



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN
CIENCIAS QUÍMICAS

TEMA DEL INFORME DE TRABAJO

**PROPIEDADES VISCOELÁSTICAS DE PAPILLAS
PREPARADAS A BASE DE HARINA DE MAÍZ
NIXTAMALIZADO**

PARA OPTAR POR EL GRADO DE

MAESTRO EN CIENCIAS

PRESENTA

SERGIO MIGUEL OCAMPO ALAFFITA



TUTOR: DR. ALBERTO TECANTE CORONEL
AÑO: 2007



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente:	Dr. Eduardo Jaime Vernon Carter (UAM-Iztapalapa)
Primer Vocal:	Dra. Laura Patricia Martínez Padilla (FES-Cuautitlán)
Segundo Vocal:	Dr. Juan Alfredo Salazar Montoya (CINVESTAV-IPN)
Tercer Vocal: UNAM)	Dra. María del Carmen Wachter Rodarte (Facultad de Química-UNAM)
Secretario:	Dra. Adela Rodríguez Romero (Instituto de Química-UNAM)
1er. Suplente:	Dr. Arturo Bello Pérez (CEPROBI-IPN, Yauatepec Morelos)
2do. Suplente:	Dr. Rafael Herrera Nájera (Facultad de Química-UNAM)

Lugares donde se realizó la tesis: Departamento de Alimentos y Biotecnología,
Facultad de Química, Conjunto "E", UNAM.
Laboratorios L-313 y L-324.

Director de Tesis:

Dr. Alberto Tecante Coronel

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	5
Reología y Reometría	5
Almidón	6
Nixtamalización	6
Propiedades viscoelásticas de los biopolímeros de los alimentos	6
Caracterización del comportamiento viscoelástico de los sistemas de biopolímeros.....	7
Soluciones	7
Geles	8
OBJETIVOS	9
METODOLOGÍA	10
RESULTADOS	11
Composición del harina	11
Caracterización reológica.....	12
Papilla con 5% de la fracción malla 40.....	12
Papilla con 20 % de la fracción malla 40.....	12
Papilla con 15% de la fracción malla 40.....	14
Papilla con 10 % de la fracción malla 40.....	16
Papilla con 12.5 % de la fracción malla 40.....	16
Papilla comercial.....	17
Efecto del tamaño de partícula.....	19
Papilla con 11.5 % del harina	23
CONCLUSIONES	24
Referencias.....	25

INTRODUCCIÓN

Las papillas a base de maíz, mijo y sorgo son parte importante de la dieta de destete para niños de países en vías de desarrollo (Trèche & Mbome, 1999). Este alimento es preparado por cocción de una porción de harina en agua produciendo un material “espeso” aun cuando la cantidad de sólidos es pequeña (Kikafunda et al., 1997). Estas papillas se caracterizan por ser de baja densidad energética y gran volumen; por esta razón, los niños son incapaces de consumir suficiente cantidad de dicho alimento para satisfacer sus necesidades de energía y nutrimentales. Por ello es necesario buscar proporciones de harina y agua que representen un buen balance entre consistencia y aporte energético.

Las propiedades reológicas del almidón de maíz en medio acuoso han sido ampliamente estudiadas. Sin embargo, el análisis basado en los principios fundamentales de la reología y no en pruebas empíricas o semi-empíricas, en alimentos de complemento preparados a base de cereales como el maíz es aún escaso en México. Existen diversos reportes acerca de la viscosidad aparente de papillas en los que se establece su dependencia con la velocidad de deformación (Lorri & Svanberg 1993, Gimbi et al 1997, Trèche & Mbome, 1999). Esta relación ha sido usada para expresar de manera cuantitativa la consistencia del alimento. Los métodos para preparar las papillas y determinar su viscosidad aparente no han sido estandarizados, lo que dificulta la comparación e interpretación de resultados provenientes de diferentes investigadores (Onyango et al., 2003, Mouquet & Trèche 2001, Kikafunda et al., 1997). Sin embargo, dada la naturaleza de las papillas, su viscosidad aparente no es necesariamente la mejor propiedad para caracterizarlas reológicamente. El almidón sufre cambios durante la cocción e interacciona con otros componentes como lípidos y proteínas. Todo ello tiene impacto sobre las propiedades viscoelásticas del alimento. Por lo tanto, el propósito principal de este estudio es examinar dichas propiedades de papillas preparadas a base de harina de maíz nixtamalizado, usando pruebas reológicas fundamentales, para determinar de qué manera la preparación y la proporción de los principales ingredientes afectan el carácter elástico-viscoso de este alimento.

