

LA RESONANCIA MAGNÉTICA Y SUS APLICACIONES EN LA AGROINDUSTRIA, UNA REVISIÓN

Iván Darío Aristizábal Torres¹

RESUMEN

Las propiedades electromagnéticas que presentan el hidrógeno y otros núcleos que componen los productos agroalimentarios han permitido usar ampliamente la Resonancia Magnética (RM) para estudiar, de manera no destructiva, la composición y la estructura interna de estos materiales biológicos en una escala tanto macroscópica como microscópica. En este artículo se explican los principios físicos que sustentan la RM, así como el equipo básico requerido para medir las señales de RM de cualquier muestra biológica y el procedimiento de adquisición de una imagen de RM. También, se hace una revisión de las principales aplicaciones en el sector agroalimentario, destacando principalmente los estudios desarrollados con ésta tecnología para examinar la calidad interna de las frutas y los vegetales. En estos productos, la RM ha sido utilizada para detectar e investigar la evolución de los diferentes factores que determinan la calidad interna luego de la cosecha, durante el almacenamiento y después del procesamiento poscosecha. Los estudios en poscosecha que más se han realizado con ésta tecnología son los relacionados con desordenes de tipo fisiológico que se producen en las frutas durante su almacenamiento y conservación en frío en atmósferas controladas y modificadas. Se espera en un futuro no muy lejano aplicaciones comerciales de sensores de RM en línea, basados en magnetos de bajo campo o con sistemas simplificados de análisis de imágenes, que permitan la determinación rápida y no destructiva de la calidad interna de los productos agroalimentarios.

Palabras claves: Resonancia Magnética (RM), momento magnético, espín, Resonancia Magnética de Imagen (RMI), productos agroalimentarios, calidad interna.

ABSTRACT

THE MAGNETIC RESONANCE AND ITS AGRO-INDUSTRY APPLICATIONS, A REVIEW

The electromagnetic properties that present hydrogen and other nucleus of agroalimentary products, have allowed widely use of Magnetic Resonance (MR) to study the composition and internal structure of these biological materials in a micro and macroscopic scale, in a nondestructive way. In this paper the physical principles, basic equipment to measure the MR signals and the MR imaging of any biological sample, are explained. It is also shown a review of the main agroalimentary applications, emphasizing in the use of this principle to examine the internal quality of fruits and vegetables. In these products, the MR has been used to detect and

¹ Profesor Asistente. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Facultad de Ciencias Agropecuarias. A.A 1779, Medellín, Colombia. <idaristi@unalmed.edu.co>

Recibido: Noviembre 11 de 2006; aceptado: septiembre 5 de 2007.

follow the evolution of different factors that determine the internal quality after harvesting, during storage and after postharvesting processes. The main studies that have been conducted with MR in harvested products are about physiological disorders, that take place during storage and conservation of fruits in controlled and modified cold atmospheres. In near future it is hope to have, commercial applications of MR sensors on line, based in a low field magnets or simplified image analyses, that allow the fast and nondestructive internal quality determination of the agro-alimentary products, are expected.

Key words: Magnetic resonance (MR), magnetic moment, spin, magnetic resonance imaging (MRI), agroalimentary products, internal quality.

Durante los últimos 40 años muchos investigadores han estudiado las propiedades físicas, mecánicas, ópticas, eléctricas, magnéticas y químicas de los productos agrícolas. Estas propiedades están muy relacionadas con factores como el tamaño, la forma, el color, el sabor, el olor, la textura, la firmeza, la presencia de defectos tanto externos como internos y de materiales extraños en los productos, que son utilizados para definir su calidad de acuerdo con normas y protocolos establecidos por muchos países desarrollados para su comercialización en el mercado mundial.

La medición de fenómenos como la reflexión, transmisión y absorción de las ondas electromagnéticas en las regiones ultravioleta, visible y el infrarrojo cercano, han permitido desarrollar con éxito técnicas no destructivas para evaluar la calidad de muchos productos agroalimentarios. Es por esto que en los últimos 10 años, ha crecido el interés por el desarrollo de sistemas automáticos basados en el análisis de imágenes, capaces de reemplazar la inspección visual humana, denominados sistemas de visión artificial. En la actualidad los sistemas de visión artificial son capaces de evaluar la calidad de los productos agrícolas a muy alta velocidad, gracias a los importantes avances tecnológicos ob-

tenidos en "hardware" y "software" que han permitido la disminución de costos de computación y el desarrollo de nuevos y poderosos algoritmos. En la literatura se reportan gran cantidad de estudios relacionados con estos sistemas y, hoy en día, son numerosas las aplicaciones comerciales de clasificación en línea que han incorporado sistemas de visión y análisis de imágenes para frutas y hortalizas (Chen y Sun, 1991, Abbott *et al.*, 1997; Chen, Chao y Kim, 2002; Kondo *et al.*, 2004; Unay y Gosselin, 2004; Butz, Hoffmann and Tauscher, 2005).

Sin embargo, estos sistemas no alcanzan a observar el interior de la fruta a profundidades superiores a unos pocos milímetros por debajo de la epidermis, por lo que resultan poco efectivos para examinar la calidad interna del producto. Por este motivo, se han explorado otras tecnologías, basadas en radiaciones electromagnéticas de muy corta longitud de onda (<100 nm), que son capaces de penetrar en la mayoría de productos agrícolas y producir imágenes de su interior. Algunas técnicas, como las basadas en rayos X y en rayos γ , han resultado ser, incluso operando en línea, bastante eficientes para inspeccionar el interior de las frutas, pero desafortunadamente con un cierto riesgo para la salud humana, a

veces mínimo, pero que produce un enorme rechazo en el consumidor (Chen y Sun, 1991; Abbott *et al.*, 1997).

Otra alternativa de inspección interna de productos agroalimentarios, que se ha ido extendiendo en muchas otras áreas del conocimiento, es la resonancia magnética (RM). La RM puede definirse, de manera simple, como el fenómeno de interacción entre una onda de radio frecuencia (2 a 200 MHz) y los núcleos atómicos (protones) sometidos a un campo magnético estático externamente aplicado. En los materiales biológicos, como las frutas y los vegetales, el hidrógeno es el principal componente del agua, de los azúcares y de los aceites presentes en estos materiales. Este núcleo, precisamente, produce una de las más fuertes señales de RM, propiedad que ha sido aprovechada por los investigadores para inferir, de manera no destructiva, la composición interior y otros factores de calidad interna que no son apreciables a simple vista, ni detectables por la mayoría de técnicas no destructivas desarrolladas hasta hoy. La principal ventaja que ofrece la RM frente a las técnicas de rayos X y rayos γ , es su inocuidad para el ser humano, para el producto y para el ambiente. El objetivo principal de este artículo es el de explicar los principios básicos de la tecnología de RM y sus principales aplicaciones en el sector agroalimentario, especialmente los trabajos desarrollados para la evaluación de la calidad interna de las frutas y los vegetales.

PRINCIPIOS BÁSICOS DE LA RM

La tecnología de la RM se basa en los momentos magnéticos que presentan

los núcleos atómicos. El núcleo del átomo está constituido por un determinado número de protones y neutrones (la única excepción es el núcleo de hidrógeno que es un solo protón), y tiene un movimiento colectivo complejo de rotación sobre su propio eje (Figura 1). Esta rotación le confiere al protón, desde el punto de vista mecánico, un momento cinético denominado *espín*, representado por el vector \vec{s} , con la misma dirección de su eje de rotación y magnitud expresada en [Hz] y, desde el punto de vista eléctrico, un momento magnético representado por el vector de imantación $\vec{\mu}$ cuya magnitud se expresa en teslas [T] (Fullerton, 1982; Desgrez, Bittoun e Idy, 1991; Kastler, Vettet y Gangi, 1997; Ruan y Chen, 1998).

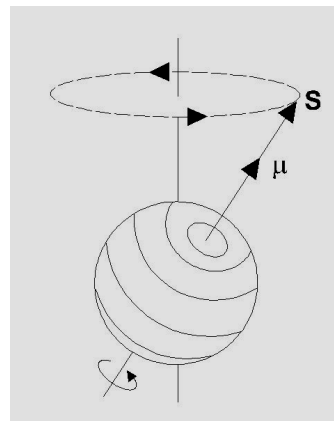


Figura 1. Momentos resultantes sobre un protón.

De acuerdo con la mecánica cuántica \vec{s} depende del número cuántico I característico de cada isótopo y de la cercanía del protón al núcleo atómico. La dirección de \vec{s} , debe estar cuantizada en el espacio, esto significa que deben especificarse los valores de la

proyección de \vec{S} en la misma dirección vertical z del sistema de coordenadas cartesianas en el que el campo magnético externo \vec{B}_0 actúa sobre el protón. Para el núcleo del hidrógeno, con $I=1/2$, este protón presenta dos posibles orientaciones que corresponden a dos niveles de energía. El momento magnético $\vec{\mu}$ es proporcional al momento cinético de rotación \vec{S} mediante la siguiente expresión:

$$\vec{\mu} = \gamma \vec{S} \quad (1)$$

Donde γ es la constante de giro magnético en $[\text{MHz}\cdot\text{T}^{-1}]$, constante propia de cada núcleo que relaciona ambos momentos. Para las dos posibles orientaciones del protón, se tiene que su momento magnético $\vec{\mu}$, es:

$$\vec{\mu} = \pm \frac{I}{2} \gamma \hbar \quad (2)$$

Donde \hbar es la constante de Planck ($6,626 \times 10^{-34} / (2\pi)$ J·s). En RM deben considerarse dos clases de momentos magnéticos; los momentos magnéticos individuales de cada protón ($\vec{\mu}$) denominados momentos microscópicos, los cuales se estudian con las leyes de la física cuántica, y los momentos magnéticos macroscópicos (\vec{M}) asociados a volúmenes de materia (vóxeles), que se estudian con las leyes clásicas del electromagnetismo (Desgrez, Bittoun e ldy, 1991; Kastler, Vettet y Gangi, 1997). Cada vóxel posee un momento magnético macroscópico \vec{M} que corresponde al sumatorio de todos los momentos individuales $\vec{\mu}$ de sus protones, esto es:

$$\vec{M} = \sum \vec{\mu} \quad (3)$$

Comportamiento del momento magnético. La interacción de los momentos magnéticos $\vec{\mu}$ y \vec{M} con un campo magnético externo \vec{B}_0 genera tres fenómenos importantes que deben ser considerados de forma separada a escala microscópica (modelo cuántico) y a escala macroscópica (modelo clásico); estos fenómenos son: la orientación del momento, la energía de interacción y el movimiento de precesión (Desgrez, Bittoun e ldy, 1991).

Orientación del momento. En un campo \vec{B}_0 los momentos microscópicos $\vec{\mu}$ de los distintos protones se orientan según dos posibles ángulos cuyos valores son suplementarios θ ó $(\pi-\theta)$ como se indica en la Figura 2a. Sin embargo, los momentos pueden localizarse en una posición cualquiera sobre el cono definido por los ángulos θ y $(\pi-\theta)$ (Figura 2b).

