

**Análisis de medidas repetidas
provenientes de un experimento sobre
riego y madurante en caña de azúcar
(*Saccharum* spp.)**

*E.A. López Bautista**

*E. Quaresma***

FACULTAD DE
AGRONOMÍA
USAC

* Doctorando Estadística y Exp. Agronómica, ESALQ/USP, Prof. Titular III, FAUSAC (Guatemala).

** Doctorando Estadística y Exp. Agronómica, ESALQ/USP, Profesor UFOPA, Santarém, Pará (Brasil).

Resumen

La caña de azúcar (*Saccharum* spp.) es uno de los cultivos de mayor importancia económica para Guatemala. Uno de los principales objetivos de los ingenios azucareros es obtener los mejores rendimientos de azúcar por tonelada de caña de forma estable, para ello es realizada la aplicación de madurantes químicos. Para obtener los mejores resultados son realizados experimentos, en los cuales son evaluados diferentes tipos y dosis de madurantes, así como las condiciones de manejo que puedan afectar los resultados de estos productos. En estos ensayos es común realizar mediciones de algunas variables a lo largo del tiempo (lecturas realizadas después de la aplicación del madurante). El objetivo de este trabajo es presentar un análisis estadístico de datos de medidas repetidas de un experimento realizado con caña de azúcar, para evaluar el efecto de la humedad en el suelo en el efecto del madurante a base de glifosato. Fueron realizadas cinco lecturas de rendimiento de sacarosa expresado en kilogramos de azúcar por tonelada de caña cortada. El diseño experimental utilizado fue bloques completos al azar con arreglo en parcelas divididas y considerando el efecto del tiempo. Inicialmente fue aplicada la prueba de esfericidad de la matriz de varianzas, verificando que las varianzas de las diferencias entre pares de tiempos no son todas iguales y por tanto se optó por el análisis multivariado de perfiles. Con una mejor precisión este análisis permitió estudiar el comportamiento del rendimiento de azúcar con la aplicación del madurante a lo largo del tiempo. Por otra parte, la humedad en el suelo no tuvo efecto significativo.

Palabras clave: Estadística Experimental, análisis multivariado, glifosato.

Análisis de medidas repetidas provenientes de un experimento sobre riego y madurante en caña de azúcar (*Saccharum spp.*)

Analysis of repeated measures from an experiment on irrigation and ripener in sugarcane (*Saccharum spp.*)

Abstract

Sugarcane (*Saccharum spp.*) is one of the crops with major economic importance in Guatemala. One of the main objectives of the sugar mills is to obtain the best and stability yields of cane and sugar per ton of cane; this is performed with the application of chemical ripening. For best results are carried out experiments, in which are evaluated different types and doses of ripeness, as well handling conditions that may affect the results of these products. In these trials, it is common to make measurements of some variables over time (measures made after the ripened-application). The aim of this paper is to present a statistical data analysis of repeated measures of an experiment made with sugar cane, to assess the effect of the moisture in the soil in the effect of the ripening glyphosate. Five measurements of sucrose expressed in kilograms of sugar per ton of cane were made. The experimental design used was split-plot with random completed blocks and considering the effect of the time. It was initially applied the sphericity test of the variances matrix, verifying that the variances of the differences between pairs of times are not all equal and therefore opted for the multivariate analysis of profiles. With a better precision this analysis allowed to study the behavior of the sugarcane yield with the application of the ripening over time. On the other hand, the moisture in the soil had no significant effect.

Keywords: Experimental statistics, multivariate analysis, glyphosate.

Introducción

Las actividades de cosecha de caña de azúcar, en Guatemala, son realizadas de noviembre a mayo, debido a que en esta época se presentan las condiciones climáticas adecuadas para el proceso de maduración (período de sequía moderada y amplias oscilaciones de temperatura y luminosidad) (López, 1999). Sin embargo, cuando esas condiciones no favorecen la maduración, es posible inducirla por medio de la aplicación de herbicidas, con efecto, madurador (Duke, 2003).

Ensayos realizados en ingenios azucareros en Guatemala muestran que las aplicaciones del madurante realizadas de diciembre a febrero no han producido efectos consistentes en el incremento de sacarosa y en la mayoría de los casos, la respuesta en términos de incremento de azúcar por tonelada de caña ha sido inferior al alcanzado con las aplicaciones realizadas en octubre e noviembre. Este problema puede ser debido a la baja humedad disponible en el suelo al momento de las aplicaciones, haciendo con que las plantas estén bajo estrés fisiológico y, por tanto, en un ritmo metabólico lento, ocasionando una absorción lenta del madurante (López, 1999). Para estudiar ese problema López (1999) realizó un experimento que incluyó diferentes regímenes de riego para analizar el efecto de la humedad del suelo en el efecto del madurante, midiendo el rendimiento de azúcar en cinco tempos, caracterizando un experimento de medidas repetidas, siendo razonable considerar que exista correlación entre las diferentes observaciones realizadas en una misma unidad experimental, de forma que el modelo lineal clásico no es adecuado por suponer la independencia entre las observaciones.

