LA TÉCNICA DE ULTRASONIDO PARA PREDECIR CALIDAD DEL TRIGO EN GRANOS INDIVIDUALES

THE ULTRASOUND TECHNIQUE FOR PREDICTING WHEAT QUALITY ON SINGLE KERNELS

Guillermo A. López Huape[1], Juan de Dios Figueroa Cárdenas[1*], Arturo Mendoza Galván[1], Evgen Prokhorov Federovih[1], Héctor E. Martínez Flores[2], Benjamín Ramírez Wong[3], Israel García Ruiz[4] y Eduardo Morales Sánchez[5]

[1]Centro de Investigación y de Estudios Avanzados, Unidad Querétaro (CINVESTAV-Qro.). Libramiento Norponiente 2000, Fracc. Real de Juriquilla. 76230, Querétaro, Qro. México. Tel: 01 (442) 441-4915, Fax: 01 (442) 441-4938. Correo electrónico: jfigueroa@qro.cinvestav.mx [2]Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Tzintzuntzan No. 173, Col. Matamoros. 58240, Morelia, Mich. México. [3]Universidad de Sonora. Apdo. Postal No. 1149. 83142, Hermosillo, Son. México. [4]Centro Nacional de Meteorología (CENAM). Carr. a los Cués Km. 4.5, El Márquez. 76241, Querétaro, Qro. México. [5]Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, CIAII, Carr. Pachuca-Tulancingo. 42072, Pachuca, Hgo, México.
** Autor para correspondencia*

RESUMEN

El desarrollo de métodos predictivos para determinar la calidad y el uso final del trigo ha sido una necesidad para fitomejoradores y para productores, molineros y panaderos. En este estudio se investigó el uso de granos individuales de trigo (*Triticum* spp.) con la técnica de ultrasonido como método predictivo para la caracterización de la calidad. Se evaluaron 45 muestras de trigos mexicanos de la cosecha 2003. La señal ultrasónica viajó más rápido en el grano de trigo duro o cristalino, seguida por el trigo panadero y por último el trigo suave. La ecuación polinomial de mejor ajuste de los parámetros del grano del trigo (contenido de cenizas, número de caída, microsedimentación y contenido de proteína) con la velocidad ultrasónica, fue una polinomial de segundo grado, excepto para peso hectolítrico que fue lineal. Las variables de la harina como rendimiento harinero, número de caída, sedimentación y temperatura de pastificado, se relacionaron linealmente con la velocidad ultrasónica. También la mayoría de los datos reológicos del alveógrafo y farinógrafo se relacionaron linealmente con la velocidad ultrasónica. Para una misma clase de trigo la tendencia es que a mayor dureza del grano la velocidad ultrasónica se incrementa y así representa mejor calidad. Entonces, las mediciones de velocidad ultrasónica en granos individuales pueden ser utilizadas para predecir el volumen del pan, así como para la evaluación no destructiva y rápida de la calidad del trigo.

Palabras clave: *Triticum* spp., ultrasonido, calidad de grano, calidad molinera, calidad reológica, calidad de panificación.

SUMMARY

The development of methods to predict the quality and end-use of wheat has been a necessity for breeders, millers and bread makers. In this study, the use of individual kernels of wheat (*Triticum* ssp.) was investigated with ultrasound technique as a predictive method for the classification of wheat quality. Forty-five wheat samples from the Mexican harvest of 2003 were evaluated. The ultrasound signal traveled fastest through *durum* or crystalline wheat grains, followed by grains of bread wheat, and finally soft wheat. The polynomial equation which gave best fit among the parameters of wheat kernels (ash content, falling number, microsedimentation and protein content) and ultrasonic velocity, was a second degree model except for test weight in which the model was linear. The flour variables, such as flour yield, falling number, sedimentation and pasting temperature, were linearly related to ultrasonic velocity. Also, most of the rheological data from the alveograph and farinograph were linearly related to ultrasonic velocity. For the same type of wheat, it was observed that as the kernel hardness increased they tended to have a higher ultrasonic velocity, which represents better quality. Therefore, this study suggest that the measurement of ultrasonic velocity in individual kernels may be used to predict bread volume as well as to quickly evaluate the quality of wheat in a non-destructive way.

Index words: *Triticum* spp., ultrasound, kernel quality, milling quality, rheological quality, bread making quality.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de métodos predictivos para determinar el uso final y la calidad del trigo (*Triticum* spp.) ha sido una necesidad no solamente para fitomejoradores, sino también para productores, molineros y panaderos que desean evaluar comercialmente el rendimientos harinero y la calidad reológica y de panificación. Se requieren que dichas técnicas sean relativamente rápidas, simples y aplicables en muestras pequeñas desde unos pocos granos hasta un simple grano (Dobraszczyk y Schofield, 2002).