En ausencia del campo exterior \vec{B}_0 los diferentes momentos microscópicos están orientados en forma aleatoria en cualquier dirección y su suma es nula, pero en presencia de \vec{B}_0 se orientan según uno de los ángulos antes mencionados apareciendo el vector de imantación macroscópica \vec{M} , paralelo a \vec{B}_0 (Desgrez, Bittoun e ldy 1991; Kastler, Vettet y Gangi, 1997).

Energía de interacción. De acuerdo con lo explicado anteriormente, en el campo magnético \vec{B}_0 , los momentos \vec{S} y $\vec{\mu}$, sólo pueden tener dos orientaciones posibles, paralela (β , mismo sentido de \vec{B}_0) y antiparalela (α , sentido contrario de \vec{B}_0), que corresponden según el modelo cuántico a dos niveles de energía E_1 y E_2 cuya diferencia de energía ΔE está dada por:

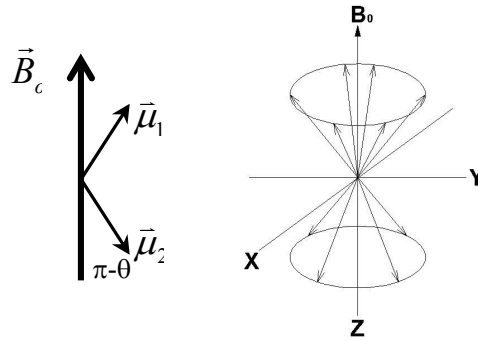


Figura 2. Orientación posible de $\vec{\mu}$ en un campo \vec{B}_0 .

$$\Delta E = \gamma \hbar B_0 \quad (4)$$

Donde ΔE es la energía requerida por un fotón de una específica frecuencia para excitar un núcleo y producir la transición entre el estado de baja energía (α) y el estado de alta energía (β). La energía de excitación depende principalmente de la magnitud del campo magnético \vec{B}_0 (Fullerton, 1982; Hornak, 1996; Kastler, Vettet y Gangi, 1997; Ruan y Chen, 1998). Cuando un grupo de N protones son situados en un campo magnético \vec{B}_0 , cada espín se alinea en una de las dos posibles orientaciones y el reparto entre los dos niveles de energía no es equitativo. La escasa diferencia en el reparto de la población de espines produce la aparición del vector de imantación macroscópica \vec{M} , que es aprovechado para generar una señal de RM (Desgrez, Bittoun e ldy, 1991; Ruan y Chen, 1998).

Movimiento de precesión. De acuerdo con la teoría clásica del electromagnetismo, cualquier núcleo que sea localizado en un campo \vec{B}_0 , intentará auto alinearse con éste dando como resultado un movimiento de "bamboleo",

similar al que experimenta un trompo girando por efecto del campo gravitacional, denominado movimiento de precesión. Los protones experimentan una precesión alrededor de \vec{B}_0 , con una frecuencia, definida por las siguientes ecuaciones:

$$\omega_o = \gamma B_0 \quad (5)$$

$$\nu_o = \frac{\omega_o}{2\pi} \quad (6)$$

Donde:

ω_o : frecuencia angular [$\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$]

ν_o : frecuencia cíclica [Hz]

Esta frecuencia característica se conoce como la frecuencia de Larmor y depende de la intensidad del campo externo aplicado \vec{B}_0 y de γ . Reemplazando las Ecuaciones (5) y (6) en (4), se obtiene:

$$\Delta E = \hbar \nu_o \quad (7)$$

Que es la expresión en el modelo cuántico para la energía de excitación. Esta ecuación indica la energía que un fotón de onda electromagnética debe

tener para excitar un núcleo desde un estado de baja energía a uno de alta energía, la cual está determinada por la frecuencia de Larmor (ν_o). En un experimento de RM, la frecuencia de un fotón está en el rango de las radio-frecuencias (10^3 a 10^8 Hz) (Fullerton, 1982; Hornak, 1996). Esta frecuencia no es constante y depende del campo magnético en el cual los protones están situados. A mayor intensidad de \vec{B}_o , mayor velocidad y frecuencia de precesión. Así por ejemplo, para un protón si el campo magnético es de 1 T, ν_o es de 42,58 MHz mientras que en un campo de 4,7 T, ν_o será alrededor de 200 MHz.

Efecto de una onda electromagnética.

Es posible provocar la transición del nivel E_2 al nivel E_1 y modificar la orientación del momento magnético \vec{M} si se aporta una cantidad de energía E , mediante una onda ó pulso electromagnético de un campo magnético oscilante \vec{B}_i aplicado en el plano XY y con una frecuencia ν , tal que:

$$E = \Delta E \quad (8)$$

La energía de la onda de radio-frecuencia debe ser, según la Ecuación (7):

$$E = \hbar \nu = \hbar \frac{\omega_r}{2\pi} \quad (9)$$

Donde: ω_r es la frecuencia angular de la onda [rad/s].

Reemplazando (4), (5) y (9) en (8), se obtiene:

$$\omega_r = \omega_o \quad (10)$$

La igualdad anterior indica la condición de resonancia de la mecánica clásica en

la cual la frecuencia angular de rotación ω_r de un campo oscilante \vec{B}_i debe ser igual a la frecuencia de Larmor ω_o , para producir la transición entre E_2 y E_1 , y modificar la orientación de \vec{M} en una muestra que contiene N protones. De este modo es posible producir la rotación de \vec{M} alrededor de \vec{B}_o un ángulo θ en [rad], que puede ser expresado como:

$$\theta = \gamma B_1 \tau_p \quad (11)$$

Donde: τ_p : tiempo de duración del pulso electromagnético \vec{B}_i [ms].

Cuando el pulso de RF y los protones tienen la misma frecuencia ($\omega_r = \omega_o$) se presenta el fenómeno de resonancia, similar al observado en experimentos de acústica y de vibraciones mecánicas. En la condición de resonancia \vec{M} continuará girando alrededor de \vec{B}_o (eje z) y también precesará alrededor de \vec{B}_i (eje x).

Como consecuencia de esto \vec{M} experimenta un movimiento complejo que desciende describiendo una espiral sobre un casquete esférico (Figura 3).

Los momentos \vec{M}_z y \vec{M}_{xy} , generados con la aplicación de \vec{B}_i , son denominados vectores de imantación longitudinal y transversal respectivamente (Desgrez, Bittoun e Ily, 1991; Hornak, 1996; Kastler, Vettet y Gangi, 1997).

Fenómenos de relajación. Después que el pulso de RF es retirado, todo el sistema previamente perturbado por este pulso, retorna a su estado de reposo original. Los protones que fueron elevados al nivel alto de energía retornan al nivel de baja energía.

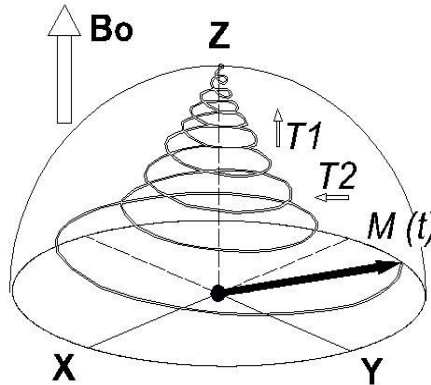


Figura 3. Movimiento de precesión de \vec{M} . (Kastler, Vettet y Gangi, 1997)

Es así como la relajación de los protones ocurre mediante transiciones inversas del nivel de alta energía E_2 al de baja energía E_1 , provocando que el vector de imantación longitudinal \vec{M}_z vuelva a crecer progresivamente, fenómeno conocido como relajación en T_1 ; y debido a la pérdida de la fase de los espines, la imantación transversal \vec{M}_{xy} disminuye rápidamente, fenómeno conocido como relajación en T_2 (Figura 3). Para explicar estos fenómenos en los cuales los momentos macroscópicos vuelven espontáneamente

a su posición de equilibrio después de una excitación, se utilizan las ecuaciones diferenciales de Bloch (Desgrez, Bittoun e ldy, 1991; Hornak, 1996).

Relajación longitudinal T_1 . Desde que se conecta el campo magnético en una muestra con los espines orientados al azar hasta que se establece el equilibrio térmico, la magnetización macroscópica crece exponencialmente a medida que los dipolos magnéticos se alinean en torno al campo externo \vec{B}_0 (Figura 4) (Kastler, Vettet y Gangi, 1997).

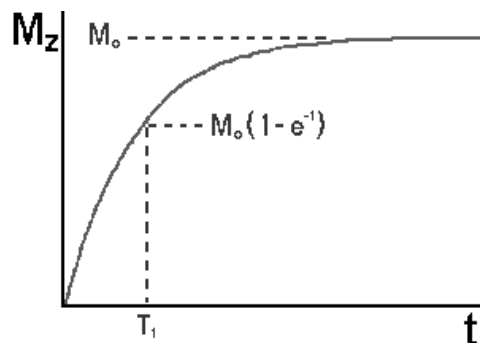


Figura 4. Relajación longitudinal T_1 .

La relajación en T_1 conocida también como relajación espín-medio está representada por la siguiente expresión:

$$\vec{M}_{z(t)} = \vec{M}_o \left(1 - e^{-\frac{t}{T_1}} \right) \quad (12)$$

Donde:

\vec{M}_o : es el vector de imantación macroscópica tras el pulso de 90° [J/T]

t: tiempo [s]

T_1 : constante de tiempo [s]

La relajación en T_1 es el tiempo que requiere la magnetización longitudinal \vec{M}_z de los protones de una muestra en retornar a su valor original de equilibrio. T_1 es obtenido de la ecuación anterior cuando se alcanza un 63% de la imantación longitudinal original, porcentaje para el cual $t=T_1$. El tiempo de relajación T_1 varía con el estado de la materia, la estructura y composición molecular, la viscosidad y las interacciones magnéticas con el entorno. T_1 es mayor en líquidos que en sólidos y para tejidos biológicos T_1 tiene valores entre 300 y 2000 ms (Castiñeira, 1989; Hornak, 1996; Kastler, Vettet y Gangi, 1997).

Relajación transversal T_2 . Fenómeno relacionado con las inhomogeneidades del campo magnético donde la muestra está localizada, debidas a la variación de la intensidad de campo en diferentes puntos de este espacio produciendo diferentes frecuencias de precesión. Cada protón está influenciado por pequeños campos magnéticos no uniformes producidos por los núcleos vecinos, los cuales causan también diferentes velocidades de precesión. Cuando cesa el pulso de RF los protones se desfazan, \vec{M}_{xy} disminuye y se anula con rapidez. Esta disminución y retorno al equilibrio de la imantación transversal perpendicular a \vec{B}_o tiene un comportamiento también de tipo exponencial pero decreciente (Figura 5), con una constante de tiempo T_2 denominada tiempo de relajación transversal, que se puede representar mediante la siguiente expresión:

$$\vec{M}_{xy(t)} = \vec{M}_o e^{-\frac{t}{T_2}} \quad (13)$$

Donde T_2 es la constante de tiempo [ms].

