

(Cerri 2005). Aunque este cultivo se encuentra altamente mecanizado, aún no se aplica tecnología de agricultura de precisión.

La agricultura de precisión, según Balastreire (1998) se define como un grupo de técnicas que permiten el manejo de un cultivo según cada sitio específico en que puede dividirse una parcela de terreno. Para la utilización de ésta tecnología, es necesaria una gran cantidad de información de la parcela, entre otras: el mapa de las características físicas y químicas del suelo y el mapa de rendimiento.

Para obtener dicha información, se necesita: 1) el uso de *Sistema Diferencial de Posicionamiento Global* (DGPS) para ubicar la posición (longitud y latitud) de los datos recogidos en el campo, 2) el uso de un sistema de información geográfica para el tratamiento de los datos recolectados (Star & Estes, 1990) y 3) una cosechadora equipada con un monitor y sensores capaces de medir los rendimientos.

Se han utilizado varias técnicas para medir el flujo de la masa cosechada en varios cultivos intensivos o industriales. Entre ellas, Earl et al (1996) informan sobre el diseño de un acoplado para medir el peso del material recogido durante la cosecha de remolacha azucarera; la desventaja de ésta técnica es que se necesitan al menos 3 acoplados por cada cosechadora a fin de minimizar el costo de la cosecha.

Walter et al (1996) informan sobre otro sistema para el monitoreo de remolacha azucarera con dos celdas de carga y diferentes configuraciones ubicadas debajo de la cinta transportadora; así en 1995 en pruebas realizadas en el campo se elaboraron mapas de rendimiento con un margen de error inferior al 4%, estas cosechadoras estaban equipadas con DGPS, sensores y un sistema de adquisición de datos.

Van Canneyt & Verschoore (2000) presentaron los resultados del desempeño y evaluación del equipo en la medición del rendimiento en un cultivo de papa; el equipo consistía de una estructura de pesaje, celdas de carga, sensores de velocidad y un instrumental de adquisición de datos. Las pruebas en el campo mostraron alta precisión del sistema propuesto cuya exactitud media de pesaje fue del 1,06%.

Pocos intentos fueron informados en relación a la elaboración de mapas de rendimiento de la caña de azúcar. Cox et al (1996) desarrollaron un sistema para medir el flujo de la masa de la caña de azúcar. El sistema se basaba en la determinación de la presión hidráulica, la variación del flujo hidráulico y la velocidad de la maquinaria. Desde que el requerimiento de energía del sistema de corte y del elevador es función de aquellos valores, ellos pudieron relacionar estas lecturas con el flujo de masa cosechada. El flujo de la masa no fue obtenido en forma directa y como las presiones hidráulicas están relacionadas directamente con el uso de los componentes hidráulicos y la viscosidad del fluido (temperatura) no fue posible determinar si las variaciones obtenidas en la producción de caña de azúcar se debían a un conjunto de errores o a la variabilidad espacial del rendimiento.

Pierossi & Hassuani (1997) con el propósito de elaborar un mapa de rendimiento de caña de azúcar, hicieron un intento similar al de Earl et al (1996). Ellos construyeron un acoplado para pesar la producción con celdas de carga equipadas con un DGPS y un sistema de adquisición de datos. Aunque el sistema mostró una exactitud razonable, tuvo las mismas limitaciones que Earl et al (1996).

Pagnano & Magalhaes (2001) desarrollaron un sistema automático para la medición del rendimiento de caña de azúcar cuando ésta es recogida por cosechadoras autopropulsadas. El sistema utiliza transductores y celdas de carga para determinar el peso del material cosechado y es útil para medir directamente el flujo de masa en tiempo real. El registro de datos agregado a la información provista por el GPS asiste así a la elaboración de un mapa digital que represente el rendimiento del área cosechada. El sistema fue evaluado en laboratorio y en el campo; el margen de error observado en pruebas de laboratorio varió entre 0,70% y 2,71% en pruebas donde la masa constante fue simulada, y entre el 0,35% y el 4,02% en pruebas donde las masas conocidas pasaron por la cinta transportadora.