Existen varios métodos con diferentes ventajas y limitaciones. La clasificación de granos individuales (SKCS)

Recibido: 28 de Junio del 2005.
Aceptado: 2 de Marzo del 2006.

(4100, Perten Instruments, Reno, NV) es un método para la medición rápida de la dureza de granos individuales, peso, diámetro y contenido de humedad (Nielsen *et al.,* 2003; Sissons *et al.,* 2000). Por su parte, el micromolino "micromill" produce mediciones precisas del consumo de energía mecánica requerida para la molienda del grano, la cual se relaciona con la dureza y eficiencia de la molienda de pequeñas cantidades de grano (Pujol *et al.,* 2000). La espectroscopía de infrarrojo cercano (NIR) con granos individuales ha sido también utilizada en varias aplicaciones (Baker *et al.,* 1999; Nielsen *et al.,* 2003). El discriminador de color para alta y baja cantidad de proteína en granos individuales (Pasikatan y Dowell, 2004) y la máquina de visión para medir granos vítreos y duros (Symons *et al.,* 2003) pueden también identificar y predecir el rendimiento harinero en trigo. Relacionado con la caracterización e interpretación de la reología, se desarrolló un micromixógrafo que utiliza 2 g de harina y mejora el control y el procesamiento de los datos (Dobraszczyk y Schofield, 2002).

Otros métodos en los que también se utilizan algunos granos son la microsedimentación con dodecil sulfato de sodio (SDS) (Sapirstein y Suchy, 1999) y las pruebas de electroforesis de subunidades protéicas de glutenina de alto peso molecular (HMW-GS) por medio de SDS-PAGE (Khan *et al.,* 1989), que dan resultados confiables para predecir las propiedades reológicas y de calidad panadera a partir de granos individuales de trigo. Las propiedades mecánicas del grano de trigo generalmente se evalúan mediante pruebas de dureza de grano (Pomeranz y Williams, 1990). Estas propiedades pueden ser el módulo de Young (*E*), la fuerza a la ruptura y la deformación.

El ultrasonido es una técnica para caracterizar los materiales mediante ondas mecánicas de alta frecuencia por arriba de 20 kHz que son transmitidas a través del material; las características de las ondas transmitidas y reflejadas aportan información de la microestructura de la muestra (Saggin y Coupland, 2002). Los parámetros ultrasónicos (*e.g.*, velocidad, atenuación y espectro de frecuencia) del ultrasonido de baja intensidad se han utilizado en la evaluación rápida y no destructiva de alimentos (McClements, 1997; Llull *et al.,* 2002). La técnica de ultrasonido se ha utilizado recientemente para medir propiedades mecánicas de las masas tales como tenacidad o rigidez (Elmehdi *et al.,* 2004; Page *et al.,* 2004).

La onda ultrasónica que pasa a través de un material puede ser expresada en función de su velocidad ultrasónica (v) y atenuación (α) (Coupland, 2004). La velocidad ultrasónica de un material está relacionada con dos de sus propiedades físicas básicas: el módulo elástico (E) y la densidad (ρ), de acuerdo con la ecuación: $v = \sqrt{E/\rho}$.

Conforme el material es más denso es más resistente a ser deformado y las ondas ultrasónicas se propagan más rápido (McClements, 1997). Con base en estos principios, el ultrasonido puede ser usado para medir propiedades como composición, concentración, estructura, flujo y estado físico de los componentes en los alimentos (McClements, 1997; Povey, 1989;Benedito *et al.,* 2000). Las técnicas de ultrasonidos aventajan a los métodos analíticos tradicionales en que no son destructivas, son rápidas, relativamente baratas, precisas y versátiles. Sin embargo, hasta ahora no se han encontrado informes del uso de esta técnica para evaluar la molienda, reología y calidad de panificación de muestras de trigo, excepto por algunos estudios con masa de trigo (Lee *et al.,* 1992; Elmehdi *et al.*, 2004; Page *et al.*, 2004).