REOLOGÍA Y REOMETRÍA

La reología es una disciplina científica que tiene que ver con el estudio de la deformación y el flujo de los materiales. La reometría es un conjunto de técnicas para

llevar a cabo mediciones reológicas y el equipo para tal propósito se denomina reómetro. En los reómetros de torsión, una muestra colocada entre dos elementos mecánicos (e.g. dos platos paralelos o dos cilindros coaxiales, uno de los cuales es móvil) se somete a la aplicación de una deformación de cizalla ya sea por medio de movimiento circular uniforme o de oscilación harmónica simple.

ALMIDÓN

El almidón se encuentra en semillas, raíces y tubérculos que son almacenes de energía para las plantas. En algunos cereales, como el maíz, esta macromolécula constituye 70%. El almidón está compuesto por dos polímeros distintos, ambos de glucosa: (1) Amilosa formada por unidades de glucosa unida por enlaces 1-4 formando cadenas largas esencialmente lineales y que se encuentra en una proporción de 20 a 25%; (2) Amilopectina, formada por unidades de glucosa unidas por enlaces 1-4 y en la cual cada cierto número de monómeros tiene uniones $\alpha(1-6)$ que dan lugar a la formación de ramificaciones. Por ello posee una estructura tipo árbol con 20 o 25 unidades por ramificación. El amilopectina tiene un peso molecular más grande que el amilosa.

NIXTAMALIZACIÓN

Se conoce como nixtamalización al cocimiento en medio alcalino del grano de maíz seguido de un reposo a temperatura ambiente que toma entre 8 y 16 horas. Algunas de las consecuencias más importantes de la nixtamalización son la absorción de calcio en el grano de maíz, el desprendimiento del pericarpio y la gelatinización parcial del almidón contenido en el endospermo del grano.

GELATINIZACIÓN

La gelatinización es un conjunto de modificaciones que ocurren cuando los gránulos de almidón se tratan con calor en medio acuoso. Cuando aplicamos calor a una suspensión de almidón, se hinchan los gránulos por absorción de agua. Una vez que el hinchamiento es máximo, la amilosa que es soluble, es liberada en el agua dando como resultado gránulos muy hinchados rodeados por una gran cantidad de cadenas de amilosa. De esta manera se forma una pasta que tiene una elevada viscosidad.

PROPIEDADES VISCOELÁSTICAS DE LOS BIOPOLÍMEROS DE ALIMENTOS

Las proteínas y los polisacáridos son los dos principales tipos de biopolímeros usados en la industria de los alimentos, de los cuales el almidón es uno de los más populares. Los biopolímeros son usados generalmente como agentes espesantes o gelantes e imparten características sensoriales deseables.

CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO VISCOELÁSTICO DE BIOPOLÍMEROS

Las características reológicas de los sistemas en los cuales los biopolímeros están presentes, ya sea como componentes naturales o añadidos, son influenciadas por su estructura, tamaño, forma molecular, conformaciones (i.e. orientación en el espacio) adoptadas en solución, interacción con otros constituyentes y el medio químico y físico. Los alimentos son medios acuosos multicomponentes, en donde ocurren diferentes tipos de interacciones. Las propiedades funcionales de los biopolímeros en tales medios se han estudiado, pero no necesariamente en presencia de todos los componentes normalmente encontrados en los alimentos. Es más simple estudiar su comportamiento como componentes aislados, razón por la cual el almidón ha sido estudiado ampliamente, en medio acuoso. Sólo así es que otros componentes, como iones, mono o disacáridos, o incluso otros biopolímeros pueden ser incorporados y las posibles modificaciones que surjan de su presencia pueden ser entendidas y explicadas en términos más racionales y menos empíricos (Tecante, 2005).