En pruebas en el campo durante la campaña 2000 en el ingenio de Santa Adélia, el sistema de medición automática (AMS) presentó, en la primera área cosechada, un margen de error del 12,5% comparado con el acoplado pesado en el ingenio. En una segunda área cosechada, el margen de error del AMS varió entre un 0,38% y el 28,66%, donde los valores máximos se debieron a problemas operacionales como el encendido y el apagado del sistema en la mitad del proceso.

El propósito principal de este trabajo es mostrar que es posible equipar la cosechadora de caña de azúcar para producir mapas de rendimiento que, superpuestos con los mapas de las características físicas y químicas del terreno permitan establecer un alto nivel de correlación entre estas variables principales.

MATERIALES Y MÉTODOS

Diseño de un sistema de monitoreo del rendimiento de caña de azúcar

El sistema diseñado utiliza un sistema de pesaje de los trozos de caña de azúcar cosechados; este instrumental funciona en base a celdas de carga y va instalado en el elevador antes que la caña sea descargada sobre del remolque. Esta información junto con la posición geo-referenciada del GPS de la cosechadora, permitirán la elaboración de un mapa digital del rendimiento. El sistema fue denominado SIMPROCANA.

El sistema (figura 1) fue montado en una cosechadora de la caña de azúcar CASE 7700 (1999), durante las temporadas de cosecha del 2003 y 2004. El mismo se integra con:

- un sensor de inclinación para compensar el peso. Ello es necesario en razón de que las celdas de carga se ubicaban en ángulo respecto de la horizontal y, en consecuencia, las lecturas del sistema son inferiores al peso real.
- un GPS para indicar la velocidad de la cosechadora de caña de azúcar y la ubicación (longitud y latitud) de los datos en el campo.
- técnicas de pre- filtrado como un filtro analógico de bajo paso "Butterworth" con una frecuencia de corte de 9 Hz y un filtro digital para eliminar las frecuencias dominantes.
- un sensor magnético instalado en el eje del elevador para determinar la velocidad de la cinta transportadora.
- un sistema data-logging. El data-logger elegido es un Advantech PPC-A120T. Este instrumental tiene un procesador NS Geode GX1 300 MHz, 128 Mb SRRAM, una pantalla sensible al tacto de 12", una interfase para adquirir datos PC1-1710 HGL 12 bit, un convertidor A/D, conversión D/A, entrada digital, salida digital, y counter/timer con un porcentaje de muestreo de hasta 100 KHz.

- un software basado en C++ para Windows fue desarrollado para registrar las lecturas y calcular la producción de caña de azúcar.