En el presente estudio se plantearon tres objetivos: (1) Investigar la factibilidad de la técnica de utrasonido como método predictivo para la caracterización de la calidad del trigo a partir de granos individuales; (2) Medir los parámetros ultrasónicos del trigo; y (3) Investigar la relación entre calidad del trigo y velocidad ultrasónica de los granos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Muestras de grano

Se emplearon 45 trigos mexicanos de la cosecha 2003 clasificados en los siguientes grupos: Tipo I o trigo panadero; variedad 'Rayón F-89' cosechada en tres localidades de los estados de Sonora, Baja California y Sinaloa; tipo III o trigo suave (variedades 'Salamanca S-75, 'Saturno S-86' y 'Cortazar S-94)', cosechadas en localidades de los estados de Jalisco, Michoacán y Guanajuato; y tipo V o trigo duro o cristalino (*Triticum turgidum* L. var. *durum*) (variedades 'Altar C-84', 'Rafi C-97', y 'Sofía C-2000') cosechadas en los estados de Sonora y Baja California. Las muestras del grupo V solamente fueron analizadas en sus características fisicoquímicas debido a que estos tipos de trigo se destinan exclusivamente a la elaboración de pastas. En los otros tipos de trigo, se determinaron las características de molienda, reológicas y de panificación.

Propiedades físicas del grano

El peso hectolítrico, cenizas y contenido de humedad fueron determinados con los métodos aprobados 55-10, 08-01, y 44-15A, respectivamente, de la American Association of Cereal Chemists (AACC, 1995). El contenido de proteína (N x 5.7), el número de caída ("falling number")

en harina integral de trigo y microsedimentación, se determinaron con los métodos 46-13, 56-81B, y 56-63, respectivamente, de la AACC (1995). La altura del grano se midió con un vernier digital Mitutoyo modelo CD-6" CS (Mitutoyo Corp., Japón), en mm. El color del grano fue evaluado con un colorímetro MiniScan de Hunter Lab (Reston Virginia, EE. UU.).

Pruebas de molienda

La extracción de harina se hizo con un molino Brabender Quadrumat Jr. (Quadruplex), con el método aprobado 26-50 de la AACC (1995).

Pruebas de calidad en harina

Los contenidos de cenizas, humedad y proteína (N x 5.7), así como la prueba "falling number" o número de caída, se evaluaron con los métodos de la AACC (1995) 08-01, 44-15A, 46-13, y 56-81B, respectivamente. El contenido de gluten seco y húmedo se determinó con el método 38-12 de la AACC (1995). La sedimentación se cuantificó mediante el método 56-60 (AACC, 1995). Los valores e índices alveográficos W y P/L fueron obtenidos con el método 54-30 de la AACC (1995). El tiempo de llegada de la masa, tiempo de desarrollo, estabilidad, índice de tolerancia de mezclado y absorción de agua, se obtuvieron con el farinógrafo y el método 54-21 de la AACC (1995). El color se midió con un colorímetro MiniScan de Hunter Lab.

La viscosidad de las harinas en suspensiones acuosas fue evaluada con el método 22-10 de la AACC (1995), en 80 g de harina con una solución sin amortiguador. Otros datos reológicos fueron obtenidos con el reofermetógrafo de Chopin F3, para lo cual 300 g de harina, 3 g de levadura, y 5 g de cloruro de sodio fueron agregados a la cantidad de agua calculada de los datos obtenidos del alveográfo de Chopin. Las variables evaluadas después de 3 h de fermentación a 28.5 °C fueron el volumen de CO_2 retenido en la masa durante la fermentación y el volumen total de CO_2 producido.

Calidad panadera

El procedimiento empleado para la elaboración del pan fue el método directo de panificación optimizado, según el método 10-10B con 180 min de fermentación, pero sin usar bromato de potasio (AACC, 1995).

Calibración del equipo de ultrasonido

Se empleó el equipo de ultrasonido Modelo 58:E0048 Ultrasonic Pulse Velocity (UPV) Control, con rango de frecuencias de 24 a 150 kHz y una precisión de 0.1 μs. El equipo se calibró con un bloque de poliestireno de 25 cm insertado entre los dos transductores, para verificar las mediciones de velocidad ultrasónica. El arreglo experimental consistió de un par de transductores ultrasónicos con una frecuencia nominal de 54 kHz y un osciloscopio y almacenamiento digital de datos (Tektronix TDS 2014, 100 MHz), todo conectado en interfase con una computadora personal.

Cada punto de los datos fue el promedio de siete lecturas de diferentes granos de trigo de la misma muestra. Se obtuvo en la pantalla del osciloscopio la señal transmitida; para esto, los dos transductores se colocaron en lados opuestos del grano de trigo, uno como emisor y el otro como receptor de la señal. La energía eléctrica fue enviada al transductor emisor, el cual por sus propiedades piezoeléctricas convirtieron la energía en pulsos ultrasónicos o vibraciones de alta frecuencia. Para evaluar el tiempo de viaje (t) los siete granos fueron medidos y promediados. La velocidad ultrasónica (*i.e.*, la distancia de viaje de una onda ultrasónica por unidad de tiempo) fue determinada por el tiempo requerido para que la onda viajara la distancia conocida (d) a través del grano del trigo (grosor), de acuerdo con la ecuación ($v = d/t$) (McClements, 1997).