El propósito de este trabajo fue establecer un punto de partida en la caracterización reológica de papillas preparadas a base de harina de maíz nixtamalizado por medio de dos pruebas fundamentales para fijar referencias absolutas con respecto a este tipo de alimentos. Las papillas son alimentos de origen natural producidas por un proceso que incluye: (1) Nixtamalización; (2) Deshidratación; (3) Molienda; (4) Empaque al vacío; (5) Cocción y (6) Enfriamiento. El empaque al vacío es la única operación que no es utilizada en las comunidades con extrema pobreza. Así, la caracterización reológica por medio de dos pruebas fundamentales se realizó en un alimento preparado en el laboratorio prácticamente de manera idéntica al de las comunidades mencionadas anteriormente.

DISOLUCIONES

En general, las disoluciones diluidas de biopolímeros muestran un comportamiento newtoniano, mientras que las disoluciones semidiluidas exhiben un comportamiento viscoelástico no newtoniano. En las disoluciones diluidas, la concentración de polímero es tan baja que las interacciones polímero-disolvente prevalecen sobre las interacciones polímero-polímero; el comportamiento reológico depende en gran medida de un rearrreglo de las moléculas de polímero y disolvente. Conforme la concentración de polímero se incrementa, las cadenas macromoleculares comienzan a interactuar y los contactos polímero-polímero se vuelven más importantes. Cuando las cadenas de polímero en solución se pliegan, la viscosidad se incrementa y aparece el comportamiento no newtoniano. Las conformaciones son controladas por todos los factores físicos y químicos capaces de alterar la tendencia de los polímeros a adoptar un estado de orden o de desorden.

Normalmente las disoluciones de polímero se examinan en un régimen de deformación oscilatoria armónica simple de baja amplitud a una deformación constante, evaluando la dependencia con la frecuencia de los módulos de pérdida (G'') y de almacenamiento (G') de energía, así como el ángulo de desfase ($\tan \delta = G''/G'$) que brinda información sobre el predominio de uno sobre el otro. En general, las disoluciones de biopolímeros se caracterizan por la presencia, a una frecuencia de oscilación dada, de un punto en el cual $G' = G''$ (i.e. $\tan \delta = 1$). Este punto divide la dependencia de los módulos con la frecuencia en dos regiones: (1) La zona terminal, que ocurre antes de que $G' = G''$, donde las disoluciones fluyen como líquidos de viscosidad alta con $G'' \propto \omega$ y usualmente mayor que G' . Aquí el comportamiento es controlado por el movimiento translacional de las macromoléculas, (2) La zona de "plateau" o meseta, que ocurre más allá del punto donde $G' = G''$, donde los sistemas despliegan su carácter elástico con G' mayor que G'' y ambos prácticamente independientes de la frecuencia. En el lado de la zona terminal, cerca del punto donde $G' = G''$, G' se incrementa debido a una distorsión macromolecular y se aproxima a G'' . En la zona de "plateau", cerca del mismo punto pero en la región de las altas frecuencias, el tiempo del periodo de oscilación es lo suficientemente bajo para prevenir que se desbarate el enredamiento y G' predomina sobre G'' mostrando un pequeño cambio con la frecuencia (Tecante, 2005).