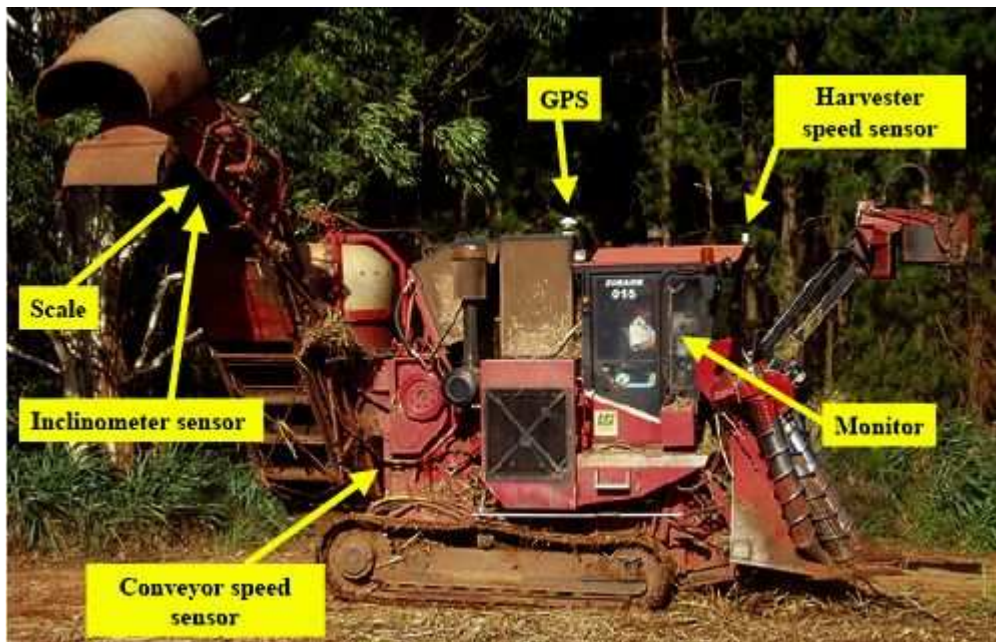


Figura 1: componentes de la cosechadora de caña de azúcar y ubicación del sensor de rendimiento. (*monitor*: monitor; *harvester speed sensor*: sensor de velocidad de la cosechadora; *scale*: escala o balanza; *inclinometer sensor*: sensor de inclinación; *conveyor speed sensor*: sensor de la velocidad del elevador)

Sistema de pesaje de la caña de azúcar

El elevador de la cosechadora está compuesto por una serie de cangilones que se mueven sobre una base metálica ciega a una velocidad de aproximadamente 2.7 m s^{-1} y transporta a la caña troceada hasta el acoplado. Un pequeño segmento de la base metálica ciega fue sustituida por un sensor de pesaje o balanza. La balanza se construyó con una placa de pesaje soportada por celdas de carga, que a su vez eran sostenidas por una caja protectora montada en la estructura del elevador.

La balanza montada en el piso del elevador, registró directamente las medidas instantáneas del peso de la caña de azúcar.

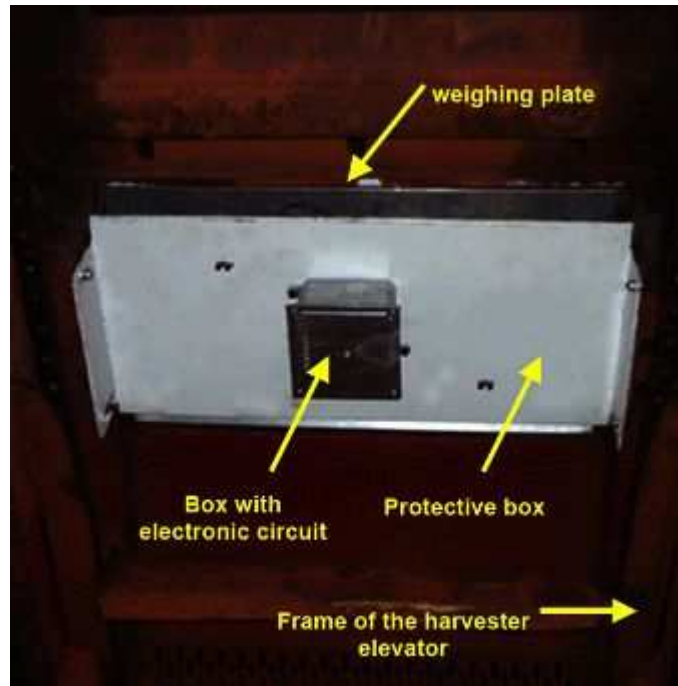


Figura 2: posición de la balanza sobre el elevador de la cosechadora; vista desde abajo (*weighing plate*: placa de pesaje; *box with electronic circuit*: caja que contiene el circuito electrónico; *protective box*: caja protectora; *frame of the harvester elevator*: chasis del elevador).

Software

Se desarrolló un software basado en C++ para Windows a fin de registrar las lecturas del transductor y las coordenadas del GPS, para la posterior creación de una base de datos que representa la variabilidad espacial de la caña de azúcar.



Figura 3: ejemplo del software sobre la pantalla.

Pruebas de laboratorio y en el campo

Las pruebas preliminares en el laboratorio se llevaron a cabo a fin de evaluar la calibración del sistema de medida y para analizar la calidad de los datos. La balanza se calibró utilizando pesas estandarizadas de 1 hasta 15 kilogramos.