Análisis estadísticos

Los modelos de regresión para ajustar los datos a las tendencias de las diferentes curvas, fueron evaluados mediante el Modelo Lineal General del SAS (SAS, 1999). Los modelos fueron considerados significativos y altamente significativos con niveles de $P \leq 0.05$ y ≤ 0.01, respectivamente. La comparación de medias se efectuó con base en un diseño completamente aleatorio, con la prueba de Tukey, $P \leq 0.05$.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las variedades de trigos suaves 'Saturno S-86', y 'Cortazar S-94', no presentaron diferencias significativas ($P \leq 0.05$) en sus valores de velocidad ultrasónica, con media y error estándar de 329 $\pm$ 1.85 y 335 $\pm$ 2.06 ms^{-1} respectivamente, comparado con 346 $\pm$ 1.29 ms^{-1} de velocidad ultrasónica de la variedad Salamanca S-75 que fue similar estadísticamente a la variedad de trigo panadero Rayón F-89 con 358 $\pm$ 1.87 ms^{-1}. Las variedades de trigos duros 'Altar C-84', 'Sofía C-2000' y 'Rafi C-97', cuyas velocidades ultrasónicas fueron 382 $\pm$ 3.41, 386 $\pm$ 3.35 y 390 $\pm$ 2.31 ms^{-1}, respectivamente, no presentaron diferencias significativas ($P > 0.05$) entre ellas pero sí con las variedades de trigos suaves y con el trigo panadero 'Rayón F-89'. Esos valores de velocidad ultrasónica son relativamente bajos comparados con los reportados para

Cuadro 1. Parámetros de regresión para la relación entre la velocidad ultrasónica y las características físicas del grano de trigo.

Parámetro	Peso hectolítrico (kg hL^{-1})	Cenizas (%)	Número de caída (s)	Microsedimentación (mm)	Proteína (%)
$ß_0$	39.366	24.094	-7511.615	-584.099	-88.285
$ß_1$	0.109	-0.120	40.854	3.0359	0.5736
$ß_2$	---------	0.00016	-0.0519	-0.0039	-0.0008
R^2 para polinomio de 2° orden	0.553**	0.425**	0.649**	0.310†	0.238**
R^2 lineal	0.537**	0.222**	0.581**	0.055 ns	0.104*
Coef. de Corr. (r)	0.733**	-0.594**	0.542**	0.235 ns	-0.323*

*, ** = Significativo y altamente significativo a $P \leq 0.05$ y 0.01, respectivamente.
ns = No significativo. † Significativo a P = 0.06.

alimentos (McClements, 1997), pero están arriba del rango de 114 a 250 ms^{-1} reportado para alimentos altamente atenuadores, como el sistema masa-pan (McClements, 1997; Elmehdi *et al.,* 2004; Page *et al.,* 2004) y aguacate (*Persea americana* L.) (Mizrach y Flitsanov, 1999).

Calidad del grano

El peso hectolítrico del trigo mostró una correlación lineal significativa (r = 0.733**; $P \leq 0.01$) con la velocidad ultrasónica (Cuadro 1). Esta velocidad se incrementó al aumentar el peso hectolítrico del trigo (Figura 1). El modelo de regresión de mejor ajuste indica que el coeficiente de determinación para el ajuste lineal ($R^2 \leq 0.537$; $P < 0.01$) fue comparable con el de un polinomio de segundo orden ($R^2 \leq 0.553$; $P < 0.01$). Tendencias similares han sido reportadas en la masa de trigo en la cual la atenuación ultrasónica se incrementa linealmente con la presencia de espacios vacíos que afectan la propagación del ultrasonido (McClements, 1977; Elmehdi *et al.,* 2004). Eso explica el que las velocidades ultrasónicas en trigos suaves de bajo peso hectolítrico sean menores que en trigos duros.

Los granos con alto contenido de cenizas fueron de las variedades de trigos suaves ('Cortazar S-94', 'Salamanca S-75', y 'Saturno S-86'), y se relacionaron con baja velocidad ultrasónica, en comparación con el bajo contenido de cenizas de la variedad panadera 'Rayón F-89' o de las variedades de trigos duros o cristalinos ('Sofía C-2000', 'Altar C-84', y 'Rafi C-97'), que registraron altas velocidades (Cuadro 1). La ecuación lineal se puede emplear para predecir el contenido de cenizas por medio de la velocidad ultrasónica, como lo indica el coeficiente de correlación significativo ($r = -0.594$; $P \leq 0.01$), pero el moderado incremento en la velocidad ultrasónica a bajos contenidos de ceniza no se ajusta bien.

