

# Modelo para la determinación de los parámetros reológicos de un aderezo saludable considerando la influencia de la temperatura

**Susana N. Santana, Agustina M.E. Zangrando, Alejandro Hayes, Rosa Breier, Ricardo R. Mateucci**

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Buenos Aires, Departamento de Ingeniería Química, Grupo de Investigación y Desarrollo en Tecnologías Químicas Aplicadas, IDETQA, Medrano 951, (C1179AAQ), Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina

*agusmez@yahoo.com.ar*

*Recibido el 29 de julio de 2014, aprobado el 29 de agosto de 2014*

## Resumen

El propósito de este trabajo es evaluar la influencia de la temperatura en los parámetros reológicos de un aderezo para ensaladas, saludable y con bajo contenido graso. Así podrá predecirse el comportamiento del producto durante su procesamiento a escala industrial. Para la caracterización reológica de las emulsiones se ha utilizado un viscosímetro rotacional y un baño termostático, midiendo las propiedades de las muestras a diferentes temperaturas entre 5 y 45 °C.

Las muestras de aderezo mostraron un comportamiento de flujo No Newtoniano, pseudoplástico y tixotrópico, ajustándose a la Ley de Potencia (ecuación de Ostwald-de Waele). El método matemático utilizado para el cálculo de los coeficientes que relacionan dichos índices con la temperatura se basa en un modelo de regresión polinomial. Ha resultado satisfactorio el ajuste del modelo con los resultados experimentales obtenidos.

**PALABRAS CLAVE:** REOLOGÍA DE ADEREZOS – TEMPERATURA – REGRESIÓN POLINOMIAL

## Abstract

The aim of this work is to study the temperature influence on rheological parameters of a healthy and low fat content salad dressing. Thus, the behavior of the product under industrial scale processing could be predicted. For the rheological characterization of emulsions a rotational viscometer and a thermostatic bath were used and the samples properties at different temperatures, ranging from 5 to 45 °C, were measured.

The dressing samples showed a non Newtonian, pseudoplastic and thixotropic behavior, which could be properly described by the Power Law (Ostwald-de Waele equation). Mathematical processing applied to evaluate the influence of temperature on coefficients is based in a polynomial regression model. The experimental data were satisfactorily adjusted by this model.

**KEYWORDS:** DRESSING RHEOLOGY – TEMPERATURE – POLYNOMIAL REGRESSION

## Introducción

El conocimiento de las propiedades reológicas es de relevante importancia en la industria alimenticia. La caracterización de sistemas tan complejos como los alimentos es crítico para optimizar el desarrollo de un producto y su metodología de proceso, además de asegurar la calidad del producto final. El comportamiento del flujo debe ser determinado con mucha precisión, para poder así predecir qué tipo de equipos deben intervenir en el procesamiento del alimento a escala industrial.

Asimismo, la formulación del aderezo objeto de este estudio, persiguió el propósito de ofrecer un alimento con alto contenido de fibra, diferente a los que actualmente se utilizan para vehicular este nutriente, dado que la mayoría de los productos industrializados que contienen inulina, pertenecen al grupo de cereales y legumbres y al de leches, yogures y quesos. Por consiguiente, la población que no consume lácteos, ni alimentos a base de cereales, no encuentra hoy en el mercado productos adicionados con esta fibra dietética. El proyecto pretende ofrecer también un producto adicionado con ácido graso linolénico aportado por el aceite de canola, que debido a sus características organolépticas, por lo general, no es bien aceptado por los usuarios cuando han de consumirlo como tal, perdiéndose sus beneficios para la salud.

Es en ese contexto, que se ha estudiado la dependencia del índice de consistencia y del índice del comportamiento del aderezo, sometiendo a numerosas muestras a temperaturas comprendidas en un rango de 5 – 45 °C. El rango fue seleccionado en función a las temperaturas locales posibles en las que se puede encontrar un aderezo en una góndola de supermercado (desde un día de invierno de 5 °C, hasta un día de extremo calor a 45 °C). Con los resultados obtenidos, se ha modelizado en base a regresiones polinomiales, y los algoritmos se implementaron utilizando el software Matlab, con el fin de hallar correlaciones adecuadas que permitan caracterizar al fluido en función a la temperatura. Es menester aclarar que los resultados obtenidos modelizan específicamente este producto, no obstante en (RAO, M.A. y PALOMINO, N.O., (1974); GARCIA, R. et al. (1974); OLIVEIRA, K. H. et al., 2008) se puede encontrar que para una gran cantidad de productos como helados y purés de frutas

tropicales el modelo utilizado fue el de la Ley de la Potencia ya que es el que presenta un mayor grado de ajuste, como el que aquí se ha obtenido, que muestra un  $R^2 = 0,989$ .