GELES

Los geles constituyen lo que ha sido llamado redes “infinitas”, que pueden ser formadas por diferentes rutas y se caracterizan por tener una relajación infinita y módulos de equilibrio. Sus propiedades en baja y alta deformación han sido ampliamente investigadas ya que muchos constituyen una clase importante de materiales para la industria química y de alimentos. Desde un punto de vista reológico, un gel está definido como una red tridimensional que no exhibe flujo estacionario (Ferry, 1980). Esto significa un material con propiedades tipo sólido, y en este sentido, el término “verdadero” o “fuerte” se utiliza normalmente para designar una estructura tridimensional auto-soportable. Los geles verdaderos o fuertes responden como sólidos a toda deformación. En el caso de los biopolímeros, la red tridimensional está formada en un disolvente en exceso, normalmente agua. En biopolímeros iónicos (i.e. polisacáridos), la formación de la red se induce frecuentemente por la adición de iones divalentes o monovalentes. El proceso cooperativo tiene una enorme influencia en la arquitectura de la red resultante. Contrario a las redes de enredamiento o entrecruzamiento, las redes de gel verdadero poseen un módulo de equilibrio, esto es, un módulo independiente de la frecuencia sobre un intervalo grande. Típicamente, el módulo de almacenamiento, G' , es mucho mayor que el módulo de pérdida, G'' , y ambos son independientes de la frecuencia a lo largo del intervalo experimental; de manera clásica de 1×10^{-3} a 16 Hz. Muchos alimentos y biopolímeros de alimentos muestran este comportamiento en mayor o menor grado. La gelatina, la gelana, los alginatos y muchos otros biopolímeros formadores de gel tienen el comportamiento viscoelástico descrito anteriormente. Algunas veces en la práctica, es difícil obtener todo el espectro si la ventana experimental de frecuencia de oscilación es estrecha. Sin embargo, es aún posible distinguir los comportamientos entre gel y disolución (Tecante, 2005).

Cuando se someten a deformaciones grandes, la distinción entre disoluciones y geles es más clara. Los geles fuertes se fracturan o incluso colapsan, mientras que las disoluciones exhiben flujo a un determinado tiempo. Es por esto que en la prueba de cizalla angular, aún a rapidez de deformación baja, se pierde información puesto que se obtienen datos de un sistema fracturado si lo que se estudia es un gel. La deformación oscilatoria de baja amplitud ha mostrado ser una herramienta muy útil en la

caracterización de geles. La gelificación es un fenómeno que en muchos casos involucra la asociación intercadenas a través de regiones con estructuras ordenadas.

OBJETIVOS

- Obtener mediante pruebas oscilatorias de baja amplitud el espectro mecánico de viscoelasticidad lineal de papillas preparadas a base de harina de maíz nixtamalizado con diferentes tamaños de partícula y proporciones harina-agua para evaluar el efecto de estas variables en las propiedades viscoelásticas de estos alimentos.
- Determinar la composición del harina a través de análisis físicoquímicos para calcular el aporte energético que brindan las papillas preparadas con distintos porcentajes harina-agua. A partir de esta información, enfocar los análisis reológicos en papillas que presenten un aporte energético requerido por un alimento de complemento.
- Obtener mediante pruebas oscilatorias de baja amplitud el espectro mecánico de viscoelasticidad lineal de una papilla comercial para establecer una referencia del comportamiento reológico “ideal” para una papilla preparada a base de harina de maíz nixtamalizado.
- Determinar qué proporción de componentes y tamaño de partícula del harina permiten obtener una papilla con un espectro mecánico similar al de la papilla comercial para fijar una referencia con respecto al comportamiento reológico deseado en estos alimentos.

METODOLOGÍA

Obtención del harina

Se nixtamalizaron 6 kg de maíz usando 1% de cal con una relación volumen maíz:agua de 1:3. El tiempo de cocción fue de 65 minutos determinado por el desprendimiento del pericarpio. Posteriormente se dejó en reposo 12 horas a 22 °C. Antes de lavar el grano, el pericarpio fue removido frotando los granos de maíz con las manos. El pericarpio quedó retenido en cada uno de los recipientes en los cuales se trasvasó el grano para efectuar los lavados. Se realizaron tantos lavados como fuera necesario para que el pH del agua de lavado fuera neutro. El grano fue triturado en húmedo con un molino de mano y deshidratado en un secador convectivo durante 12 horas a 45 °C. El harina seca se molió nuevamente en un molino (Flour Grinding Mill, Gushi) para reducir aun más el tamaño de partícula. Posteriormente se obtuvieron diversas fracciones tamizando el harina con las mallas 20 (0.710 mm), 40 (0.425 mm) y 60 (0.250 mm). Una vez obtenidas las fracciones, éstas fueron empacadas al vacío para ser utilizadas posteriormente en pequeñas raciones evitando la hidratación y el desarrollo de microorganismos. Los análisis proximales, para el cálculo del contenido energético, del harina matriz y de cada una de las fracciones fueron realizados por el equipo de trabajo del Dr. Jean Pierre Guyot del Institut de Recherche pour le Developpement (Montpellier, Francia).