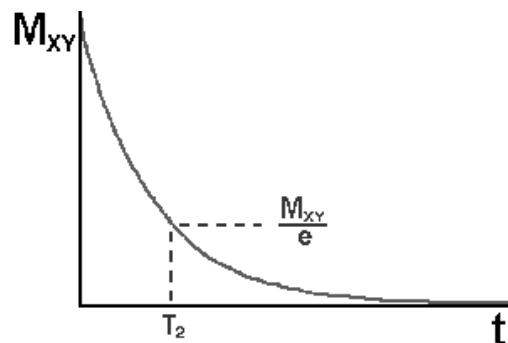


Figura 5. Relajación transversal T_2 .

T_2 es definida en la ecuación anterior cuando la magnetización transversal \vec{M}_{xy} disminuye el 37% de su valor original, valor para el cual $t = T_2$. T_2 es grande cuando el campo magnético es muy homogéneo dentro del material, pues los protones se mueven en fase gran tiempo, y T_2 es pequeño cuando las diferencias en los campos magnéticos locales son notables. Esto es particularmente notorio en sólidos, donde las diferencias de viscosidad, cristalinidad y campo magnético local destruyen la precesión coherente. T_2 también varía con la estructura molecular y es mayor en líquidos que en sólidos o en tejidos constituidos por grandes moléculas. En los tejidos biológicos T_2 varía entre 50 y 150 ms. Dependiendo del tipo de material T_2 es igual ó aproximadamente 10 veces menor que T_1 y ambos procesos de relajación ocurren simultáneamente (Castiñeira, 1989; Hornak, 1996; Kastler, Vettet y Gangi, 1997).

Medida de la señal de inducción libre FID.

Durante la relajación \vec{M}_{xy} describe un movimiento en forma de espiral (Figura 3) que genera una señal de onda de RF que desaparece con el tiempo, denominada señal de inducción libre FID. La técnica clásica para captar esta señal emplea una

bobina, denominada antena receptora, en cuyos bornes la rotación del momento magnético transversal hace aparecer una diferencia de potencial de igual frecuencia que la precesión, transformando la onda de RF en una señal eléctrica. Esta señal es máxima, cuando el eje de la bobina está localizado en el plano XY y es perpendicular al eje de rotación de \vec{M}_{xy} . La señal de FID tiene la forma de una onda sinusoidal cuya amplitud decrece en el tiempo de manera exponencial (Fullerton, 1982; Hornak, 1996; Kastler, Vettet y Gangi, 1997).

La señal FID, que es obtenida en el dominio del tiempo $A_{(t)}$, requiere ser convertida al dominio de la frecuencia $A_{(\omega)}$, para ello se utiliza la transformada de Fourier (FT). Cuando se aplica la FT a la señal de inducción libre FID se obtiene como resultado un pico de la señal en la frecuencia ω_0 (Figura 6). El ancho de la banda de frecuencia $\Delta\omega$, alrededor de la abscisa ω_0 en la mitad de la altura pico $f_{(\omega_0)/2}$, según la ecuación de Lorentzian, es:

$$\Delta \omega = \frac{2}{T_2} \tag{14}$$

Expresión que permite obtener el tiempo de relajación T_2 a partir de la FT.

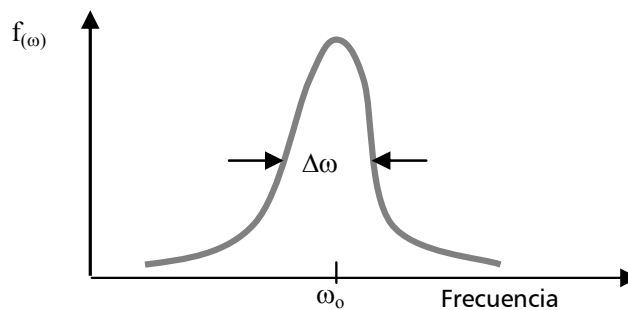


Figura 6. FT de la señal de FID.

La FT puede ser aplicada a una matriz bidimensional de datos y se conoce como la transformada de Fourier en dos dimensiones (2DFT). Esta transformación es muy importante para realizar la codificación de las señales que permiten la generación de las imágenes de RM.

Equipo básico para medir RM. Los componentes básicos necesarios para la medición de RM a una determinada muestra son (Figura 7): un imán para producir el campo magnético \vec{B}_0 ; un transmisor de RF que suministra una señal según los núcleos seleccionados en la muestra y según el campo magnético externo; un receptor que detecta la señal generada por el movimiento de precesión de la imantación de los espines en la muestra y envía la señal FID a un procesador en un sistema integrado también por un secuenciador (programador de pulsos), sistema de

adquisición de datos, procesador de señal y un visualizador. (Fullerton, 1982; Ruan y Chen, 1998). Dependiendo del área de aplicación técnica, de la precisión requerida para evaluar T_1 y T_2 , del requerimiento de identificación de compuestos por movilidad química a alta frecuencia, del tamaño y composición de la muestra y de otros aspectos técnicos; los equipos de RM varían en tamaño, potencia, intensidad de campo magnético (resolución) y complejidad de sus componentes físicos, electrónicos y de programación, así como en su costo.

Secuencias para la reconstrucción de imágenes RMI. El procedimiento básico simplificado para la reconstrucción de una imagen de RM en dos dimensiones se resume en los siguientes 5 pasos representados por una secuencia (diagrama de eventos medidos en el tiempo, Figura 8) (Hornak, 1996; Kastler, Vettet y Gangi, 1997; Ruan y Chen, 1998):

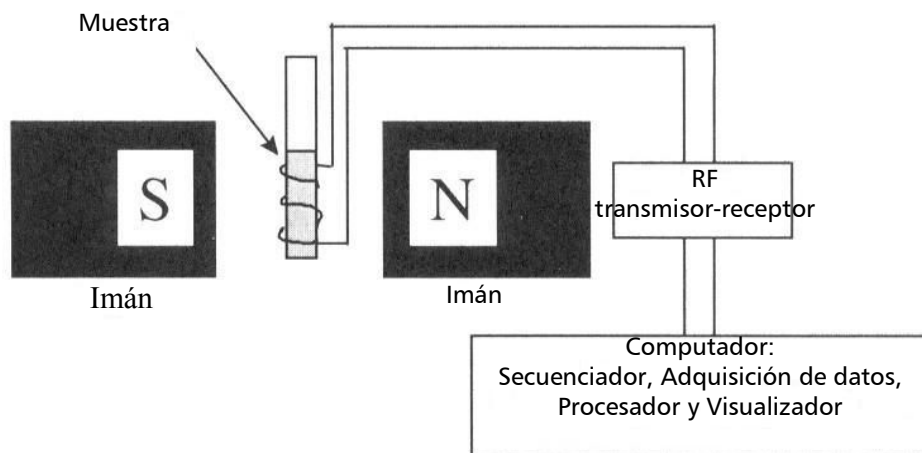


Figura 7. Esquema de un equipo básico para medir RM. (Adaptado de Ruan y Chen, 1998)

- 1- Pulso de RF de 90° para excitar los espines.
- 2- Pulso de gradiente de selección G_s del plano de corte en la muestra
- 3- Pulso de gradiente de codificación de la fase G_ϕ .
- 4- Pulso de gradiente de codificación de la frecuencia G_f y registro de la señal de RF emitida (n puntos de datos).
- 5- Incremento del valor del gradiente de codificación de fase G_ϕ y repetición de los pasos 1 a 4, m veces.

En la secuencia típica 90° FID mostrada en la Figura 8, la ordenada y la abscisa indican la magnitud y la duración respectivamente de los pulsos de gradientes de campo magnético. Los pulsos 1 y 2 se programan simultáneamente. Una vez el pulso de RF finaliza, el G_s también es suprimido e inmediatamente se activa G_ϕ que a su vez al finalizar, permite dar inicio a G_f y el registro simultáneo de la señal FID al cabo de un tiempo denominado tiempo eco T_E . Esta secuencia de pulsos se repite normalmente entre 128 y 256 veces.

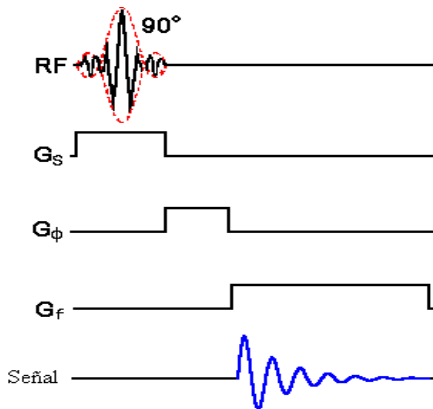


Figura 8. Secuencia simplificada de reconstrucción de una imagen FT bidimensional.

El tiempo empleado en la repetición de la secuencia es denominado T_R y cada vez que la secuencia se repite, la magnitud de G_ϕ es incrementada en forma lineal. Por cada localización que se quiera determinar, en la dirección de aplicación de G_ϕ , será necesario realizar un incremento de este gradiente y hacer el registro de una señal FID. Las señales FID son adquiridas en el dominio del tiempo $f(t)$ y son procesadas mediante la FT para tener la localización de los espines. Primero se

aplica la FT en la dirección de G_ω para extraer la información de las frecuencias dominantes $f(\omega)$ y luego en la dirección de G_ϕ para extraer la información de la localización en esta dirección. Los datos de la FT son mostrados como una imagen a través de la conversión de las intensidades de los picos de frecuencia y fase a intensidades de brillo de píxel ("picture element"). Así la imagen RMI obtenida es una matriz de m filas por n columnas, en la cual G_ϕ permite codificar las líneas m y G_ω permite co-

dificar las columnas. Por tanto en cada píxel de la matriz de la imagen se codifica la señal (ω_i , ϕ_i) emitida por un grupo de protones contenidos en un vóxel (Hornak, 1996; Kastler, Vettet y Gangi, 1997).

APLICACIONES DE LA RM EN EL SECTOR AGROALIMENTARIO

La tecnología RM de baja resolución (escala macroscópica) es la más utilizada en el sector de los alimentos. En ésta área se han desarrollado instrumentos de RM para aplicaciones específicas, destacándose los que cuantifican el contenido de sólidos en grasas y aceites; los trabajos en determinación de la razón sólido-líquido en margarinas y grasas comestibles, la evaluación del contenido de aceites en semillas oleaginosas, del contenido de grasa y humedad de la leche en polvo y derivados lácteos, del contenido de aceites y grasas en carnes frescas o enlatadas y pescados, del contenido de humedad en azúcares, pulpa de remolacha, puré de tomate, humedad de arroz, fideos y pastas (Castiñeira, 1989; Ablett, 1992; Schrader, Litchfield y Schmidt, 1992; Stroshine, 1999; Hickey *et al.*, 2006).