Las pruebas finales en el campo durante el 2004 fueron realizadas en el ingenio azucarero de Sao Joao en Aranas, SP, Brasil en un superficie de 43 hectáreas plantada con la variedad SP80-1816; para realizar las pruebas en el campo este sistema tuvo que ser adaptado a una cosechadora de caña de azúcar. Con el propósito de chequear la exactitud del sistema diseñado, se recolectaba sobre un acoplado la caña de azúcar que pasaba por el instrumento de medición. Cuando el acoplado se llenaba la masa de caña era transferida a un camión que luego se pesaba con una balanza electrónica a su llegada al ingenio.

Mapeo de la producción de caña de azúcar

El área a mapear será dividida en pequeñas secciones llamadas células. Para Han et al. (1994) las dimensiones de dichas células deberían seguir ciertos valores, acordes con la velocidad y el tamaño de la cosechadora, la capacidad de lectura y la tasa de adquisición de los datos del sistema de monitoreo de rendimiento de caña de azúcar. Por tales razones, el tamaño ideal de la célula será de aproximadamente 20 m² toda vez que la velocidad de la cosechadora sea de 1,38 m.s⁻¹, la distancia entre las líneas de caña de azúcar es de 1,5 m. y la tasa de adquisición es de 10 s. Luego de instalar el instrumental en la cosechadora, el rendimiento de la caña de azúcar será medida en cada una de estas células, generando un archivo con las variables de latitud, longitud y peso. Luego de la interpolación de los datos, se dibujará un mapa digital de rendimiento.

RESULTADOS

Las pruebas de laboratorio se concentraron en la calibración del sistema de medida y en el análisis de la calidad de los datos. A fin de verificar la precisión de la balanza desarrollada, se utilizaron pesas estandarizadas para calibrarla.

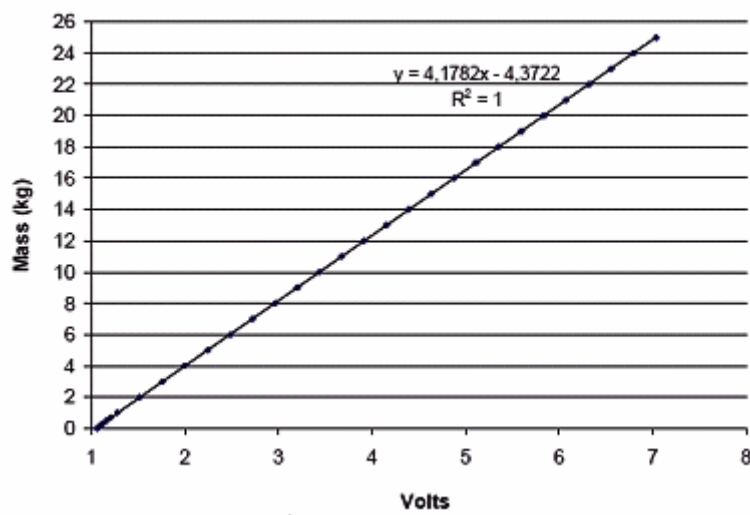


Figura 4: curva de calibración de la balanza obtenida en el laboratorio.

La prueba en el campo compara los pesos del SIMPROCANA con el camión pesado con la balanza electrónica a su llegada al ingenio.

En la tabla 1 se muestra el resultado de la primera prueba. Del análisis de estos datos se puede observar que el margen de error fue del 0,96% y que el máximo de error fue del 6,4% lo que indica un nivel de exactitud razonable en el monitoreo de rendimiento de caña de azúcar realizado.

Luego de esta prueba de mapeo sobre 43 ha usando el sistema desarrollado, en la figura 5 se muestra el mapa de rendimiento obtenido que refleja la variabilidad espacial de la productividad de la caña de azúcar, con un rango de 6 a 150 toneladas por hectárea.

Tabla 1: comparación de los pesos medidos con el camión y con el SIMPROCANA.