En general, el ajuste que explica la mayor parte de la variación en los parámetros de calidad del grano (contenido de cenizas, número de caída, microsedimentación y contenido de proteína) en relación con la velocidad ultrasónica, fue una ecuación polinomial de segundo orden ($Y = ß_0 + ß_1$ x Velocidad + $ß_2$ x Velocidad^2). Es decir, se puede utilizar ya sea la ecuación de segundo orden o la ecuación lineal para ajustar los datos del Cuadro 1, puesto que el valor de la pendiente para $ß_2$ es muy pequeño para la mayoría de los parámetros de calidad del grano. Este término puede ser cercano a cero y entonces la ecuación de segundo orden se transforma en una línea recta.

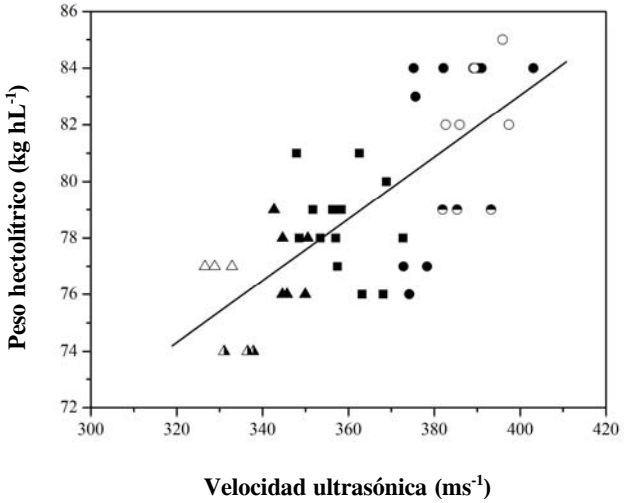


Figura 1. Peso hectolítrico vs. *velocidad ultrasónica en variedades de trigo.*

▲ = 'Salamanca S-75' ; △ = 'Saturno S-86'; ▲Cortazar S-94';
■ = 'Rayón F-89'; ● = 'Altar C-84' ; ○ = 'Rafi C-97';
◓ = 'Sofia C-2000'.

Calidad molinera

La velocidad ultrasónica se incrementó linealmente conforme el rendimiento de harina se incrementó (Figura 2). El rendimiento de harina está positivamente correlacionado con el peso hectolítrico ($r = 0.65$; $P < 0.01$) y negativamente con el contenido de cenizas en el grano ($r = -0.79$; $P < 0.01$). Muestras de granos con altos pesos hectolítricos (78 a 81 kg hL^{-1}) tuvieron bajo contenido de cenizas (1.4 a 1.6 %) y alta velocidad ultrasónica, mientras que las muestras de bajos pesos hectolítricos (74 a 78 kg hL^{-1}) tuvieron alto contenido de cenizas (1.6 a 2.0 %) y alta atenuación ultrasónica. Esto puede ser debido a que las capas de salvado retrasan el viaje del ultrasonido a través

del grano de trigo. Se ha reportado que el aire en los espacios intercelulares de tejidos en plantas producen una conducta resonante que afecta al ultrasonido (Coupland, 2004).

Las características de calidad en la molienda y de harina, como la proteína, el número de caída, la sedimentación y la temperatura de pastificado, presentaron relaciones lineales con la velocidad ultrasónica (Cuadro 2). Esa tendencia permite predecir tanto la cantidad de la proteína como su calidad representada por la sedimentación, y otras características como número de caída y la temperatura de pastificación de la harina, que reflejan la manera en que el ultrasonido viaja en la muestra.

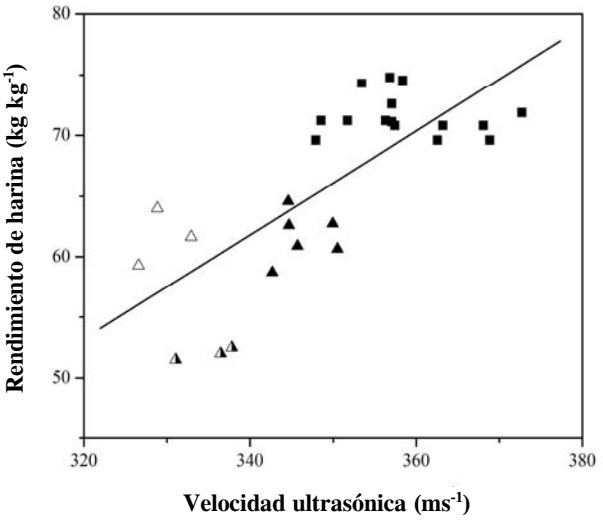


Figura 2. Rendimiento de harina vs. *velocidad ultrasónica en variedades de trigo.*

▲ = 'Salamanca S-75' ; △ = 'Saturno S-86'; ◮Cortazar S-94';
■ = 'Rayón F-89'; ● = 'Altar C-84' ; ○ = 'Rafi C-97';
◓ = 'Sofia C-2000'.