Preparación de las papillas

Las papillas fueron preparadas usando diferentes proporciones harina-agua. Las papillas fueron preparadas suspendiendo el harina en agua y cocinando la suspensión en un recipiente enchaquetado de acero inoxidable agitado mecánicamente con una capacidad aproximada de 0.5 kg. La cocción se llevó a cabo calentando desde la temperatura ambiente miento hasta 92 °C, mantenimiento a esa temperatura durante 10 min y enfriamiento hasta temperatura ambiente con una agitación constante.

Reología

Las propiedades reológicas fueron determinadas en un reómetro (ARES RFS III, TA Instruments, USA) usando la geometría de placas paralelas de 25 mm de diámetro con una separación de 2 mm. La zona de viscoelasticidad lineal se determinó por medio de

un barrido de deformación a una frecuencia constante de 1 Hz. Una vez determinada esta zona, se hizo un barrido de frecuencia, a deformación constante, en el intervalo de 0.1 a 100 rad/s. Todas las pruebas se realizaron a 25 °C.

RESULTADOS

COMPOSICIÓN DEL HARINA

La fracción mayoritaria fue la de malla 60 la cual representó el 41% del total (Cuadro 1).

Cuadro 1. Fracciones del harina de maíz nixtamalizado.

Malla	% retenido
20 (0.710 mm)	23
40 (0.425 mm)	36
60 (0.250 mm)	41

Los análisis químicos del harina matriz y de sus fracciones se muestran en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Composición base seca (%) de harina de maíz nixtamalizado y sus fracciones.

Harina	Materia seca	Lípidos	Fibra ADF*	Proteína**	Cenizas	Almidón total
Matriz	92.03	6.67	2.44	10.26	1.36	75.06
Malla 20	90.39	5.30	3.42	10.74	1.24	72.64
Malla 40	90.43	5.49	2.68	10.40	1.16	74.97
Malla 60	90.96	7.27	2.34	9.96	1.53	70.63

* van Soest; **N x 6.25

En el Cuadro 3 se presenta la densidad energética de papillas preparadas con harina de maíz nixtamalizado (kcal/100 g de papilla) de acuerdo con las proporciones de los ingredientes y con la fracción utilizada.

Cuadro 3. Densidades energéticas (kcal/100 g papilla) de las papillas.

Fracción/porcentaje	5%	10%	12.5%	15%	20%
Matriz	21.9	43.8	54.8	65.8	87.7
Malla 20	21.2	42.5	53.1	63.7	85.0
Malla 40	21.7	43.4	54.2	65.1	86.8
Malla 60	21.3	42.7	53.4	64.1	85.5

La leche materna tiene un valor aproximado de 75 kcal/100 g (Lorri & Svanberg 1993) y es un punto de referencia para dirigir nuestro trabajo y el de numerosos investigadores para mejorar las propiedades nutrimentales y energéticas de los alimentos de complemento. Puede apreciarse que una papilla con 20% de harina tiene una densidad energética mayor que la de la leche materna pero su carácter de gel

“fuerte” o de “engrudo”, como una definición coloquial para su “consistencia”, lo convierten en un alimento sensorialmente desagradable para los infantes (Lorri & Svanberg 1993).

CARACTERIZACIÓN REOLÓGICA

Papilla con 5% de harina de la fracción malla 40

La papilla con 5% de fracción malla 40 exhibió el comportamiento típico de una suspensión semidiluida, es decir, una suspensión que fluye. Macroscópicamente se apreció una tendencia a la sedimentación al cabo de varios minutos. A pesar de que la muestra se homogenizó mediante agitación manual antes de ser colocada en las placas del reómetro, la sedimentación fue inevitable. La Figura 1 muestra un barrido de deformación a 1 Hz de frecuencia de una papilla con 5% de harina de la fracción malla 40. La zona de viscoelasticidad lineal se extendió desde 0.1 hasta 1% de deformación.