Test	Truck	SIMPROCANA	Error	Error
		----kg----	-----	%
1	58530	58978	-448	-0,8
2	54570	52718	1852	3,5
3	57080	59071	-1991	-3,4
4	58110	60071	-1961	-3,3
5	63340	60251	3089	5,1
6	58660	62120	-3460	-5,6
7	61750	65327	-3577	-5,5
8	63810	61515	2295	3,7
9	58660	55945	2715	4,9
10	58770	55748	3022	5,4
11	58290	54798	3492	6,4

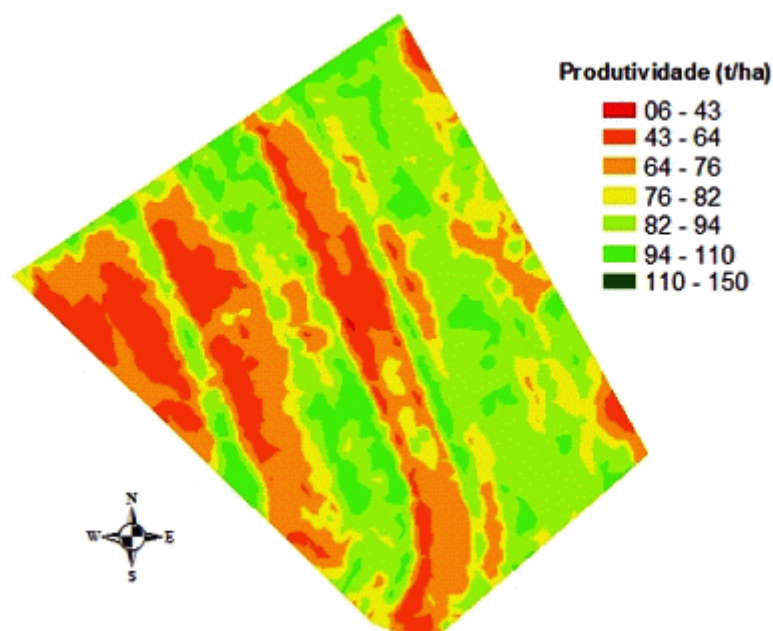


Figura 5: mapa de rendimiento de caña de azúcar sobre una superficie de 43 ha.

CONCLUSION

El primer sistema de medición del rendimiento de caña de azúcar muestra su potencial para ser usado en la agricultura de precisión. Aún cuando el margen

total de error es aceptable, la exactitud instantánea del sistema sensor de flujo necesita ser chequeada.

Los resultados iniciales muestran que el AMS es lo suficientemente sensible como para mostrar la variabilidad espacial de la producción de caña de azúcar.

Esta temporada, el sistema será mejorado con el objetivo de disminuir el margen de error y verificar la exactitud instantánea del sensor de flujo.

REFERENCIAS

Balastreire, L.A. Agricultura de precisão: O autor, 1998^a. 72p.

Cox, G., Harris, H., Pax, R. Development and testing of a prototype yield mapping system. In: Proceedings of Australian society of sugar cane technologists, 1997.

Earl, R., Wheeler, P.N., Blackmore, B.S., Godwin, R.J., Precision farming-the management of variability. The Journal of the Institution of Agricultural Engineers, England, v. 51, n.4, p. 18-23, 1996.

FAO. Agricultural production. Disponível em: <http://apps.fao.org/page/collections?subset=agriculture>. Acesso em: 02 mar.2005.

Pagano, N.B., Magalhães, P.S.G., Sugar cane yield measurement In: European Conference on precision agriculture, 3., 2001, Montpellier. Proceedings...Montpellier: Agro Montpellier, 2001. v. 2, p. 839-843.

Pierossi, M.A., Hassauani, S.J. Cacamba instrumentada para pesagem de cana picada. In: Seminário Copersucar de Tecnologia Agronômica, 7, 1997, Piracicaba.

Star, J., Estes, J. Geographic information system: an introduction. New Jersey: Prentice Hall, 1990. 303p.

Van Canneyt, T., Verschoore R. Yield Measurement on a potato harvester, In: Abstracts of AgEng 200, Agricultural Engineering into the third millennium, Warwick, 331-2, 2000.

Walter, J.D., Hofman, V.L., Backer, L.F., Site-specific sugarbeet yield monitoring. In: International Conference on Agricultural Engineering, 1996, Madri. Anais. European Society of Agricultural Engineers, 1996. v.2, p.834-844.