Estudios del cambio en la distribución del agua durante el procesamiento y el almacenamiento de los alimentos han sido realizados investigando los tiempos de relajación T_1 y T_2 (Ablett, 1992), entre estos; el trabajo de Budiman *et al.* (2001), modelando las curvas de relajación transversal para correlacionar T_2 con el contenido de agua, de sal y de grasa en el queso; el mapeo de temperaturas en los tejidos realizado a partir de la intensidad de señal en imágenes reconstruidas a

diferentes temperaturas (Ablett, 1992; Clark *et al.*, 1997); el control de la pérdida de humedad en el café tostado, estudios sobre movilidad de agua en los alimentos congelados (Castiñeira, 1989) y procesos cinéticos durante el descongelamiento (Koizumi *et al.*, 2006). También la microestructura de los alimentos ha sido investigada utilizando los pulsos de gradientes, permitiendo determinar los coeficientes de difusión de líquidos puros y del agua de células en semillas comestibles (Ablett, 1992; Ishida, Ogawa y Kano, 1995).

La RM de alta resolución permite identificar la estructura química de una muestra diluida a partir del análisis de los picos de resonancia observados en un espectro de RM (Ablett, 1992). Se reportan varios trabajos sobre el estudio del espectro de alta resolución de alimentos líquidos como leche y jugos de fruta (Castiñeira, 1989) y análisis cuantitativo de la cafeína en la bebida de café mediante espectroscopía de RM (Tavares y Ferreira, 2006). Kuchenbrod *et al.* (1995), pudieron obtener mediante RMI de alta resolución, imágenes microscópicas cuantificables de plantas enteras de maíz que permiten realizar estudios morfológicos en vivo de los tejidos. También, estudios histológicos para distinguir tejidos con diferentes propiedades de relajación han permitido observar, mediante microimágenes RMI con una resolución menor de 100 μm , tejidos parenquimáticos de diferente origen ontológico (Clark *et al.*, 1997; Glidewell *et al.*, 1997). Williamson, Goodman y Chudek, 1993, revelaron la arquitectura vascular de la fruta madura de grosella, diferenciando claramente la pared del ovario de los tejidos parenquimáticos que rodean la semilla.

Estudios con núcleos diferentes al ^1H son ahora posibles, como por ejemplo el uso de ^{31}P -RM para el estudio in vivo de metabolismo en ciertos materiales biológicos (Ablett, 1992), el uso de ^{23}Na -RMI para investigar el crecimiento de plantas bajo estrés salino, utilización de ^{19}F -RM para estudiar movilidad en el xilema del tomate de productos herbicidas degradados (Ishida *et al.*, 2000) y uso de ^{13}C -RM para estudiar la estructura de celulosa extraída del pericarpio de semillas (Habibi *et al.*, 2007). La microscopía de RM de alta resolución también ha sido utilizada para analizar cambios en la migración y movilidad del agua y solutos, estudiar las características de las membranas de las células y monitorizar metabolitos, estudios de transporte, absorción, flujo y difusión del agua en tejidos vegetales, viabilidad de semillas y su potencial de germinación, morfología de frutas y otros órganos vegetativos (Castiñeira, 1989; Callaghan, Clark y Forde, 1994; Kuchenbrod *et al.*, 1995; Ishida, Ogawa y Kano, 1995; Ishida *et al.*, 1997; Ishida, Koizumi y Kano, 2000; Glidewel *et al.*, 1997; Hills, 1998; Ruan y Chen, 1998; Vozzo, Patel y Terrel, 1999; Scheenen *et al.*, 2000 y 2002; Köckenberger, 2001; Kikuchi *et al.*, 2006; Glidewell, 2006).

Específicamente, estudios de imágenes RMI de flujo para la caracterización de propiedades reológicas de alimentos líquidos, acuosos y suspensiones se han realizado con el fin de optimizar muchos de los procesos de manufactura de los alimentos (Hills, 1998). Song, Litchfield y Morris (1992) y Ghosh *et al.* (2006 a, b,) estudiaron en granos de maíz y trigo, respectivamente, mediante RMI de alta

resolución la transferencia de humedad y remoción del agua durante el proceso de secado. También se han realizado aplicaciones de la RM para determinar parámetros utilizados para valorar el lugar de origen y la trazabilidad de diferentes productos como tomate cereza, vino y aceite de oliva (Sequi, Dell'Abate y Valentin, 2007).

Investigación con RM en productos vegetales y frutas. Desde 1977 cuando fue adquirida y publicada la primera imagen RMI de una fruta, específicamente un limón, Figura 9, Hinshaw *et al.* (1977), se han realizado numerosas investigaciones utilizando esta tecnología para estudiar, de forma no destructiva, la calidad interna de frutas y productos hortícolas, las cuales han sido recogidas por Chen y Sun, 1991; Schrader, Litchfield y Schmidt, 1992; McCarthy, 1994; Abbott *et al.*, 1997; Clark *et al.*, 1997; Faust, Wang y Maas, 1997; Hills, 1998; Ishida *et al.*, 2000; Hills y Clark, 2003; Butz, Hoffmann y Tauscher, 2005.

Los estudios de calidad en frutas y vegetales con RM han sido llevados a cabo principalmente en las siguientes áreas: crecimiento de las frutas, evaluación de la maduración, detección de defectos internos, estudios de desórdenes fisiológicos y respuesta a tratamientos poscosecha. A continuación se destacan algunos de estos trabajos.

Crecimiento de las frutas. En la literatura se mencionan varios trabajos utilizando equipos de RMI de media y alta resolución para estudiar, mediante imágenes de RM, el crecimiento y el desarrollo de diferentes clases de frutas y

la relación que presenta la información obtenida de las imágenes con los cambios exhibidos en propiedades físicas y químicas de las fruta. Saltveit (1991), por ejemplo, obtuvo imágenes RMI de tomates con diferentes estado de desarrollo, revelando de forma clara, muchos detalles estructurales del interior de la fruta. En las imágenes logradas, la intensidad de la señal de los píxeles en la imagen varió dependiendo del tipo de tejido interior y del estado de desarrollo de la fruta. Ishida, Koizumi y Kano (1997), examinaron con RMI de alta resolución los cambios del estado del agua y de los compuestos solubles acumulados durante el crecimiento de frutos de cereza.

Clark, Richardson y Marsh (1999), adquirieron imágenes RMI en T_1 , T_2 y DP de mandarina Satsuma para visualizar los cambios anatómicos de la piel y del sistema vascular del mesocarpio y para ver la morfología de los sacos de jugo dentro de los segmentos de la pulpa. En frutos de caqui, Clark y MacFall (2003) determinaron los tiempos de relajación T_1 y T_2 durante diferentes semanas, a partir de la formación de la fruta, en los tejidos vasculares del mesocarpio. Andaur *et al.* (2004), utilizaron RMI para estudiar el crecimiento de uvas de diferentes variedades permitiendo la visualización de características internas y la obtención del volumen de los racimos de fruta.

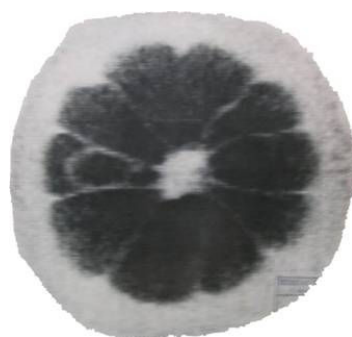


Figura 9. Primera imagen RMI realizada en limón (Hinshaw, 1977).

Evaluación de maduración. En este campo es en el que más trabajos se han realizado utilizando la espectroscopia de RM e imágenes RMI. Chen, Maccarthy y Kauten (1989), utilizando RMI, con secuencias eco espín, mostraron las diferencias en el contraste de los diferentes tejidos que presentan las imágenes de RM de tomate verde y maduro, aguacate inmaduro y maduro y pulpa sobremadura con relación a pulpa

madura de piña. Saltveit (1991), determinó con RMI diferencias claras en el contenido de agua libre de la región locular de diferentes categorías de tomate maduro. Posteriormente, Kim, Maccarthy y Chen (1994), encontraron con RMI diferencias en T_2 entre tomate maduro (blando) y verde (firme). Sin embargo, en un estudio reciente con un espectrómetro de RM, Tu *et al.* (2007), concluyen que la clasificación de tomate

de diferentes variedades basada en diferencias en T_2 correlacionadas con la firmeza de la fruta, no es promisorio para el desarrollo de un sensor en línea debido a las pequeñas diferencias encontradas en su investigación.

Callaghan, Clark y Forde (1994), establecieron que los tiempos de relajación y los mapas de difusión obtenidos a partir de imágenes RMI de frutas de kiwi, variaron de forma significativa con la maduración. Los cambios en estos parámetros fueron atribuidos a cambios en la dinámica del agua resultante de elevadas concentraciones de azúcares.

Posteriormente con RMI y espectroscopia de RM, Ishida, Koizumi y Kano (1994), observaron los cambios en el estado del agua (movilidad) presente en frutas de tomate "Cherry" con diferentes estados de maduración, y Jagannathan, Govindaraju y Raghunathan (1995), estudiaron diferentes procesos de maduración en la histoquímica del coco.

Muñoz y Merodio (1995), encontraron alta correlación entre los parámetros T_1 y T_2 con la firmeza en frutas de chirimoya en diferentes estados de maduración, concluyendo que la RMI es una herramienta adecuada para el monitoreo de la maduración de esta fruta tropical. Yantarasi *et al.* (1996), encontraron en frutas exóticas que mediante la tecnología RMI es posible diferenciar frutas de durian (*Durio zibethinus* L) inmaduros, maduros y sobremaduros, y detectar daños, desordenes internos y pulpa podrida en frutas de mangostino (*Garcinia mangostana*).

Micro imágenes RMI y mapas obtenidos a partir de imágenes contrastadas en T_1 de frutas de cereza en diferentes estados de maduración fueron obtenidos por Ishida *et al.* (1997), indicando diferencias en la señal emitida por la semilla y por el pericarpio para los diferentes estados de maduración de la fruta. Ishida *et al.* (2000), en otra publicación, explican el uso de la micro RMI para el seguimiento de los cambios durante la maduración de productos como tomate, maíz dulce y pepino.

Letal *et al.* (2003) analizaron imágenes RMI ponderadas en T_2 obtenidas de tres variedades de manzana, durante la maduración y el almacenamiento y determinaron correlaciones significativas entre los diferentes parámetros texturales de las imágenes con la firmeza, el contenido de azúcares y la acidez de la fruta, que pueden ser utilizadas para la caracterización de la maduración de esta fruta. Zho y Li (2007), mediante análisis de textura, su correlación con imágenes RMI ponderadas en T_2 , y el uso de redes neuronales artificiales, predijeron exitosamente la firmeza de pera Huanghua durante un período de almacenamiento de dos meses a 4°C en atmósfera controlada.

En un estudio reciente, Goñi *et al.* (2007), monitorearon a través de RMI los tiempos T_1 y T_2 y determinaron los cambios que se presentan en el estado del agua, durante la maduración a 20°C de la chirimoya (*Annona cherimola*).