Calidad reológica

La mayoría de los valores de datos reológicos *vs*. la velocidad ultrasónica, se ajustaron bien con la ecuación de la recta (Cuadro 3, Figura 3). Por ejemplo, los trigos suaves presentaron bajos valores de W y tiempos pequeños de llegada para formar el gluten, en comparación con el trigo panadero que tuvo valores altos de W y requirió más tiempo para desarrollar la masa. La relación de la velocidad ultrasónica con los valores reológicos puede emplearse para determinar los tipos de trigo apropiados para diferentes usos.

Calidad de panificación

Los resultados muestran que la velocidad ultrasónica en diferentes tipos de trigos puede ser utilizada para predecir el volumen del pan del trigo (Cuadro 4). Por ejemplo, las variedades de trigos suaves ('Cortazar S-94', 'Salamanca S-75', y 'Saturno S-86') tuvieron una baja velocidad ultrasónica (de 329 a 346 ms^{-1}) y bajo volumen de pan, cuando se comparan con la variedad 'Rayón F-89' que es un trigo panadero con alta velocidad ultrasónica (358 ms^{-1}) y, en general, buen volumen de pan (Figura 4). La misma tendencia se encontró en el rendimiento de harina. Por tanto, el comportamiento de la velocidad ultrasónica es capaz de reflejar cambios en contenido de cenizas y dureza del trigo, como lo indica también el peso hectolítrico.

Resultados similares se han encontrado en otros alimentos, como el queso (Benedito *et al.,* 2000), aguacate (Mizrach y Flitsanov, 1999) y productos cárnicos (Llull *et al*., 2002), en los que la velocidad ultrasónica disminuye con la pérdida de textura. Por otra parte, variables como absorción de agua y el volumen total de CO_2 y el volumen de CO_2 retenido en la masa obtenida mediante mediciones estáticas con el reofermentómetro, también se ajustaron adecuadamente a la relación lineal (Cuadro 4). Datos similares se observaron para el caso de las pruebas dinámicas de reología con el alveógrafo de Chopin y el farinógrafo (Cuadro 3). Estas correlaciones lineales eran de esperarse puesto que la reología es directamente dependiente del módulo elástico. McClements (1997) indicó que a mayor resistencia de un material a la deformación, más rápido será la propagación de la onda ultrasónica. Los datos de los Cuadros 3 y 4 están en concordancia con esos principios básicos indicados por McClements (1997); la velocidad ultrasónica es más baja en el trigo suave el cual desarrolla un gluten menos elástico y retiene menos CO_2 y, por tanto, produce también bajo volumen de pan, en comparación con el trigo panadero.

CONCLUSIONES

En la mayoría de los casos, la velocidad ultrasónica se relacionó linealmente con los valores de calidad molinera, harinera reológica y panadera de los trigos. Los parámetros físicos que siguieron una ecuación polinomial de segundo orden, también pueden utilizar la parte lineal de la ecuación con buen ajuste a los datos, puesto que para la mayoría de estos parámetros, el valor de la pendiente de la curva β_2 es muy cercano a cero, de modo que la ecuación de segundo grado se aproxima a una línea recta.

Cuadro 2. Parámetros de regresión para la relación entre velocidad ultrasónica y características de molienda y calidad de la harina de trigo.

Parámetro	RH (%)	Proteína (%)	Color B	NC (s)	Sedimentación (mm)	TP (°C)
$ß_0$	-83.858	2.269	-10.683	-1220.01	-53.636	42.145
$ß_1$	0.4284	0.0283	0.0497	4.727	0.239	0.0478
R^2 para polinomio de 2° orden	0.574**	0.308*	0.404**	0.512**	0.499**	0.196 ns
R^2 lineal	0.561**	0.269**	0.407**	0.512**	0.500**	0.177**
Coef. de Corr. (r)	0.749**	0.519**	0.638**	0.657**	0.707**	0.421*

*, ** = Significativo y altamente significativo a $P \leq 0.05$ y 0.01, respectivamente.
ns = No significativo, RH = Rendimiento de harina; Color escala B; NC = Número de caída; TP = Temperatura de pastificación.

Cuadro 3. Parámetros de regresión para la relación entre la velocidad ultrasónica y la calidad reológica de la masa de trigo.