Según Huynh & Feldt (1970), una condición necesaria y suficiente para que se pueda aplicar un análisis de varianza univariado bajo el arreglo en parcelas divididas en un experimento con medidas repetidas, es que la matriz de covarianzas entre los tiempos cumpla la condición de esfericidad; para ello Mauchly (1940) propuso la prueba de esfericidad que verifica si una población normal multivariada presenta varianzas iguales y correlaciones nulas. Caso esta prueba resulte significativa se recomienda el uso del análisis multivariado de perfiles, o el análisis univariado. Con modelos mixtos (Mauchly, 1940).

Material y métodos

Área de estudio: el ensayo fue realizado en la finca “El Bálsamo”, municipio de Siquinalá (Guatemala), localizada entre las coordenadas geográficas 14°19' latitud norte e 90° 59' de longitud oeste e altitud de 300 msnm (López, 1999)

Unidad experimental: fueron utilizadas parcelas de 9 ´ 10 metros (90 m²), con seis surcos de caña de azúcar de la variedad CP72-2086 de segundo corte, cada surco de 10 metros de largo y 1.5 m de distanciamiento.

Factores y niveles: fueron evaluados dos factores: RI = regímenes de riego (considerando la aplicación de la lámina de agua en diferente número y frecuencia de riego, y la etapa en que fueron aplicados con relación a la aplicación del madurante); y M= aplicación glifosato, CM (con madurante) e SM (sin madurante). Los niveles del factor regímenes de riego son descritos en el Cuadro 1.

Cuadro 1 – Niveles del factor regímenes de riego.

Table 1 – Levels of the factor irrigation regimes.

Código	Número de riegos		Frecuencia de riegos (días)
	Antes de la aplicación del madurante	Después de la aplicación del madurante	
6/4	6	4	10
6/0	6	0	10
3/0	3	0	25
2/0	2	0	50
0/4	0	4	10
0/2	0	2	25
0/0	0	0	0

Diseño experimental: fue utilizado un diseño de bloques completos al azar con arreglo en parcelas divididas y medidas repetidas en el tiempo; con tres repeticiones, en las parcelas grandes fueron colocados los niveles del factor regímenes de riego y en las parcelas pequeñas los niveles del factor aplicación del madurante.

Variable de respuesta: una de las variables medida fue el rendimiento de azúcar expresado en kilogramos de azúcar por tonelada de caña (KAT), realizando las lecturas a los: 0,14,28,42 y 49 días después de la aplicación del madurante.

Análisis estadístico de los datos: inicialmente se verificó la condición de esfericidad de la matriz de covarianzas Σ , usando la prueba de Mauchly (1940). Enseguida, fue utilizado el modelo para análisis multivariado de perfiles, representado por: $Y = X\beta + \epsilon$; siendo Y una matriz de datos (variables respuestas); X es la matriz de diseño del modelo; β es la matriz de los

parámetros y ϵ la matriz de errores, suponiendo que los N perfiles $y_{ij} \sim N_t(\mathbf{X}\beta, \Sigma)$, siendo Σ la matriz de covarianzas no estructurada, admitiendo varianzas diferentes en cada ocasión y covarianzas diferentes entre dos ocasiones cualquiera. Las hipótesis sobre los parámetros evaluadas fueron: $H_0: \mathbf{C}\beta\mathbf{U} = 0$, en que \mathbf{C} y \mathbf{U} son matrices de constantes conocidas, y evaluadas con las estadísticas: Lambda de Wilks, Trazo de Pillai, Trazo de Hotelling-Lawley y Mayor Raíz Característica de Roy. La decisión de estas estadísticas debe ser tomada a partir del mayor número de resultados concordantes. Después fueron aplicados contrastes para comparar los niveles del factor aplicación de madurante en cada lectura y fue ajustado un modelo de regresión para cada uno de esos niveles.

Resultados y discusión

La hipótesis de esfericidad de la matriz de covarianzas fue rechazada por el criterio de Mauchly ($W = 0,136441$; $\chi^2_{(9)} = 24.73$; valor $p = 0.003$) indicando que el modelo univariado no es adecuado para este análisis. Los resultados de las pruebas de hipótesis para verificar el efecto del tiempo, utilizando el análisis de perfiles multivariada son presentados en el Cuadro 2.