Sensores basados en ^1H -RM para evaluar el contenido de azúcares y de sólidos

solubles como indicadores del grado de maduración han sido probados en tomate (Stroshine *et al.*, 1991; Pearson y Job, 1994 citados por Abbott *et al.*, 1997); uvas (Stroshine *et al.*, 1991; Cho *et al.*, 1991 y 1993; Bellon *et al.*, 1992; Goodman, Williamson y Chudek, 1993; Andaur *et al.*, 2004); arandano y banano (Stroshine *et al.*, 1991; Cho *et al.*, 1991; Ni y Eads, 1993); melón (Cho *et al.*, 1991); pera y cereza (Stroshine *et al.*, 1991; Bellon *et al.*, 1992; Li *et al.*, 1992; Cho *et al.*, 1993; Ray *et al.*, 1993; Kim *et al.*, 1998); nectarina, manzana y melocotón (Li *et al.*, 1992; Stroshine *et al.*, 1994; Wai, Stroshine y Krutz, 1995; Letal *et al.*, 2003); ciruela y maíz dulce (Wai *et al.*, 1993; Zion, Chen y McCarthy, 1995); durian y mango (Kim, McCarthy y Chen, 1998), naranja (Stroshine *et al.*, 1994) y kiwi y cebolla (Jordan y Eustace, 1993 y Pearson y Job, 1994 citados por Abbott *et al.*, 1997). También ha sido evaluado con ^1H -M el contenido de aceite en aguacate como indicador de madurez para este producto (Chen *et al.*, 1993; Kim, McCarthy y Chen, 1998 y Kim *et al.*, 1999).

Detección de defectos internos. Las aplicaciones de la RM en el área de detección de defectos internos en frutas y verduras comprenden los estudios realizados para identificar con anticipación a que se hagan evidentes externamente los daños ocasionados por insectos y hongos, las magulladuras producidas por golpes, y la identificación no destructiva de semillas y hueso en variedades en las que estas se requiere. A continuación se citan los principales trabajos desarrollados en este campo.

Daños por insectos. Chen, McCarthy y Kauten (1989), obtuvieron imágenes RMI de pera asiática mostrando las cavidades y galerías producidas por larvas al interior de la fruta, y Mazucco *et al.* (1993), citados por Clark *et al.* (1997), obtuvieron imágenes RMI de mango infestado por larvas de mosca de la fruta al momento de la cosecha y varios días después. Aristizabal (2006), también captó imágenes de la evolución durante varios días del daño interior producido en melocotón por larvas de la mosca del Mediterráneo *Ceratitis capitata* (Figura 10).



Figura 10. Imágenes RMI de daños por *Ceratitis capitata* en melocotón (Aristizábal, 2006).

Daños por hongos. Alteraciones en tejidos internos producidas por *Botrytis cinerea* en frambuesa roja, grosella negra y uva; *Botrytis cinerea*, *Colletotrichum acutatum* y *Phytophthora cactorum* en fresa; *P. infestans*, *Phoma foveata*, *Fusarium sulphureum* y *F. coeruleum* en patata y *Penicillium digitatum* en mandarina Fortuna y naranja Valencia; mostraron en todo los casos diferentes atributos en las imágenes RMI con relación a los tejidos sanos (Goodman, Williamson y Chudek, 1992; Goodman *et al.*, 1996; Clark *et al.*, 1997; Glidewel

et al., 1997; Galed *et al.*, 2004). También, Jagannathan, Govindaraju y Raghunathan (1995), utilizando imágenes RMI observaron en fruta de coco en estado rancio, la extensión del daño interno y la degradación debida a un crecimiento fúngico. Aristizábal (2006), visualizó en imágenes RMI las podredumbres interiores producidas por *Alternaria citri*, *Diplodia natalensis* y *Botrytis cinerea* en naranja Navel Barnfield con apariencia externa completamente sana (Figura 11).

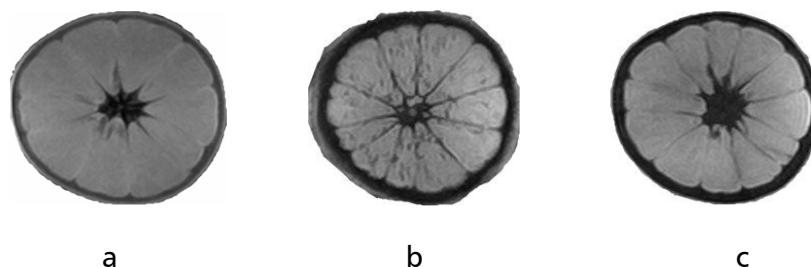


Figura 11. Imágenes RMI de daños internos en naranja producidos por los hongos: a. *Alternaria citri*, b. *Diplodia natalensis*, c. *Botrytis cinerea* (Aristizábal, 2006).

Magulladuras. En una fruta generalmente éstas son producidas por golpes durante su manipulación y traen como consecuencia la ruptura masiva de células y la redistribución del agua libre de los tejidos. Chen, McCarthy y Kauten (1989), visualizaron, mediante imágenes RMI, magulladuras internas en diferentes productos (manzana, melocotón, pera y cebolla). Maas *et al.* (1992) (1993), citados por Abbott *et al.* (1997), detectaron también con RMI magulladuras en fresa.

Zion, Chen y McCarthy (1995), desarrollaron un algoritmo para la detección de magulladuras en imágenes RMI

de manzana variedades Jonathan y Golden Delicious. McCarthy *et al.* (1995), en manzana magullada, siguieron los cambios presentados en la pulpa durante varios días. Posteriormente, Mattiuz, Biscegli y Durigan (2002), detectaron en guayaba daños mecánicos provocados por impacto, compresión y corte de la piel.

Recientemente, Thybo *et al.* (2004), utilizando imágenes RMI contrastadas en T_1 y T_2 detectaron en patata, defectos internos no visibles como magulladuras provocadas por golpes y manchas internas "spraing" causadas por un virus.

Semillas y hueso. Chen, McCarthy y Kauten (1989), evidenciaron con imágenes RMI semillas en ciruela y pepino, el hueso y la semilla en melocotón, y el hueso en aceituna. Zion *et al.* (1997), identificaron el hueso en aceitunas bajo movimiento utilizando RM. Kim *et al.* (1999), empleando un sensor en línea basado en imágenes RMI, detectaron y clasificaron cereza con hueso. Blasco, Moltó y Alamar (2002) y Moltó y Blasco (2003), ubicaron mediante el procesamiento de imágenes RMI semillas en mandarina Fortune. Hernández *et al.* (2005) utilizando una secuencia rápida de adquisición, obtuvieron, en condiciones dinámicas, imágenes RMI de naranja y limón. Estos autores desarrollaron un algoritmo que permite corregir los artefactos causados por el movimiento de la naranja para permitir la discriminación de las frutas que presentan semilla. Posteriormente, Hernández, Barreiro y Ruiz (2006) y Hernández *et al.* (2007), realizaron, bajo condiciones dinámicas y estáticas, la inspección y la detección automática de semillas en mandarina utilizando un espectrómetro RMI de alta resolución, empleando secuencias rápidas de adquisición y para el procesamiento digital de las imágenes técnicas especiales de segmentación basadas en histogramas de varianza en una y dos dimensiones. Los resultados obtenidos indican que es posible discriminar correctamente el 95% de la fruta con y sin semilla.

Estudios de desordenes fisiológicos. Se han realizado varios estudios de RM para monitorizar desordenes internos producidos en los productos agrícolas por condiciones adversas como temperaturas extremadamente bajas en campo, y por determinados tratamientos poscosecha

tales como almacenamiento en atmósferas modificadas, atmósferas controladas y tratamientos térmicos.

Daños por heladas en campo. En los cítricos éstos no se evidencian externamente. El principal síntoma de este daño es la pulpa seca, pudiendo perderse todo el jugo. En este tema son muy escasos los trabajos realizados con RM. Chen, McCarthy y Kauten (1989) detectaron con RMI en naranjas Washington Navel vesículas secas (sin jugo). Hernández *et al.* (2003), adquirieron y procesaron imágenes dinámicas de RMI para la identificación de naranjas con daños internos por heladas. Aunque los resultados fueron promisorios, no fue posible la detección del daño cuando este era leve. Recientemente, Gambhir *et al.* (2005), utilizando la piel y los gajos de naranjas Navel determinaron diferencias en el tiempo de relajación T_2 de la fruta congelada y de la fruta sin congelar. Estas diferencias podrían usarse, según los autores, para la detección de frutos con daño por heladas. Aristizabal (2006) obtuvo imágenes RMI de naranjas con daños leves y severos producidos por heladas en campo, pudiéndose visualizar en ellas los gajos resacos y las oquedades en la pulpa (Figura 12).

Corazón acuoso. Es un serio desorden fisiológico de la manzana que ocurre al final de la cosecha en fruta sobremadura y se manifiesta como una región acuosa y traslúcida entorno al corazón de la manzana. Wang y Wang (1989), usando imágenes RMI visualizaron, localizaron y determinaron el área de tejidos afectados en manzana Red Delicious. Posteriormente Clark *et*

al. (1997) observaron con RMI en manzana Fuji una disminución en el tiempo de relajación de los tejidos afectados. Marigheto y Hills (2005) encontraron que el cambio en la

densidad protónica de las regiones afectadas con corazón acuoso en manzana permite obtener un alto contraste en la imagen RMI, facilitando la detección en línea de este defecto.



Figura 12. Imágenes RMI con daños por heladas en naranjas. (Fuente: Aristizábal 2006)

Degradación acuosa. Es una fisiopatía de la pera debida a un rápido deterioro enzimático de la pulpa (excesivo ablandamiento) que ocurre durante el almacenamiento en atmósfera controlada con niveles altos de CO₂ y disminución del O₂. Este desorden interno se manifiesta por el desarrollo de cavidades, el pardeamiento y la ruptura de los tejidos de la corteza cercanos al corazón de la pera (Wang y Wang, 1989; Lammertyn *et al.*, 2003). Wang y Wang (1989), detectaron mediante imágenes RMI la presencia de este desorden en pera Bartlett para dos condiciones diferentes de almacenamiento con atmósfera controlada.

Posteriormente, Lammertyn *et al.* (2003a) y (2003b), evaluaron el desarrollo, durante varios meses de almacenamiento, de la degradación acuosa en pera variedad Conference usando RMI. Las imágenes RMI permitieron observar los tejidos pardos descoloridos y las cavidades en la

pulpa de la fruta, que no crecieron en el tiempo pero si aumentaron su contraste con relación a los tejidos sanos.

Pardeamiento interno. Ésta es una alteración fisiológica que produce cavidades, en forma de lentes de color pardo, en los tejidos de la corteza y el corazón de las frutas almacenadas en atmósferas controladas con alta concentración de CO₂. Stroshine (1999), estudió los tiempos de relajación T₂ en manzana 'Red Delicious' sana y con pardeamiento interno, encontrando que las pequeñas diferencias dificultan su rápida detección y separación en línea. Sin embargo, Keener Stroshine y Nyenhuis (1999) y recientemente, Chayaprasert y Stroshine (2005), para esta misma variedad de manzana, encontraron diferencias estadísticas que podrían ser usadas para separar las manzana sana de aquellas afectadas por este tipo de defecto, con un sistema de clasificación basado en RM

operando en línea. Clark y Burmeister (1999), siguieron durante 4 semanas mediante imágenes RMI el desarrollo del pardeamiento interno inducido en manzana Braeburn. Los autores afirman que este defecto fue visualizado en las imágenes a los 14 días de haberse iniciado el almacenamiento bajo atmósfera controlada con alta concentración de CO₂.