Parámetro	W (10^3 erg sg^{-1})	P/L	TL (min)	TD (min)	TP (min)	Estabilidad (UB)	MTI (UB)
$ß_0$	-2392.06	-2.4312	-10.266	-34.636	-93.647	-82.776	688.516
$ß_1$	7.6074	0.0093	0.0359	0.1124	0.2928	0.2551	-1.735
R^2 para polinomio de 2° orden	0.655**	0.402**	0.300**	0.523**	0.661**	0.597**	0.576**
R^2 lineal	0.620**	0.392**	0.242**	0.484**	0.658**	0.0597**	0.530**
Coef. de Corr. (r)	0.787**	0.626**	0.492**	0.695**	0.811**	0.773**	-0.728**

** = Altamente significativo a $P \leq 0.01$; TL = Tiempo de llegada; TD = Tiempo de desarrollo; TP = Tiempo de partida; MTI = Índice de tolerancia al mezclado (Unidades Brabender).

Cuadro 4. Parámetros de regresión para la relación entre velocidad ultrasónica y calidad panadera en trigo.[¶]

Parámetro	VP (cm^3)	AA (%)	$VTCO_2$ (cm^3)	VCO_2R (cm^3)
$ß_0$	-374.584	25.1069	-1886.2	-1825.73
$ß_1$	3.3959	0.00028	9.866	9.6437
R^2 para polinomio de 2° orden	0.208 ns	0.654**	0.589**	0.584**
R^2 Lineal	0.194*	0.652**	0.5899**	0.584**
Coeficiente de correlación (r)	0.440*	0.808**	0.767**	0.765**

[¶]*, ** = Significativo y altamente significativo a $P \leq 0.05$ y 0.01, respectivamente.
VP = Volumen de pan; AA = Absorción de agua; $VTCO_2$ = Volumen total de CO_2; VCO_2R = Volumen de CO_2 retenido.

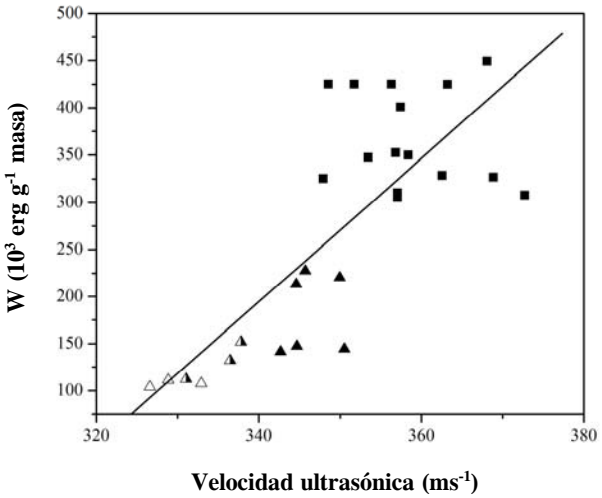


Figura 3. Valor W del alveograma vs. *velocidad ultrasónica en variedades de trigo.*

▲ = 'Salamanca S-75' ; △ = 'Saturno S-86'; ◮Cortazar S-94';
■ = 'Rayón F-89'; ● = 'Altar C-84' ; ○ = 'Rafi C-97';
◓ = 'Sofia C-2000'.

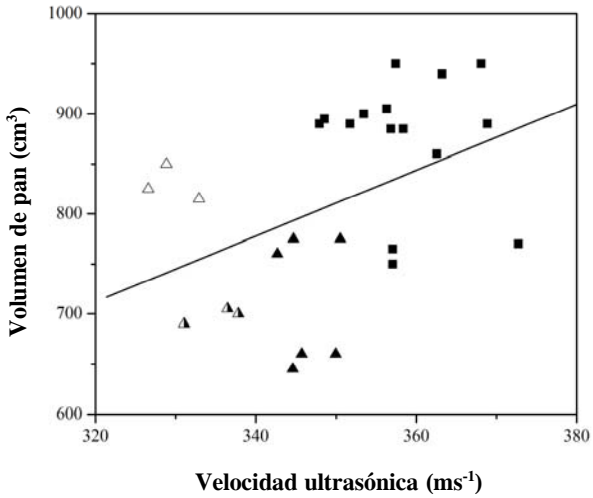


Figura 4. Volumen de pan vs. *velocidad ultrasónica en variedades de trigo.*

▲ = 'Salamanca S-75' ; △ = 'Saturno S-86'; ◮Cortazar S-94';
■ = 'Rayón F-89'; ● = 'Altar C-84' ; ○ = 'Rafi C-97';
◓ = 'Sofia C-2000'.