Como se puede observar en el Cuadro 2, tres de las cuatro estadísticas muestran que hubo solamente efecto significativo del **Tiempo** y de la interacción **Tiempo \times Madurante** sobre el rendimiento de azúcar por tonelada de caña. Por otra parte, los regímenes de riego y la interacción **Tiempo \times RI \times M** no presentaron diferencias significativas. Lo que muestra que la humedad del suelo no tuvo efecto en la acción del madurante. Esto fue confirmado al realizar las pruebas F de no existencia de los efectos principales y de interacciones de los factores, que proporcionaron los siguientes resultados: **RI** (valor $p=0.2224$), **M** (valor $p=0.1343$) y **RI \times M** (valor $p=0.9723$). Con base en esos resultados, se optó por estudiar posteriormente

únicamente el efecto de la interacción **Tiempo × Madurante** usando contrastes (Cuadro 3).

Cuadro 2 – Resultados de las pruebas de hipótesis sobre la inexistencia del efecto del tiempo (T) y de las interacciones con bloque (B), RI y M en el rendimiento de azúcar (ATC)

Table 2 – Results of the tests of hypotheses concerning the absence of time effect (T) and interactions with block (B), RI and M on the sugarcane yield.

Estadística		T	T×B	T×B×RI	T×RI	T×M	T×RI×M
Wilks	Valor	0,2551	0,4472	0,0346	0,1967	0,4662	0,1477
	F	8,03	1,36	1,29	0,82	3,15	1,20
	g.l.	(4;11)	(8;22)	(48;44,41)	(24;32,6)	(4;11)	(24;39,58)
	Pr > F	0,0028	0,2664	0,1971	0,6936	0,0502	0,2952
Pillai	Valor	0,7449	0,6444	2,1425	1,2007	0,5338	1,2002
	F	8,03	1,43	1,35	0,86	3,15	1
	g.l.	(4;11)	(8;24)	(48;56)	(24;48)	(4;11)	(24;56)
	Pr > F	0,0028	0,2363	0,1420	0,6506	0,0502	0,4812
Hotelling-Lawley	Valor	2,9203	1,0316	6,1802	2,4189	1,1451	3,6142
	F	8,03	1,36	1,28	0,82	3,15	1,52
	g.l.	(4;11)	(8;13,58)	(48;21,24)	(24;14,09)	(4;11)	(24;18,50)
	Pr > F	0,0028	0,2953	0,2728	0,6742	0,0502	0,1801
Roy	Valor	2,9203	0,7632	3,6032	1,6075	1,1451	2,9773
	F	8,03	2,29	4,20	3,22	3,15	6,95
	g.l.	(4;11)	(4;12)	(12;14)	(24;14,09)	(4;11)	(6;14)
	Pr > F	0,0028	0,1197	0,0064	0,0403	0,0502	0,0014

En el Cuadro 3 son presentadas las medias de los rendimientos de azúcar por tonelada de caña para cada una de las lecturas realizadas y para cada nivel del factor aplicación de madurante. Las diferencias fueron significativas solamente a los 28 (inicio del efecto del madurante) y 49 días después de la aplicación del madurante (cosecha de la caña), siendo superior el rendimiento promedio de las unidades experimentales donde

Análisis de medidas repetidas provenientes de un experimento sobre riego y madurante en caña de azúcar (*Saccharum spp.*)

fue aplicado el madurante, comparado con las que no recibieron este producto (Cuadro 3).

Cuadro 3 – Rendimientos promedio de azúcar (ATC) de los niveles de aplicación de madurante y resultados de las comparaciones entre esos niveles en cada uno de los tiempos.

Table 3 – Average sugarcane yields of the levels of ripener application and results of comparisons between these levels in each measurement.

Madurante	Tiempo (días)				
	0	14	28	42	49
CM	91.597	93.834	104.7330	108.688	104.3985
SM	93.595	91.659	96.3214	108.041	95.933
Comparación	Valor de la estadística F y nivel descriptivo				
CM contra SM	0.92 (0.3537)	0.91 (0.3558)	9.25 (0.008)	0.01 (0.9187)	2.94 (0.038)

En la Figura 1 se muestra el comportamiento del rendimiento medio del contenido de azúcar en el tiempo, para los niveles del factor aplicación del madurante e también el modelo de regresión ajustado para cada caso.