Gonzalez *et al.* (2001), también detectaron y siguieron el pardeamiento interno en manzana Fuji almacenada bajo dos condiciones diferentes de atmósfera controlada. Los autores demostraron que las imágenes RMI detectan y cuantifican el desorden tanto a baja como a alta concentración de CO₂. Hernández *et al.* (2007) recientemente, publicaron la detección en línea de este defecto en pera, usando RMI, discriminando exitosamente hasta el 96% de la fruta afectada. El mínimo valor de tejido afectado que se identificó en la fruta correspondió al 12%.

Daño por frío. El daño por frío es un desorden fisiológico en las membranas celulares cuando los tejidos de la fruta cosechada son expuestos a temperaturas bajas (<12°C), pero no de congelamiento, para prolongar su vida poscosecha (Clark y Forbes, 1994). Según Skog (1998), el diagnóstico es difícil y los síntomas del daño aparecen a mayores temperaturas pudiendo tomar varios días para su desarrollo y pueden no ser visibles externamente. Wang y Wang (1992), encontraron diferencias en la intensidad de los píxeles de las imágenes RMI de calabazas Zucchini sometidas a bajas temperaturas que produjeron daños por frío respecto a calabazas que no sufrieron este daño. Tanto las imágenes contrastadas en

T₁ como en T₂ permitieron detectar los cambios internos en la fruta afectada. Clark y Forbes (1994), siguieron el desarrollo de daño por frío de frutas de caqui durante un período de 7 semanas usando imágenes RMI. En la última semana, cuando las frutas se dejaron a temperatura ambiente, se observaron claramente los daños internos.

Sonego *et al.* (1995), visualizaron con imágenes RMI la harinosidad que manifiesta el daño por frío en nectarina como zonas oscuras correspondientes a tejidos con baja densidad protónica (cavidades de aire). Barreiro *et al.* (1999) y (2000) determinaron diferencias en los valores e histogramas de T₂ en manzana Top Red con harinosidad respecto a manzana sana, almacenadas durante 6 meses.

También, Clark y MacFall (1996) evaluaron el daño por frío en caqui almacenado en atmósfera modificada durante 5 semanas. Los autores concluyen que, aunque los estados iniciales del daño por frío no fueron posibles de observar ni por inspección visual ni por RMI, los tiempos de relajación estuvieron muy influenciados por las condiciones de almacenamiento. Recientemente, Aristizabal (2006), visualizó con RMI en melocotón, diferencias en la textura de los píxeles del mesocarpio de frutas sanas y afectadas por daño por frío que permitieron su detección automática (Figura 13).

Daño por congelamiento. El daño por congelamiento ocurre cuando cristales de hielo se forman en el interior de los tejidos de un producto almacenado sometido durante cierto tiempo a temperaturas por debajo del punto de congelamiento. El síntoma más común

de este daño en frutas son áreas traslucidas en la piel y los tejidos afectados pueden perder rigidez (Wang, 1997). McCarthy *et al.* (1989) citados por Schrader *et al.* (1992), obtuvieron imá-

genes RMI de melocotón durante su proceso de congelamiento. Duce (1992), citado por Clark *et al.* (1997), investigó la diferencia que presentan las imágenes RMI de calabacín fresco y congelado.

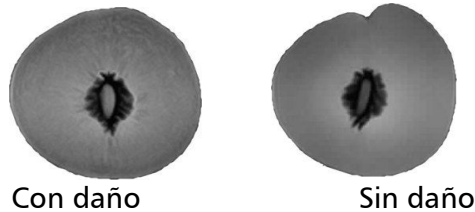


Figura 13. Imágenes RMI del daño por frío en melocotón (Aristizábal 2006).

Gamble (1994), utilizó imágenes RMI contrastadas en T_1 y en T_2 para hacer mapas de los cambios en la distribución de agua y azúcares en tejidos de fruta de arándano, sometida a congelamiento y descongelamiento.

Kerr *et al.* (1997) observaron mediante imágenes RMI la formación de hielo y la dinámica del congelamiento de frutas de kiwi, pudiendo distinguir tejidos dañados por el congelamiento y tejidos sin daño debido a las diferencias presentadas entre estos en T_2 . En un trabajo reciente, Gambhir *et al.* (2005) estudiaron el efecto

que tiene la exposición de la pulpa y la epidermis de naranja variedad Navel a diferentes temperaturas de congelamiento, en el tiempo T_2 de estas estructuras. Los autores encontraron que la diferencia en el T_2 de la pulpa de las frutas congeladas respecto a la pulpa de las frutas sin congelar, podría usarse para detectar y separar, con un equipo de bajo campo magnético, las naranjas deterioradas por heladas. Aristizabal (2006), observó también la cristalización del agua interior (oscurecimiento de la pulpa) en frutos de melocotón almacenados a -10°C (Figura 14).

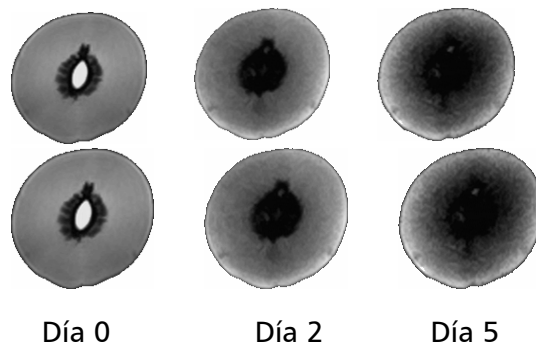


Figura 17. Imágenes RMI del daño por congelamiento en melocotón. (Aristizábal 2006).

Otros estudios en procesamiento poscosecha. Hulbert *Litchfield y Schmidt* (1995), con imágenes RMI contrastadas en T_1 obtuvieron mapas de temperatura de zanahoria cocida entre 19 y 83°C. Esta aplicación podría ser útil, según los autores, para la determinación de propiedades térmicas de alimentos y para la evaluación de modelos para el procesamiento térmico. Posteriores trabajos en esta línea ha sido realizados en patatas y otros vegetales (Litchfield y Schmidt, 1998). Thybo *et al.* (2003), determinaron alta correlación entre parámetros de las curvas de relajación en T_1 de patata de diferentes variedades con el contenido de materia seca de las mismas. Schrader, Litchfield y Schmidt (1992), Hills (1998); Ruan y Chen (1998) e Ishida *et al.* (2000), recogen varias aplicaciones de RM y RMI en procesos de secado, rehidratación y cocción de semillas y granos como trigo, maíz, soya, y frutas como café, uva y mango; en los que estudiaron la difusión y flujo de humedad y la distribución de agua, aceite, azúcares y otros compuestos como sodio, a través de las diferentes estructuras y tejidos de estos materiales biológicos.

CONCLUSIONES

Aunque son numerosas las investigaciones publicadas en la literatura científica sobre la aplicación de la tecnología de RM para estudiar la calidad interna de las frutas, son relativamente pocos los trabajos orientados hacia el desarrollo de sistemas que utilicen magnetos de baja intensidad de campo, y es en esta línea de investigación en la que se podrían obtener equipos de RM, más económicos.

Se pone de manifiesto la gran utilidad del análisis de imágenes por resonancia magnética RMI para la realización de estudios no destructivos sobre los cambios de la estructura interna de productos biológicos, cuando se requiera someterlos a diferentes condiciones de almacenamiento, o cuando se requiera investigar el efecto interno que puede producir en las frutas y vegetales la aplicación de diferentes tratamientos poscosecha o la influencia en el producto de factores fisiológicos o ambientales en el campo.

Las aplicaciones de ésta tecnología pueden servir también a otros investigadores como biólogos, fisiólogos vegetales, fitopatólogos y entomólogos, entre otros, para realizar estudios en vivo, de manera no invasiva y como un complemento a otros métodos convencionales de análisis de muestras.

La tecnología de RMI y el procesamiento de imagen aplicados en la inspección de frutas podrían utilizarse, en el futuro, para el control de calidad interno no destructivo, evitando la salida y exportación de producto deteriorado con este tipo de daños.

BIBLIOGRAFIA

- Abbott, J.A., R. Lu, B.L. Upchurch and R.L. Strochine. 1997. Technologies for nondestructive quality evaluation of fruits and vegetables. Hort. Rev. 20:1-120.
- Ablett, S. 1992. Overview of NMR applications in food science. Trends in Food Sci. and Technol. 3(11):246-248.

- Andaur, J.E., A.R. Guesalaga, E.E. Agosin, M.W. Guarini and P. Irrarazaval, 2004. Magnetic resonance imaging for non-destructive analysis of wine grapes. *J. Agr. Food Chem.* 52(2):165-170.
- Aristizabal Torres, I. D. 2006. Estudio, aplicación y propuesta de automatización del procesamiento de imágenes por resonancia magnética para la evaluación y detección de defectos internos de calidad en cítricos y melocotones. Tesis Doctoral, Departamento de Mecanización y Tecnología Agraria, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia-España, 300 p.
- Barreiro, P., J. Ruiz-Cabello, M.E. Fernández-Valle, C. Ortiz, and M. Ruiz-Altisent. 1999. Mealiness assessment in apples using MRI techniques. *Magn. Reson. Imaging* 17(2):275-281.
- Barreiro, P., C. Ortiz, M. Ruiz-Altisent, J. Ruiz-Cabello, M. E. Fernández-Valle, I. Recasens, and M. Asensio. 2000. Mealiness assessment in apples and peaches using MRI techniques. *Magn. Reson. Imaging* 18(9):1175-1181.
- Barreiro, P., C. Zheng, D.W. Sun, N. Hernandez, J.M. Pérez, and J. Ruiz. 2007. Nondestructive seed detection in mandarins: Comparison of automatic threshold methods in flash and compira MRIs. *Postharvest Biol. Technol.* Article in press.
- Bellon, V., S.I. Cho, G.W. Krutz, and A. Davenel. 1992. Ripeness sensor development based on nuclear magnetic resonance. *Amer. Soc. Agr. Eng.* 33(4):45-48.
- Blasco, J., E. Moltó and M.C. Alamar. 2002. Detection of seeds in mandarins using magnetic resonance imaging. p. 185-187. En: *Memories of the 6th International Conference on Applications of Magnetic Resonance in Food Science.* INA P-G, Paris, France.
- Budiman, M., R.L. Stroshine, O.H. Campanella, P. Cornillon and S.S. Nielsen, 2001. Modeling of low-field proton magnetic resonance T_2 decay curves for the purpose of moisture and fat content measurement of cheese analog. ASAE Annual Meeting, Sacramento, USA. St. Joseph, MI. (Paper No. 01-6127).
- Butz, P., C. Hoffmann and B. Tauscher. 2005. Recent developments in non-invasive techniques for fresh fruit and vegetable internal quality analysis. *J. Food Sci.* 70(9):131-141.
- Callaghan, P.T., J.C. Clark and L.C. Forde. 1994. Use of static and dynamic NMR microscopy to investigate the origins of contrast in images of biological tissues. *Biophys. Chem.* 50(1-2): 225-235.
- Castiñeira, M. 1989. La RMN de pulsos en industrias agroalimentarias. Parte II. Aplicaciones. *Rev. Agroquím. Tecnol. Alim.* 29(4):449-468.
- Chayaprasert, W. and Stroshine. 2005. Rapid sensing of internal browning in whole apples using a low-cost, low-field proton magnetic resonance sensor. *Postharvest Biol. Technol.* 36(3):291-301.
- Chen, P., M.J. McCarthy and R. Kauten. 1989. NMR for internal quality evaluation of fruits and vegetables. *Trans. ASAE.* 32(5):1747-1753.