## Diseño Experimental

El alimento funcional estudiado fue desarrollado por los autores responsables de este trabajo. La evolución de su formulación y los análisis reológicos, sensoriales y microbiológicos pueden ser consultados en trabajos anteriores (ZANGRANDO, A. et al., 2009; CAIRO, F. et al. 2011; WHELAN, M.R. et al., 2011; MATEUCCI, R., 2012 y BORDA, M., 2011). La composición porcentual de la mezcla óptima seleccionada como aderezo se presenta en la Tabla 1. La misma se realiza a temperatura ambiente, bajo condiciones estériles en Campana de Flujo Laminar Horizontal Filtrar- Microfilter modelo FHP/1e, sanitizando previamente los elementos a utilizar y el área de producción. Los componentes se pesan en balanza analítica al 0,01 g. y la agitación se realiza en forma estandarizada (tiempo y revoluciones).

Muestra seleccionada	%p/p
Almidón preparado	48,35
Goma Xántica	0,27
Huevo hidratado (Yema, clara y agua)	29,37
Componentes secos (Sal, azúcar e inulina)	5,93
Aceite de Maíz	4,56
Aceite de Canola	4,56
Mostaza en polvo	0,23
Jugo de Limón	6,39
Ajo en polvo	0,10
Tomillo en polvo	0,10
Coriandro en polvo	0,10
betacaroteno	0,0045
Total	100

**Tabla 1. Composición de la muestra seleccionada**

Para la caracterización reológica se utilizó un viscosímetro rotacional (Brookfield DVII-RVT; Brookfield Engineering Laboratories, Inc., Middleboro, EE.UU.) utilizando el adaptador Small Sampler con las agujas SC4-21, y SC4-27. La celda de la muestra se colocó dentro de una camisa de agua conectada (Cámara portamuestras SC4-27) a un baño termostático (TC-502 Brookfield) permitiendo determinar la viscosi-

dad a diferentes temperaturas (5°C – 10°C – 15°C – 20°C – 25°C – 30°C – 35°C – 40°C – 45°C).

Las mediciones, recogidas mediante el software Wingather Data 1, se realizaron a varias velocidades de rotación (rango 0,01 a 200 rpm) correspondientes a porcentajes de torque de 10 a 100. Todas las determinaciones se hicieron por duplicado. Posteriormente se grafican los esfuerzos de corte en función a las velocidades de deformación inicialmente crecientes (Ver Fig.1, curva AB) y luego decrecientes (Ver Fig.1, curva BC), para luego determinar la regresión potencial que caracteriza a la curva ABC (Ver Fig.1, curva BD).

Con los datos obtenidos de la caracterización reológica de las muestras sometidas a diversas temperaturas, se procedió a la determinación de las regresiones polinomiales.

### Modelo

#### Modelo utilizado para la caracterización reológica

Para la caracterización reológica de las muestras sometidas a diferentes temperaturas, se ha aplicado el modelo de la Ley de la Potencia de Ostwald-de Waele, siendo su ecuación:

$$\tau = a (\dot{\gamma})^b \quad (1)$$

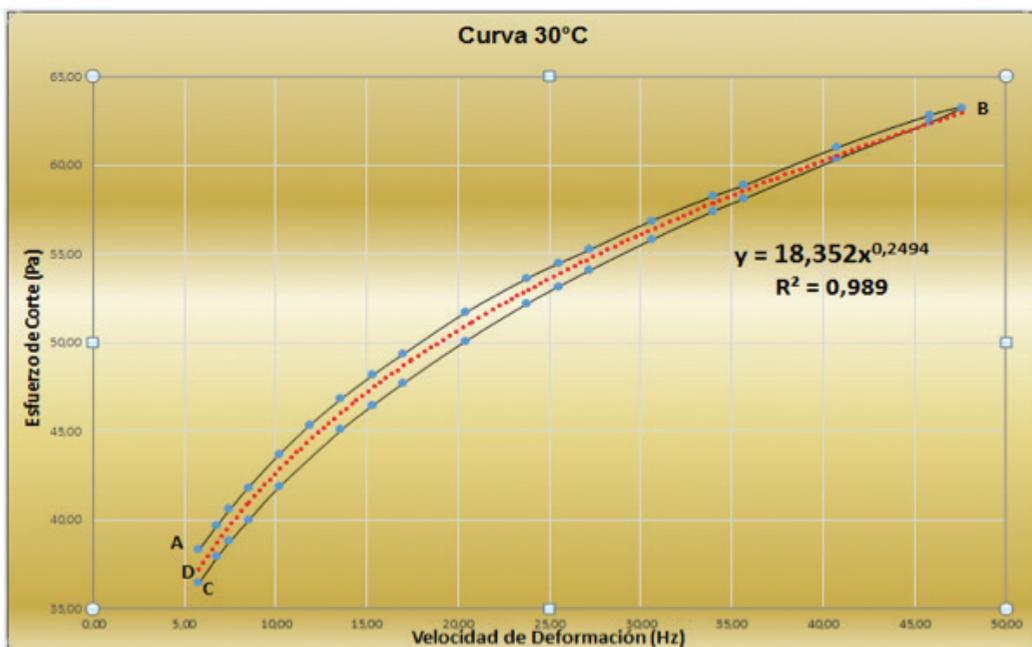
donde:

$\tau$  (Pa) es el esfuerzo de corte en la interface del fluido y el elemento que produce el esfuerzo,  $\dot{\gamma}$  ( $s^{-1}$ ) es la velocidad de deformación en la interface;  $a$  ( $Pa \cdot s^b$ ) y  $b$  (adimensional) son respectivamente el coeficiente de consistencia y el índice del comportamiento del flujo (parámetros empíricos).

En la Fig. 1. se muestra un ejemplo de cómo han sido simulados los datos de cierta muestra sometida a una dada temperatura (arrojados por el software Wingather Data 1), para poder así, de la curva BD, establecer la expresión que caracteriza a la misma, siendo el  $R^2$  el coeficiente de determinación.

#### Modelo matemático

Para poder aproximar las curvas características (y sus correlaciones asociadas) que permitan hallar los parámetros  $a$  y  $b$ , a cualquier temperatura comprendida en el rango de 5 °C – 45 °C, se procedió a la implementación del esquema descrito a continuación.



**Fig.1. Ajuste de los datos experimentales de una muestra de aderezo sometida a una temperatura de 30°C, analizada con el modelo de la Ley de la Potencia**

Dados los conjuntos de datos experimentales:

$$A = \{(T_i, a_i) : 1 \leq i \leq n\} \quad (2)$$

y

$$B = \{(T_i, b_i) : 1 \leq i \leq n\} \quad (3)$$

donde los  $a_i$  y  $b_i$  son respectivamente el índice de consistencia y el índice del comportamiento del flujo correspondientes a la temperatura  $T_i$ . Si ahora denominamos:

$$T_{\min} = \min_{1 \leq i \leq n} T_i \quad (4)$$

y

$$T_{\max} = \max_{1 \leq i \leq n} T_i \quad (5)$$

siendo para este caso,  $T_{\min}$  igual a 5 °C y  $T_{\max}$  igual a 45 °C. Nos proponemos encontrar funciones polinomiales que minimicen el error cuadrático medio. Esto es, si:

$$R_a(x) = \sum_{k=0}^p \alpha_k x^k \quad (6)$$

y

$$R_b(x) = \sum_{k=0}^p \beta_k x^k \quad (7)$$

Se busca que las cantidades:

$$E_a(\alpha_0, \dots, \alpha_p) = \sum_{i=0}^n [a_i - R_a(T_i)]^2 \quad (8)$$

$$E_b(\beta_0, \dots, \beta_p) = \sum_{i=0}^n [b_i - R_b(T_i)]^2 \quad (9)$$

sean mínimas, esto quiere decir que se busca que los coeficientes de las regresiones polinomiales hagan mínimo el error cuadrático medio. Por tales motivos, se han ensayado modelos de regresiones polinómicas de diferentes grados para su posterior comparación.