Se nota la diferencia en el comportamiento del rendimiento medio de azúcar a lo largo del tiempo, la curva de crecimiento es mayor para las parcelas con madurante, y el modelo cuadrático con mejor ajuste ($R^2=0.8592$). En el caso de las parcelas sin madurante, el modelo polinomial de tercer grado presentó el mejor ajuste ($R^2=0.9142$)

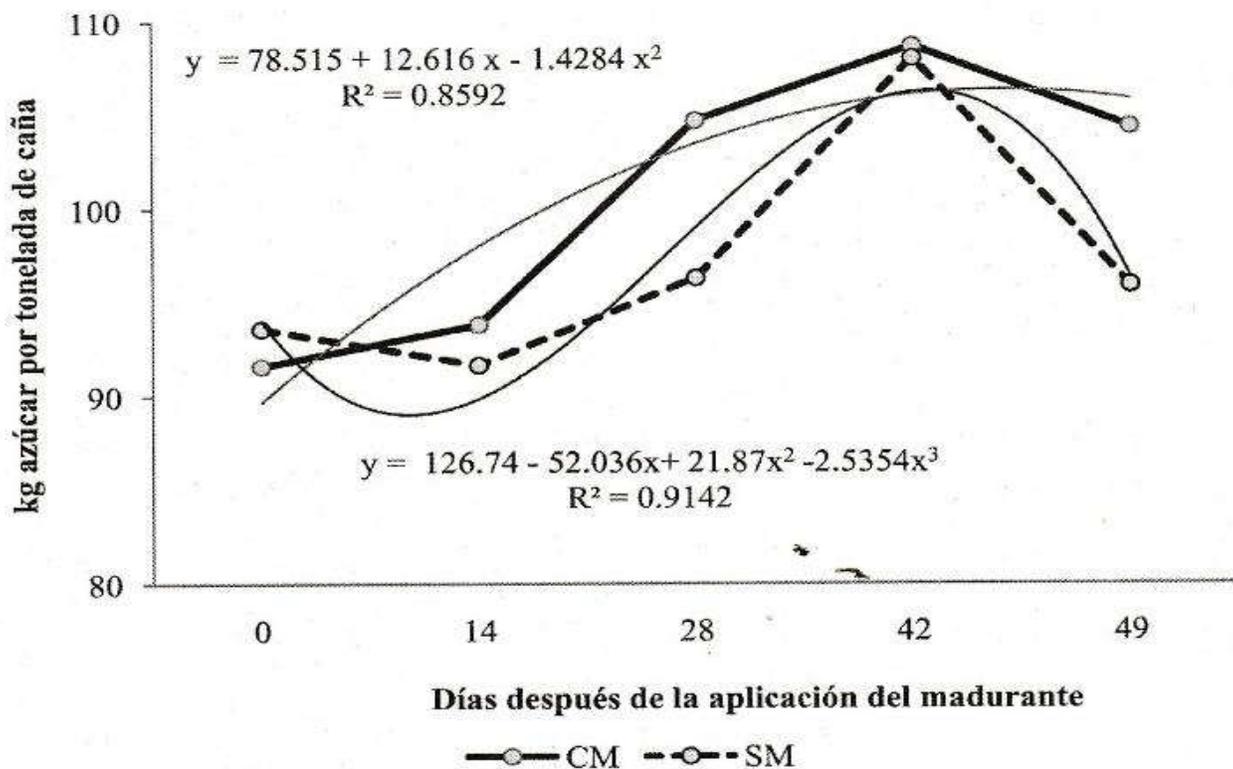


Figura 1 – Comportamiento del rendimiento medio de azúcar en el tiempo, en las parcelas con (CM) y sin madurante (SM), y curvas de regresión ajustadas.

Figure 1 – Behaviour of the average yield sugarcane at the time in the plots with (CM) and without ripener (SM), and adjusted regression curves.

Conclusiones

- a) Se constató el efecto del tiempo y de la interacción Tiempo \times Madurante sobre el rendimiento de azúcar por tonelada de caña, por medio del análisis de perfiles multivariados.
- b) No se detectó efecto de la humedad del suelo en el efecto del madurante.
- c) El rendimiento medio de las parcelas con madurante fue superior, comparado con las que no recibieron este producto, defiriendo solamente a los 28 y 49 días después de la aplicación.

Literatura citada

- [1] DUKE, S. O. Herbicides: Glyphosate. In: PLIMMER, J. R.; GAMMON, D. W.; RASGS-DALE, N. N.(Eds.) Encyclopedia of Agrochemicals. New York: John Wiley & Sons, 2003.
- [2] HUYNH, H. & FELDT, L.S. Conditions under which mean square ratios in repeated measurements designs have exact F-distributions. Journal of the American Statistical Association, 65: 1582-1589, 1970.
- [3] LOPEZ BAUTISTA, E.A. 1999. Influencia de la lámina de riego en el efecto del madurante en caña de azúcar (*Saccharum spp.*) var. CP-722086. Tesis Ing. Agr. Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala, Facultad de Agronomía. 92 p.
- [4] MAUCHLY, J. W. Significance Test for Sphericity of a Normal n-Variate Distribution. The Annals of Mathematical Statistics, 11: 204-209, 1940.