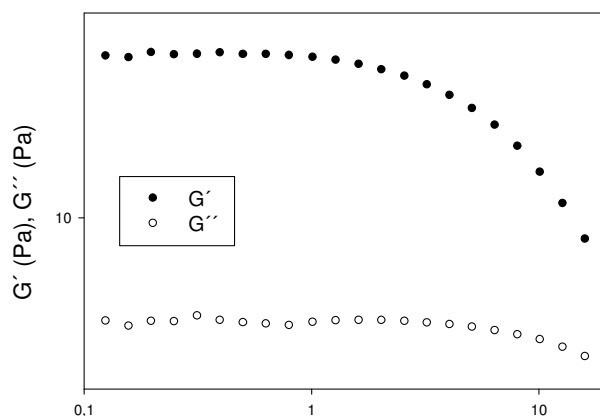


Figura 1. Barrido de deformación ($\omega = 1$ Hz) de una papilla con 5% de harina de la fracción malla 40.

En la Figura 2 se muestra un barrido de frecuencia a deformación constante para la misma papilla indicando la tendencia de $\tan \delta$ a aumentar conforme aumenta la frecuencia, indicando por lo tanto que la suspensión fluye. Sin embargo, el predominio de G' sobre G'' sobre todo el intervalo de frecuencias indica un mayor carácter elástico que viscoso, sin llegar a ser un gel dado que no se observa la presencia de un “plateau” elástico, es decir, la independencia de los módulos dinámicos con la frecuencia.

Papilla con 20% de harina de la fracción malla 40

En las Figuras 3 y 4 se observa que la papilla con 20% de harina de la fracción malla 40 exhibió un comportamiento de un material que no fluye en la escala de tiempo de observación convirtiéndolo en un gel fuerte o verdadero. La Figura 3 muestra el barrido de deformación mostrando una zona de viscoelasticidad lineal más estrecha que para la papilla con 5% de harina. Este comportamiento es característico de un sistema más “estructurado”. En la Figura 4 se aprecia que el módulo G' es aproximadamente una década mayor que G'' y ambos prácticamente independientes de la frecuencia a lo largo del intervalo de frecuencia. Asimismo, la $\tan \delta$ está entre 0.1 a 0.2 lo que confirma el carácter predominantemente elástico de esta papilla.

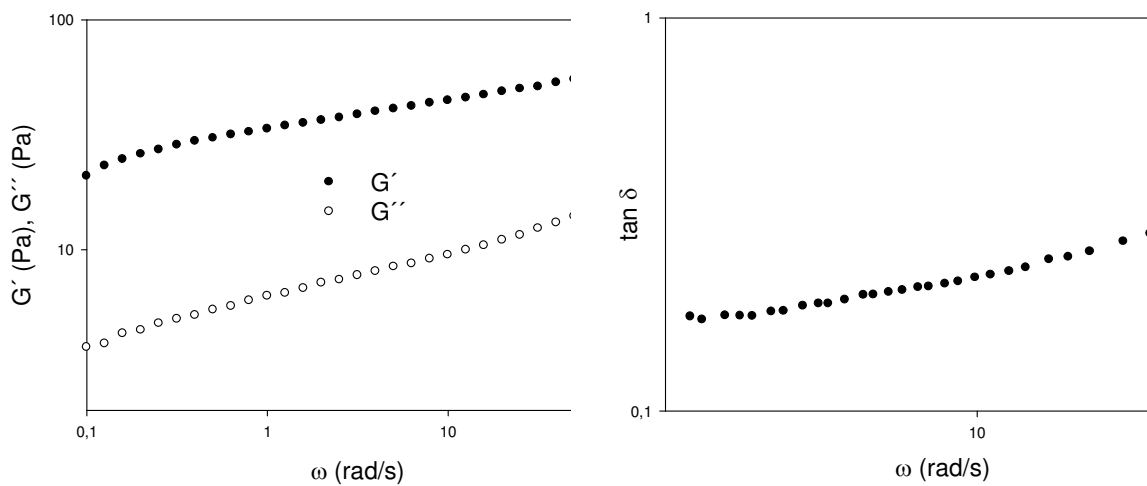


Figura 2. Barrido de frecuencia ($\gamma = 1\%$) de una papilla con 5% de harina de la fracción malla 40. Izquierda: Espectro mecánico; derecha: cambio de la tangente del ángulo de desfase con la frecuencia.