## Resultados

Todos los datos, producto de la caracteriza-

ción reológica, se han ajustado satisfactoriamente al modelo de la Ley de la Potencia. En la Tabla 2 se muestran los valores obtenidos de  $a$  y  $b$  de las muestras analizadas a diferentes temperaturas. En la misma, se puede visualizar que el índice de consistencia disminuyó con la temperatura, aumentando el índice de comportamiento de flujo. En todas las muestras el índice de comportamiento de flujo  $b$ , es menor que la unidad indicando un comportamiento pseudoplástico.

T (°C)	T (K)	a	b
5	278,15	32,356	0,1931
10	283,15	29,938	0,2119
15	288,15	28,277	0,2208
20	293,15	24,713	0,2097
25	298,15	21,006	0,2344
30	303,15	18,352	0,2494
35	308,15	16,033	0,2631
40	313,15	13,884	0,2783
45	318,15	12,717	0,282

**Tabla 2. Valores de los parámetros  $a$  y  $b$  obtenidos al ajustar con la Ley de la Potencia**

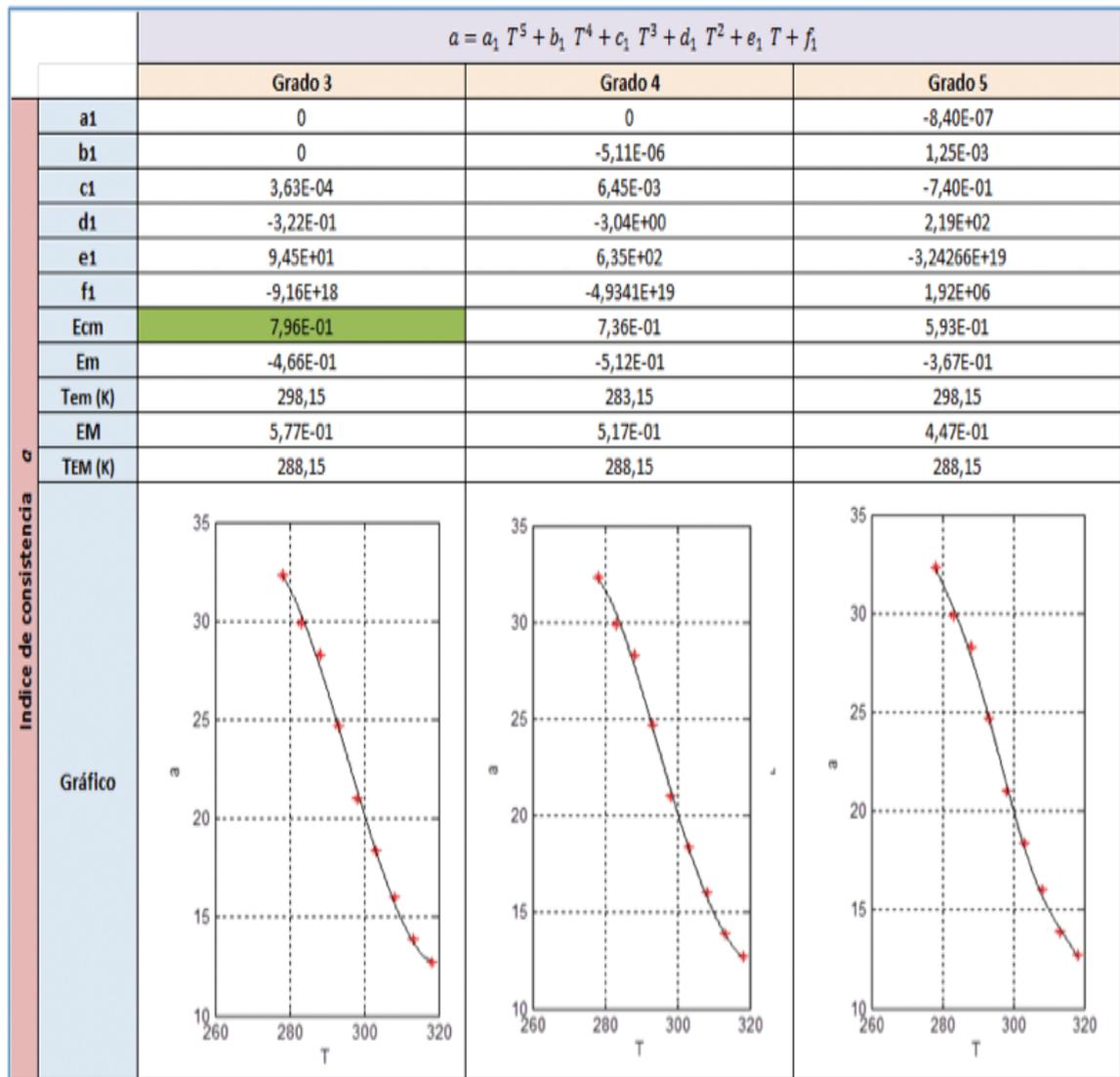
Luego de haber sido programado en Matlab, el algoritmo descrito anteriormente se han obtenido funciones de aproximación de diferentes grados para los parámetros  $a$  y  $b$ .

