del diseño para seleccionar líneas y la relación costo/beneficio muestran una nítida ventaja de los bloques aumentados de Federer para

la selección recurrente, en comparación con otros diseños experimentales. Sin embargo, este diseño aún es muy poco conocido entre los fitomejoradores de plantas de reproducción sexual. Ospina-Rey (1991) lo utilizó para evaluar la reacción a las enfermedades en líneas de arroz distribuidas en América Latina por la Red Internacional para la Evaluación Genética del Arroz (INGER). En caña de azúcar, cultivo para el cual fue creado el diseño, su utilización es más común.

Para mayores detalles sobre el diseño BAF se recomiendan los trabajos de Federer (1956) y de Martínez-Garza (1972). Los análisis

Cuadro 3. Número total de líneas evaluadas y de parcelas requeridas, y número de ensayos realizados para algunos de los tipos de diseños experimentales.

Diseño experimental	Número total de líneas evaluadas ^a	Número total de parcelas	Número de ensayos
Bloques completos	200	612 ^b	01
Bloques completos con tratamientos comunes	200	720 ^b	10
Reticulado (14 x 14)	192	588 ^b	01
Reticulado (10 x 10)	192	600 ^b	02
Reticulado (14 x 15)	206	630 ^b	01
Reticulado (10 x 11)	212	660 ^b	02
BIG balanceado	174	1820	02
Bloques aumentados de Federer	200	280	01

- a. Adicionar cuatro testigos (tratamientos comunes) por ensayo.
- b. Considerando tres repeticiones por ensayo.

Cuadro 4. Comparación de los índices de concordancia en la selección de líneas, al utilizar los reticulados cuadrados (RQ) y los bloques aumentados de Federer (BAF) en dos sistemas de cultivo y bajo dos índices de selección: 25% (resultados descritos en la parte superior de la línea diagonal) y 30% (en la parte inferior de la línea diagonal).

Diseño experimental ^a	Riego				Secano favorecido			
	RQ2	RQ3	BAF7	BAF12	RQ2	RQ3	BAF7	BAF12
RQ2	-	80	44	24	-	80	44	32
RQ3	100	-	44	20	87	-	44	36
BAF7	57	50	-	32	53	47	-	48
BAF12	33	33	47	-	40	43	43	-

- a. RQ2 = Reticulado cuadrado, 2 repeticiones; RQ3 = Reticulado cuadrado, 3 repeticiones; BAF7 = Bloques aumentados de Federer, con 7 parcelas; BAF12 = Bloques aumentados de Federer, con 12 parcelas.

se pueden realizar siguiendo el paquete estadístico 'Statistical Analysis System' (SAS Inst., 1985), utilizando el PROC GLM con error del tipo III.

Número de Repeticiones

Un último problema por resolver son las repeticiones, las cuales son importantes para estimar la varianza y eliminar la influencia de los suelos. La definición del número de repeticiones que se va a utilizar depende de varios factores como la disponibilidad de área experimental, la cantidad de semillas y el interés en comparar las medias de los tratamientos mediante pruebas estadísticas. En este último caso, el número de repeticiones debe ser el mayor posible, toda vez que el valor de la diferencia mínima significativa es extremadamente influenciado por él y por el coeficiente de variación (CV).

Zimmermann y Conagin (1989) y Conagin y Zimmermann (1990) realizaron un estudio de simulación en computador, suponiendo una diferencia de 25% entre el mejor tratamiento y el testigo. Esa relación se analizó utilizando dos valores de CV y tres números de repeticiones. Los resultados en el Cuadro 5 muestran que con un CV de 15% y tres repeticiones, sólo hubo un 5% de tratamientos estadísticamente diferentes según la prueba de Tukey, mientras que con 12 repeticiones ese nivel se incrementó a 74%. Con un CV de 25%, los valores fueron de 2% y 13%, respectivamente. En el caso de la prueba de Dunnett, la cual es específica para comparar tratamientos con testigos, los respectivos valores fueron de 15% y 96% para el CV de 15%, y de 6% y 31% para el CV de 25%. La prueba t, considerada la más floja para ese tipo de comparación, solamente consiguió discriminar el mejor tratamiento y el testigo en 100%

Cuadro 5. Porcentaje de discriminación entre el mejor tratamiento y el testigo.