Al comparar el trigo suave con el trigo panadero, este último mostró una mayor velocidad ultrasónica relacionada con mayor calidad molinera, harinera, reológica y panadera. Importantes parámetros de molienda, reología y de panificación, tales como rendimiento de harina, sedimentación, datos del alveógrafo y farinógrafo, así como volumen de pan, fueron predichos con la velocidad ultrasónica de pocos granos individuales. Este estudio prueba que el ultrasonido puede ser una herramienta prometedora para las mediciones no destructivas y rápidas de la calidad del trigo en granos individuales.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo del CONCYTEQ y CONACYT para los proyectos “Uso de ultrasonidos en la caracterización de alimentos” y G35201-B "Estudio Integral de la Calidad de los Trigos Mexicanos y su Uso Potencial", respectivamente. Este trabajo es parte de la tesis doctoral del M.C. Guillermo Arlando López Huape. También se agradece a M.C. Jesús Borboa Flores, Guadalupe A. López Ahumada, Refugio Ortega Ramírez, Concepción L. Medina Rodríguez, Ma. Guadalupe Salazar García y Rafael Morales Castro, por el apoyo en los análisis de calidad del trigo.

BIBLIOGRAFÍA

AACC (1995) Approved Methods of Analysis Ninth Ed. Am. Assoc. Cereal Chem. St Paul, MN., USA.

Baker S, T J Herrman, T Loughin (1999) Segregating hard red winter wheat into dough factor groups using single kernel measurements and whole grain protein analysis. Cereal Chem. 76:884-889.

Benedito J, J Carcel, G Clemente, A Mulet (2000) Cheese maturity assessment using ultrasonics. J. Dairy Sci. 83:248-254.

Coupland J N (2004) Low intensity ultrasound. Food Res. Int. 37:537-543.

Dobraszczyk B J, J D Schofield (2002) Rapid assessment and prediction of wheat and gluten baking quality with the 2-g –Direct drive mixograph using multivariate statistical analysis. Cereal Chem. 79:607-612.

Elmehdi H M, J H Page, M G Scanlon (2004) Ultrasonic investigation of the effect of mixing under reduced pressure on the mechanical properties of bread dough. Cereal Chem. 81:504-510.

Khan K, G Tamminga, O Lukow (1989) The effect of wheat flour proteins on mixing and baking-correlations with protein fractions and high molecular weight glutenin subunit composition by gel electrophoresis. Cereal Chem. 66:391-396.

Lee H O, H Luan, D G Daut (1992) Use of an ultrasonic technique to evaluate the rheological properties of cheese and dough. J. Food Eng. 16:127-150.

Llull P, S Simal, J Benedito, C Rosselló (2002) Evaluation of textural properties of meat-based product (sobrassada) using ultrasonic techniques. J. Food Eng. 53:279-285.

McClements D J (1997) Ultrasonic characterization of foods and drinks: principles, methods and applications. Crit. Rev. Food Sci. Nutri. 37:1-46.

Mizrach A, V Flitsanov (1999) Nondestructive ultrasonic determination of avocado softening process. J. Food Eng. 40:139-144.

Nielsen J P, D K Pedersen, L Munck (2003) Development of nondestructive screening methods for single kernel characteristics of wheat. Cereal Chem. 80:274-28.

Page J H, H M Elmehdi, M G Scanlon (2004) Ultrasonic evaluation of the strength of flour doughs. Canadian Intellectual Property Office. Patent CA 2 496 396.

Pomeranz Y, P C Williams (1990) Wheat hardness: Its genetic, structural and biochemical background, measurement, and significance. Chapter 8. *In*: Advance in Cereal Science and Technology. Vol X. Am. Assoc. Cereal Chem. St. Paul, MN. pp:471-544.

Pasikatan M C, F E Dowell (2004) High-speed NIR segregation of high- and low-protein single wheat seeds. Cereal Chem. 81:145-150.

Pujol R, C Létag, I Lempereur, M Chaurand, F Mabille, J Abecassis (2000) Description of a micromill with instrumentation for measuring grinding characteristics of wheat grain. Cereal Chem. 77:421-427.

Povey M J W (1989) Ultrasonic in food engineering. Part II. Applications. J Food Eng. 9:1-20.

SAS (1999) SAS User´s Guide Version 8, SAS Institute Inc. Cary, NC.

Saggin R, J N Coupland (2002) Ultrasonic monitoring of powder dissolution. J. Food Sci. 67:1473-1477.

Sapirstein H D, J Suchy (1999) SDS-protein gel test for prediction of bread loaf volume. Cereal Chem. 76:164-172.

Sissons M J, B G Osborne, R A Have, S A Sissons, R Jackson (2000) Application of the single-kernel characterization system to durum wheat testing and quality prediction. Cereal Chem. 77:4-10.

Symons S J, L Van Schepdael, J E Dexter (2003) Measurement of hard vitreous kernel in durum wheat by machine vision. Cereal Chem. 80:511-517.