En las columnas de la Fig. 2. y de la Fig. 3. se muestran los errores cuadráticos medios para cada caso y los errores máximos y mínimos, como así también las temperaturas en las cuales esos errores (máximos y mínimos) han sido detectados.

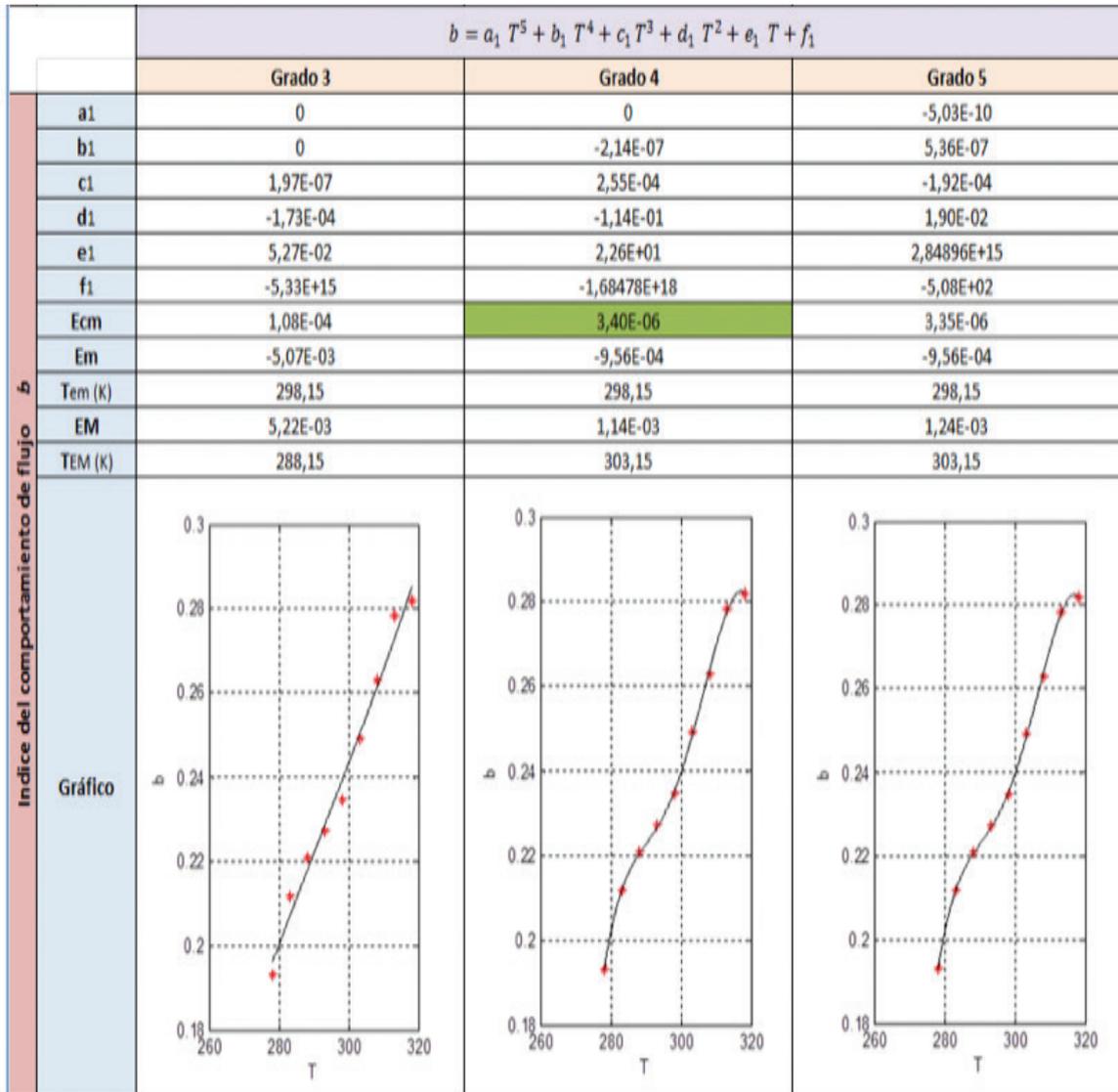
En función a los resultados obtenidos, se han obtenido las siguientes correlaciones (con la temperatura  $T$  [=] Kelvin) para la determinación de los parámetros reológicos:

$$a = 3,63 \cdot 10^{-4} T^3 - 3,22 \cdot 10^{-1} T^2 + 94,5 T - 9,16 \cdot 10^{18} \quad (10)$$

$$b = -2,14 \cdot 10^{-7} T^4 + 2,55 \cdot 10^{-4} T^3 - 1,14 \cdot 10^{-1} T^2 + 22,6 T - 1,684 \cdot 10^{18} \quad (11)$$



**Fig. 2. Valores y curvas características para la determinación del parámetro  $a$  (índice de consistencia) del aderezo en un rango de 5 °C – 45 °C**



**Fig. 3. Valores y curvas características para la determinación del parámetro  $b$  (índice del comportamiento del flujo) del aderezo en un rango de 5 °C – 45 °C**

## Conclusiones

A partir de las mediciones y mediante la utilización de regresión polinomial se ha obtenido un modelo para caracterizar la variación de los parámetros  $a$  y  $b$  con la temperatura. Para la elección de la correlación necesaria para la determinación del índice de consistencia  $a$ , se ha tenido en cuenta que si bien el mínimo error cuadrático medio se advierte en la correlación de grado 5, todos los errores poseen

el mismo orden, priorizando entonces que un polinomio de menor grado es de ejecución más sencilla. Asimismo, para la elección de la correlación necesaria para la determinación del índice del comportamiento  $b$ , se ha percibido que el polinomio de grado 4 satisface las dos condiciones señaladas para el caso anterior (de los dos polinomios que poseen el error cuadrático medio de menor orden, resulta el polinomio de grado inferior).

## Referencias

- ZANGRANDO, A.; SANTANA, S.; DELLA ROCCA P. y BREIER R., (2009) Estudio reológico de bases para aderezos en ensaladas con distintos hidrocoloides en su formulación, <http://www.fc.ai.uncu.edu.ar/upload/28atc-zangrando.pdf>. pp. 1-7
- CAIRO, F.; WHELAN, M.R.; ZANGRANDO, A.; SANTANA, S.; ZAMORA, M.C. y BREIER, R., (2011) Desarrollo de un aderezo saludable para ensaladas: análisis del comportamiento reológico, <http://www.amidiq.com/memorias.htm> pp. 2729-2736
- WHELAN, M.R.; CAIRO, F.; ZANGRANDO, A.; HOVSEPIAN, J.; SANTANA, S.; ZAMORA, M.C. y BREIER R., (2011) Desarrollo de un aderezo saludable a base de aceite de canola: influencia de la viscosidad en la percepción del sabor y preferencias de los consumidores. *Proyecciones*, Vol 9 N° 1 pp. 55-61.
- MATEUCCI, R.; WHELAN, M.R.; ZANGRANDO, A.; SANTANA, S. y BREIER R., (2012) Determinación de vida útil de un aderezo saludable para ensaladas a través de indicadores microbiológicos, <https://sites.google.com/site/vidautildeunaderezosaludable/informacion>
- BORDA, M. de los A., (2011) Formulación de una base para aderezo de ensaladas con características de alimento funcional. Tesis de Maestría en Tecnología de los Alimentos. Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Buenos Aires.
- RAO, M.A. y PALOMINO, N.O, (1974) Flow properties of tropical fruit purees. *Journal of Food Science* v.39, n.1, p.160-161, 1974.
- GARCÍA ET AL. GARCIA, R.; RIVERA, J. & ROLZ, C. Rheological properties of some tropical fruit products and their enzyme clarification. *Proc. Iv Int. Congress Food Science And Technology*, II, p 18-26, 1974.
- OLIVEIRA, K. H.; SOUZA, J. A. RIBEIRO DE Y MONTEIRO, A. RODRIGUES, (2008) Caracterização reológica de sorbetes. *Food Science and Technology*, Campinas.