Número de repetición	Prueba estadística	CV de 15%	CV de 25%
12	DMS	100	82
	Dunnett	96	31
	Tukey	74	13
6	DMS	88	47
	Dunnett	58	12
	Tukey	15	2
3	DMS	72	19
	Dunnett	15	6
	Tukey	5	2

de los casos cuando se utilizaron un CV de 15% y 12 repeticiones.

Esas relaciones también fueron estudiadas por Pimentel-Gomes (1990), quien encontró que cuando la diferencia mínima significativa por la prueba de Tukey se expresa en porcentaje de la media del ensayo, su valor es siempre mayor que el doble del valor del CV, para la situación más común de cuatro repeticiones. Para que ese valor sea similar al del CV, se necesitan más de 10 repeticiones, y ese número es tanto más grande cuantos más tratamientos se deseen evaluar. De esta manera, en la prueba de Tukey y para valores del CV de 15% se necesitan alrededor de 10, 16, 18 y 20 repeticiones para 2, 4, 8 y 12 tratamientos, respectivamente.

Es evidente que difícilmente se pueden utilizar números tan elevados de repeticiones en ensayos de evaluación de líneas en proyectos de selección recurrente, por las limitaciones ya mencionadas. En general, se recomienda para esos casos que, cuando se utilicen los diseños más comunes (bloques completos o incompletos), se hagan por lo menos tres repeticiones. Cuando se utilizan solamente dos repeticiones, la pérdida de una parcela implica la eliminación del

tratamiento y, para los reticulados cuadrados, la pérdida de la estructura del diseño.

En algunas situaciones frecuentes en proyectos de selección recurrente, cuando el material que se está evaluando proviene de generaciones tempranas y el interés principal es la eliminación de las peores líneas, es muy común que solamente se pueda sembrar una parcela por línea, debido a problemas de disponibilidad de semillas.

En resumen, para las evaluaciones más comúnmente requeridas por los proyectos de selección recurrente, el diseño de bloques aumentados de Federer parece ser la alternativa más recomendada. Bajo ese diseño, las líneas en evaluación siempre tendrán una repetición, para lo cual no se requiere mucha semilla; los testigos serán representados varias veces, lo que permite una buena estimación del error y un valor razonable para la diferencia mínima significativa para las pruebas de comparación de medias; finalmente, el área experimental necesaria para los ensayos se reduce, lo que permite ahorrar tiempo y recursos.

Ejemplo de Aplicación de los Bloques Aumentados de Federer

Considerando la poca utilización del diseño de bloques aumentados de Federer por los fitomejoradores de autógamias, como también por muchos estadísticos, a continuación se ofrece un ejemplo del uso de ese diseño experimental, su esquema de análisis y el ajuste de medias.

Para eso se utilizan los datos generados por la Red de Evaluación de Germoplasma de Arroz de Riego, coordinada por EMBRAPA-CNPAF.

Cada año se evalúan alrededor de 200 líneas con el objetivo de identificar cuáles son las más rendidoras, y recombinarlas para el próximo ciclo de selección recurrente. En el año 1994/95 se probaron 190 líneas, para lo cual se utilizó el diseño de BAF con cuatro tratamientos comunes (enumerados de 1 hasta 4) y los 190 materiales bajo evaluación (enumerados de 5 hasta 194). Cada uno de los 10 bloques tuvo 23 entradas (19 líneas y los cuatro testigos comunes).

A continuación se presenta el esquema utilizado en el análisis de varianza y los resultados:

Fuente de variación	GL	SC (Tipo I)	SC (Tipo III)
Bloques	9	54133146.09	13884481.48
Tratamientos ajustados	193	786288208.75	786288208.75
Error	26	56879518.52	56879518.52
Total	228	-	-

En este caso, las sumas de cuadrados del tipo I (Type I SS) son los valores de los bloques, sin incluir los tratamientos y los tratamientos ajustados. Las sumas de cuadrados del tipo III (Type III SS) representan la suma de cuadrados de bloques ajustados respecto a los tratamientos.