- Chen, P. and Z. Sun. 1991. A review of nondestructive methods for quality evaluation and sorting of agricultural products. *J. Agr. Eng. Res.* 49: 85-98.
- Chen, P., M.J. McCarthy, R. Kauten, Y. Saring and S. Han. 1993. Maturity evaluation of avocados by NMR methods. *J. Agr. Eng. Res.* 55(3):177-187.
- Chen, Y.R., K. Chao and M.S. Kim. 2002. Machine vision technology for agricultural applications. *Comput. Electron. Agr.* Vol. 36; p. 173-191.
- Cho, S.I., W.K. Wai, G.W. Krutz and R.L. Stroshine. 1991. Prototipe of non-destructive fruit sweetness sensor. pp. 1-6. In: ASAE Intl. Winter Mtg. Chicago, Illinois-USA. St. Joseph, MI.
- Cho, S.I., R.L. Stroshine, I.C. Baianu and G.W. Krutz. 1993. Nondestructive sugar content measurements of intact fruit using spin-spin relaxation time (T_2) measurements by pulsed ^1H magnetic resonance. *Trans. ASAE.* 36:(6):1217-1221.
- Clark, C.J. and S.K. Forbes. 1994. Nuclear magnetic resonance imaging of the development of chilling injury in 'Fuyu' permison (*Diospyros kaki*). *N.Z. J. Crop Hort. Sci.* 22(2):209-215.
- Clark, C.J. and J.S. MacFall. 1996. Magnetic resonance imaging of persimmon fruit (*Diospyros kaki*) during storage at low temperature and under modified atmosphere. *Postharvest Biol. Technol.* 9(1): 97-108.
- Clark, C.J., P.D. Hockings, D.C. Joyce, and R.A. Mazucco. 1997. Application of magnetic resonance imaging to pre and post-harvest studies of fruits and vegetables. *Postharvest Biol. Technol.* 11(1):1-21.
- Clark, C.J. and D.M. Burmeister. 1999. Magnetic resonance imaging of browning development in 'Braeburn' apple during contolled-atmosphere storage under high CO_2 . *Hort. Sci.* 34(6):915-919.
- Clark, C.J., A.C. Richardson and K.B. Marsh. 1999. Quantitative magnetic resonance imaging of Satsuma mandarin fruit during growth. *Hort. Sci.* 34(6): 1071-1075.
- Clark, C.J. and J. S. MacFall. 2003. Quantitative magnetic resonance imaging of 'Fuyu' persimmon fruit during development and ripening. *Magn. Reson. Imaging* 21(6): 679-685.
- Desgrez, A., J. Bittoun and I. Idy-Peretti. 1991. Cuadernos de IRM. Las bases físicas de la IRM. Masson, Barcelona, España. 40 p.
- Duce, S. L., T.A. Carpenter and L.D. Hall. 1992. Nuclear magnetic resonance imaging of fresh and frozen courgettes. *J. Food Eng.* 16(3):165-172.
- Faust, M., P.C. Wang and J. Maas. 1997. The use of magnetic resonance imaging in plant science. *Hort. Rev.* 20:225-266.
- Fullerton, G.D. 1982. Basic concepts for NMR imaging. *Magn. Reson. Imaging* 1:39-53.
- Galed, G., M.E. Fernández, A. Martínez and A. Heras. 2004. Application of MRI

- to monitor the process of ripening and decay in citrus treated with chitosan solutions. En: Magn. Reson. Imaging 22(1):127-137.
- Gambhir, P. N., Y.J. Choi, D.C. Slaughter, J.F. Thompson and M.J. McCarthy. 2005. Proton spin-spin relaxation time of peel and flesh of navel orange varieties exposed to freezing temperature. J. Sci. Food Agric. 85(14):2482-2486.
- Gamble, G.R. 1994. Non-invasive determination of freezing effects in blueberry fruit tissue by Magnetic Resonance Imaging. J. Food Sci. 59: 571-610.
- Ghosh, P.K., D.S. Jayas, L.H. Gruwel and D.G. White. 2006. Magnetic resonance image analysis to explain moisture movement during wheat drying. Trans. ASABE 49(4):1181-11191.
- Ghosh, P.K., D.S. Jayas, L.H. Gruwel and D.G. White. 2006. Magnetic resonance imaging studies to determine the moisture removal patterns in wheat during drying. Can. Biosystems Eng. 48:713-718.
- Glidewell, M., B. Williamson, B.A. Goodman, J.A. Chudek and G. Hunter. 1997. An NMR microscopic study of grape (*Vitis vinifera* L.). Protoplasma 198: 27-35.
- Glidewell, M. 2006. NMR imaging of developing barley grains. J. Cereal Sci. 43(1):70-78.
- Gonzalez, J.J., R.C. Valle, S. Bobroff, W.V. Biasi, E.J. Mitcham and M.J. McCarthy. 2001. Detection and monitoring of internal browning development in 'Fuji' apples using MRI. Postharvest Biol. Technol. 22(2): 179-188.
- Goñi, O., M. Muñoz, J. Ruiz-Cabello, M. Escibano and C. Merodio. 2007. Changes in water status of cherimoya fruit during ripening. Postharvest Biol. Technol. 45(1): 147-150.
- Goodman, B.A., B. Williamson and J.A. Chudek. 1992. Non-invasive observation of the development of fungal infection in fruit. Protoplasma. 166:107-109.
- Goodman, B.A., B. Williamson and J.A. Chudek. 1993. Identification of the distribution of sugar in grapes using chemical shift selective NMR microscopy. Magn. Reson. Imaging 11(7):1039-1041.
- Goodman, B.A., B. Williamson, E.J. Simpson, J.A. Chudek, G. Hunter and A. Prior. 1996. High field NMR microscopic imaging of cultivated strawberry fruit. Magn. Reson. Imaging 14(2): 187-196.
- Habibi, Y., L. Heux, M. Mahrouz and M.R. Vignon. 2007. Morphological and structural study of seed pericarp of *Opuntia ficus indica* prickly pear fruits. Carbohydr. Polym. Article in press.
- Hernández, N., P. Barreiro, M. Ruiz-Altisent, J. Ruiz, M.E. Fernández X., Gimeno y S. Aguilar. 2003. Viabilidad de la técnica de resonancia magnética nuclear para la determinación en línea de calidad interna de frutas. En: Memorias II Congreso Nacional de Agroingeniería. Universidad de Córdoba, España.
- Hernández, N., P. Barreiro, M. Ruiz-Altisent, J. Ruiz, M.E. Fernández X.,

- Gimeno y S. Aguilar. 2005. Detection of seeds in citrus using MRI under motion conditions and improvement with motion correction. *Concepts Magn. Reson. Part B: Magn. Reson. Eng.* 26B(1):81-92.
- Hernández, N., P. Barreiro and J. Ruiz-Cabello. 2006. On-line Identification of seeds in mandarins with magnetic resonance imaging. *Biosystems Eng.* 95(4):529–536.
- Hernández, N., B.P. Hills, P. Barreiro and N. Marigheto. 2007. An NMR study on internal browning in pears. *Postharvest Biol. Technol.* 4(3):260–270.
- Hickey, H., B. MacMillan, B. Newling, R. Manoharan, P.V. Eijck and B. Balcom. 2006. Magnetic resonance relaxation measurements to determine oil and water content in fried foods. *Food Res. Intl.* 39(5):612-618.
- Hills, B. 1998. *Magnetic resonance imaging in food science.* Wiley, New York. 352 p.
- Hills, B. and C.J. Clark. 2003. Quality assessment of horticultural products by NMR. *Annu. Rpts. NMR Spectroscopy.* 50: 75-120.
- Hinshaw, W.S., P.A. Bottomley, G.N. Holland. 1977. Radiographic thin-section image of the human wrist by nuclear magnetic resonance. *Nature.* 270:722-723.
- Hornak, J.P. *The basics of MRI.* Software License ©, 1996-2002. En: <http://www.cis.rit.edu/htbookis/mri/>. Consulta: Dic. 2006.
- Hulbert, G.J., J.B. Litchfield and S.J. Schmidt. 1995. Temperature mapping in carrot using T₁ weighted magnetic resonance imaging. *J. Food Sci.* 60(4): 780-785.
- Ishida, N., M. Koizumi and H. Kano. 1994. Ontogenetic changes in water in cherry tomato fruits measured by nuclear magnetic resonance imaging. *Scientia Hort.* 57:335-346.
- Ishida, N., H. Ogawa and H. Kano. 1995. Diffusion of cell-associated water in ripening barley seeds. *Magn. Reson. Imaging.* 13(5):745-751.
- Ishida, N., H. Ogawa, M. Koizumi and H. Kano. 1997. Ontogenetic changes of the water status and accumulated soluble compounds in growing cherry fruits studied by NMR imaging. *Magn. Reson. Chem.* 35(13):22-28.
- Ishida, N., M. Koizumi, H. Ogawa and H. Kano. 2000. Micro-MRI in food science. *Journal of the Japn. Soc. Food Sci. Technol.* 47(6):407-423.
- Ishida, N., M. Koizumi and H. Kano. 2000. The NMR Microscope: a unique and promising tool for plant science. *Ann. Bot.* 86(2):259-278.
- Jagannathan, N.R., V. Govindaraju and P. Raghunathan. 1995. *In vivo* magnetic resonance study of the histochemistry of coconut (*Cocos nucifera*). *Magn. Reson. Imaging.* 13(6): 885-892.
- Kastler, B. Vettet, D. and Gangi, A. 1997. *Principios de RMN: manual de autoaprendizaje.* Masson, Barcelona, España. 176 p.