Los resultados que presenta el Cuadro 6 muestran que los tratamientos comunes no cambian sus valores, o sea, que los promedios ajustados y los aritméticos son los mismos. La razón para eso es que esos tratamientos están presentes en todos los bloques, y las líneas tienen sus valores ajustados para el efecto del bloque donde están sembradas. Ese efecto es positivo cuando el promedio de los tratamientos comunes en el bloque es menor que su promedio en todo el ensayo y negativo

Cuadro 6. Promedios de producción (kg/ha) ajustados y aritméticos (se muestran solamente algunos datos para clarificar el empleo de la metodología de los tratamientos comunes y de las líneas bajo evaluación.

Tratamiento	Promedio ajustado	Promedio aritmético
1 ^a	8480	8480
2 ^a	7240	7240
3 ^a	7871	7871
4 ^a	8940	8940
5	6282	6400
6	7382	7500
7	7082	7200
24	6583	5500
25	10182	9100
26	5282	4200
70	3907	5000
71	4208	5300
72	4708	5800
192	3182	3100
193	5782	5700
194	5982	5900

a. Tratamientos comunes.

FUENTE: Datos gentilmente ofrecidos por el Dr. Paulo Hideo Nakano Rangel.

en la situación inversa. En este ejemplo se encontraron diferencias que variaron desde la positiva 1083 kg/ha (suma) hasta la negativa 1092 kg/ha (resta). Esas diferencias son una muestra de la eficiencia del diseño de bloques aumentados de Federer.

Referencias

Cochran, W. G. y Cox, G. M. 1971. Diseños experimentales. Ed. Trillas, México. 661 p.

Conagin, A. y Zimmermann, F. J. P. 1990. Seleção de materiais nos trabalhos de melhoramento de plantas, II: Poder discriminativo de diferentes testes estatísticos. Pesqui. Agropecu. Bras. 25:1415-1428.

Federer, W. T. 1956. Augmented (or hoonuiaku) designs. Hawaii. Plant. Rec. 55:191-208.

Fisher, R. A. y Yates, F. 1971. Tabelas estatísticas para pesquisa em biologia, medicina e agricultura. Ed. USP (Universidade de São Paulo), São Paulo, Brasil. 150 p.

Gómez, K. A. y Gómez, A. A. 1976. Statistical procedures for agricultural research with emphasis on rice. International Rice Research Institute (IRRI), Los Baños, Filipinas. 294 p.

Martínez-Garza, A. 1972. Diseño y análisis de experimentos con caña de azúcar. Talleres Gráficos de La Nación, Chapingo, México. 204 p.

Ospina-Rey, Y. 1991. Evaluación de líneas incluídas en el Vivero de Observación para América Latina (VIOAL) de 1985-1989 a enfermedades limitantes en arroz (*Oryza sativa* L.) bajo condiciones de secano favorecido. Tesis, Ing. Agr. Universidad Tecnológica de los Llanos Orientales, Facultad de Ingeniería Agronómica, Villavicencio, Colombia. 66 p.

Pimentel-Gomes, F. 1990. Curso de estadística experimental. 13 ed. Editora Nobel, Piracicaba, São Paulo, Brasil. 468 p.

_____ y García, C. H. 1991. Experimentos em látice: Planejamento e análise por meio de "pacotes" estatísticos. IPEF Serie técnica (Piracicaba, Brasil) 7(23):1-69.

SAS (Statistical Analysis System) Institute Inc. 1985. SAS user's guide: Statistics, Version 5. Cary, NC, E.U. 956 p.

Zimmermann, F. J. P. 1980. Efeito de bordadura em parcelas experimentais de arroz de sequeiro. Pesqui. Agropecu. Bras. 15:297-300.

_____ y Conagin, A. 1989. Seleção de materiais nos trabalhos de melhoramento de plantas, I: O poder discriminativo da posição de classificação. Pesqui. Agropecu. Bras. 24:1013-1019.