- Keener, K.M., R.L. Stroshine and J.A. Nyenhuis. 1999. Evaluation of low field (5.40-Mhz) proton magnetic resonance measurements of D_w and T_2 as methods of nondestructive quality evaluation of apples. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 124(3): 289-295.
- Kerr, W.L., C.J. Clark, M.J. McCarthy and J.S. De Ropp. 1997. Freezing effects in fruit tissue of kiwifruit observed by magnetic resonance imaging. *Scientia Hort.* 69(3):169-179.
- Kikuchi, K., M. Koizumi, N. Ishida and H. Kano. 2006. Water uptake by dry beans observed by micro-magnetic resonance imaging. *Ann. Bot.* 98(3):545-553.
- Kim, S.M., M. J. McCarthy and P. Chen. 1994. Feasibility of tomato quality grading and sorting using magnetic resonance. *Amer. Soci. Agric. Eng. Paper Conference*, No. 94-651994-6519. Atlanta, GA.
- Kim, S.M., M.J. McCarthy and P. Chen. 1998. Development of a real time on line magnetic resonance sensor for fruit sorting. *En: Memories of AGENG Oslo 98 International Conference on Agricultural Engineering*. CIGR, Oslo, Brussels. Paper 98-F-017.
- Kim, S.M., P. Chen, M.J. McCarthy and B. Zion, 1999. Fruit internal quality evaluation using on line nuclear magnetic resonance sensor. *J. Agr. Eng. Res.* 74(3): 293-301.
- Köckenberger, W. 2001. Nuclear magnetic resonance micro-imaging in the investigation of plant cell metabolism. *J. Exp. Bot.* 52(356): 641-652.
- Koizumi M., S. Naito, T. Haishi, S. Utsuzawa, N. Ishida and H. Kano. 2006. Thawing of frozen vegetables observed by a small dedicated MRI for food research. *Magn. Reson. Imaging.* 24(8):111-1119.
- Kondo, N., M. Monta, V.K. Chong and K. Namba. 2004. Defect detection on eggplant fruit by NIR-color TV camera. *En: Memories of the International Conference AGENG-2004: Engineering The Future*. University of Leuven, Leuven, Belgium.
- Kuchenbrod, E., A. Haase, R. Benkert, H. Schneider and U. Zimmermann. 1995. Quantitative NMR microscopy on intact plants. *Magn. Reson. Imaging.* 13(3):447-455.
- Lammertyn, J., T. Dresselaers, P. Van Hecke, P. Jancsó, M. Wevers and B.M. Nicolai. 2003. Analysis of the time course of core breakdown in 'Conference' pears by means of MRI and X-ray CT. *Postharvest Biol. Technol.* 29(1):19-28.
- Lammertyn, J., T. Dresselaers, P. Van Hecke, P. Jancsó, M. Wevers and B. Nicolai. 2003. MRI and X-ray CT study of spatial distribution of core breakdown in 'Conference' pears. *Magn. Reson. Imaging.* 21(7):805-815.
- Letal, J., D. Jirak, L. Suderlova and M. Hajek. 2003. MRI texture analysis of MR images of apples during ripening and storage. *Lebensmittel-Wissenschaft Und -Technol.* 36(7):719-727.
- Li, Y., W.K. Wai, R.L. Stroshine and G.W. Krutz. 1992. Nondestructive sugar content sensing of intact fruit

using low field and low resolution pulsed magnetic resonance. Memories of the ASAE Intl. Winter Mtg. Nashville, Tennessee-USA. St. Joseph, MI.

Litchfield, J.B. and S.J. Schmidt. 1998. Mapping food temperature with magnetic resonance imaging. Department of Agriculture, University of Illinois at Urbana-Champaign, Cooperative State Research, Education, and Extension Service, Illinois.

Marigheto, N. and B. Hills. 2005. MRI as a potencial on-line sensor of apple quality. En: Memories of FRUTIC 05, Information and Technology for Sustainable Fruit and Vegetable Production. Fruit International Conference, Montpellier, France.

Mattiuz, B.H., C.I. Biscegli and J.F. Durigan. 2002. Aplicações da tomografia de ressonância magnética nuclear como método não-destrutivo para avaliar os efeitos de injúrias mecânicas em goiabas 'Paluma' e 'Pedro sato'. Rev. Bras Fruticultura, Jaboticabal. 24(3):641-643.

McCarthy, M.J. 1994. Magnetic resonance imaging in foods. Chapman and Hall, New York, USA. 120 p.

McCarthy, M.J., B. Zion, P. Chen, S. Ablett, A.H. Darke and P.J. Lillford. 1995. Diamagnetic susceptibility change in apple tissue after bruising. J. Sci. Food Agric. 67(1):13-20.

Moltó, E. y J. Blasco. 2003. Detección automática y no destructiva de semillas de mandarinas mediante resonancia magnética. Levante Agrícola. Especial Postosecha. (366): 229-235.

Muñoz-Barrio, M.T. and C. Merodio. 1995. Magnetic resonance imaging: a non-destructive approach to ripening state in fruits. Acta Hort. 463:385-390.

Ni, Q.X. and T.M. Eads. 1993. Analysis by proton NMR of changes in liquid-phase and solid-phase components during ripening of banana. J. Agric. Food. Chem. 41(7):1035-1040.

Ray, J.A., R.L. Stroshine, G.W. Krutz and W. K. Wai. 1993. Quality sorting of sweet cherries using magnetic resonance. En: Memories of the ASAE International Summer Meeting. St. Joseph, MI: Spokane, Washington-USA.

Ruan, R.R. and P.L. Chen. 1998. Water in food and biological materials, a nuclear magnetic resonance approach Technomic Publishing, Lancaster, Pennsylvania, USA. 298 p.

Saltveit, M.E. 1991. Determining tomato fruit maturity with non-destructive *in vivo* nuclear magnetic resonante imaging. Postharvest Biol. Technol. 1(1):153-159.

Scheenen, T., D. Van Dusschoten, A. De Pater and H. Van As. 2000. Quantification of water transport in plants with NMR imaging. J. Exp. Bot. 51(351):1751-1759.

Scheenen, T., A. Heemskerk, A. De Pater, F. Vergeldt and H. Van As. 2002. Functional imaging of plants: A nuclear magnetic resonance study of a cucumber plant. Biophys. J. 82(1):481-492.

- Schrader, G.W., J.B. Litchfield and S.J. Schmidt. 1992. Magnetic resonance imaging applications in the food industry. *Food Technol.* 47(12):77-83.
- Sequi, P., M.T. Dell'Abate and M. Valentin. 2007. Identification of cherry tomatoes growth origin by means of magnetic resonance imaging. *J. Sci. Food Agric.* 87(1): 127–132.
- Skog, L.J. 1998. Chilling injury of horticultural crops. Ministry of Agriculture and Food, Factsheet, Ontario, Canada. En: www.gov.on.ca/OMAFRA/english/cropsfacts/98-021.htm. Consulta: Dic. 2006.
- Sonego, L., R. Ben-Arie, J. Raynal, and J.C. Pech. 1995. Biochemical and physical evaluation of textural characteristics of nectarines exhibiting woolly breakdown: NMR imaging, X-ray computed tomography and pectin composition. *Postharvest Biol. Technol.* 5(3):187-198.
- Song, H.P., J.B. Litchfield and H.D. Morris. 1992. Three-dimensional microscopic MRI of maize kernels during drying. *J. Agr. Eng. Res.* 53(1):51-69.
- Stroshine, R.L., S.I. Cho, W. Wai, G.W. Krutz and I.C. Baianu. 1991. Magnetic resonance sensing of fruit firmness and ripeness. p. 1-13. In: ASAE Intl. Winter Mtg. Chicago, Illinois-USA. St. Joseph, MI. Paper No. 91-6565.
- Stroshine, R.L., W.K. Wai, K.M. Keener, and G.W. Krutz. 1994. New developments in fruit ripeness sensing using magnetic resonance. In: ASAE Intl. Winter Mtg. Chicago, Illinois-USA. St. Joseph, MI. Paper No. 94-6539.
- Stroshine, R.L. 1999. Non destructive measurement of fruit, vegetable, and food quality. In: Dennis, C.S. (ed.). 1998-99 Research Activities Report. Purdue University. Agricultural and Biological Engineering, West Lafayette.
- Tavares, L.A. and A.G. Ferreira. 2006. Análises quali e quantitativa de cafés comerciais via ressonância magnética nuclear. *Quim. Nova.* 29(5):911-915.
- Thybo, A.K., H.J. Andersen, A.H. Karlsson, S. Donstrup and H.J. Stodkilde. 2003. Low-field NMR relaxation and NMR-imaging as tools in differentiation between potato sample and determination of dry matter content in potatoes. *Lebensmittel-Wissenschaft und Technol.* 36(3):315-322.
- Thybo, A.K., S.N. Jespersen, P.E. Lærke, and H.J. Stødkilde. 2004. Nondestructive detection of internal bruise and spraing disease symptoms in potatoes using magnetic resonance imaging. *Magn. Reson. Imaging.* 22(9):1311-1317.
- Tu, S., Y. Choi, M. McCarthy, and K. McCarthy. 2007. Tomato quality evaluation by peak force and NMR spin-spin relaxation time. *Postharvest Biol. Technol.* 44(2):157–164.
- Unay, D. and B. Gosselin. 2004. A quality sorting method for 'Jonagold' apples. pp. 1-8. En: Memories of the International Conference Agricultural Engineering, AGENG-2004: Engineering the Future. University of Leuven, AGENG International Conference. Leuven, Belgium.

- Vozzo, J.A., R. Patel, and A. Terrel. 1999. Determinación de la viabilidad de las semillas de *Juglans nigra* a través de imágenes obtenidas usando tomografía computarizada y resonancia magnética. p. 187-189. En: Memorias del II Simposio sobre avances en la producción de semillas forestales en América Latina. CATIE, Santo Domingo, República Dominicana; Turrialba, Costa Rica.
- Wai, W.K., Y. Li, R.L. Stroshine and G.W. Krutz. 1993. Sugar content estimation in fresh vegetables and fruits using an 1H-MR sensor. En: Memories of the 4th International Symposium on Fruit, Nut, and Vegetable Production Engineering. Valencia, España.
- Wai, W.K., R.L. Stroshine and G.W. Krutz. 1995. A modified Hahn echo pulse sequence for proton magnetic resonance (1H-MR) measurement of percent soluble solids of fruits. Trans. ASAE 38:849-855.
- Wang, C.Y. and P.C. Wang. 1989. Nondestructive detection of core breakdown in 'Bartlett' pears with nuclear magnetic resonance imaging. Hortsc. 24(1):106-109.
- Wang, C.Y. and P.C. Wang. 1992. Differences in nuclear magnetic resonance images between chilled and non-chilled zucchini squash. Environ. Exptl. Bot. 32(3):213-219.
- Wang, C.Y. 1997. Chilling and freezing injury. Produce Quality and Safety Laboratory, USDA, ARS. Henry A. Wallace Beltsville Agricultural Research Center, Beltsville, MD.
- Williamson, B., B.A. Goodman and J.A. Chudek. 1993. The structure of mature gooseberry (*Ribes grossularia*) fruits revealed non-invasively by NMR microscopy. Micron. 24(4):377-383.
- Yantarasi, T., J. Sornsrivichai and P. Chen. 1996. X-ray and NMR for nondestructive internal quality evaluation of durian and mangosteen fruits. Acta Hort. (ISHS) 464:97-102.
- Zhou, R. and Y. Li. 2007. Texture analysis of MR image for predicting the firmness of Huanghua pears (*Pyrus pyrifolia* Nakai, cv. Huanghua) during storage using an artificial neural network. Magn. Reson. Imaging. Vol. 25(5):727-732.
- Zion, B., P. Chen and J. McCarthy. 1995. Non destructive quality evaluation of fresh prunes by NMR spectroscopy. J. Sci. Food Agr. 67:423-429.
- Zion, B., S.M. Kim, M.J. McCarthy and P. Chen. 1997. Detection of pit in olives under motion by nuclear magnetic resonance. J. Sci. Food Agr. 75:496-502.