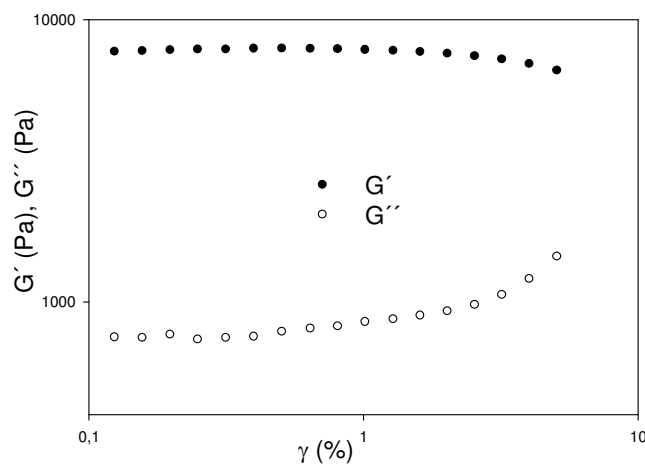


Figura 3. Barrido de deformación ($\omega = 1$ Hz) de una papilla con 20% de harina de la fracción malla 40.

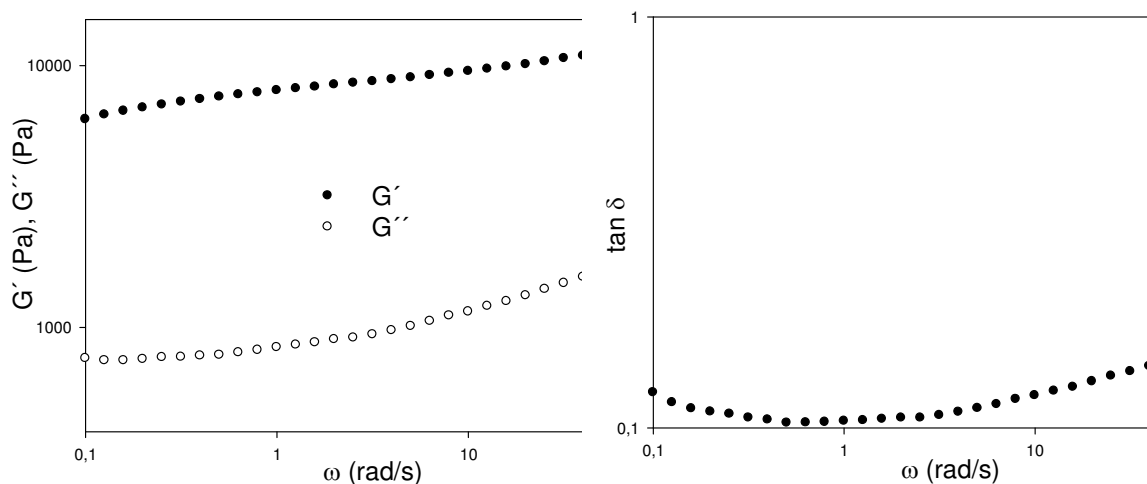


Figura 4. Barrido de frecuencia ($\gamma = 1\%$) de una papilla con 20% de harina de la fracción malla 40. Izquierda: Espectro mecánico; derecha: cambio de la tangente del ángulo de desfase con la frecuencia.

Observando los espectros mecánicos de las papillas con 5 y 20% que exhiben comportamientos reológicos típicos bien caracterizados, se consideró que existen ciertas concentraciones dentro de este intervalo con comportamientos intermedios entre los ya mostrados. La papilla con 20% de harina fue difícil de examinar en el reómetro debido a una rápida deshidratación a temperatura ambiente, adhesión y altos torques que resultaron en tiempos más prolongados. Así, la búsqueda de una concentración de comportamiento intermedio o de “transición” brindó dos soluciones a nuestra investigación: (1) Un alimento presumiblemente más agradable al infante por su tendencia a fluir y con una densidad energética cercana a la deseada para un alimento de complemento; (2) Un sistema experimentalmente manipulable sin sedimentación, deshidratación o adhesión. Debido a lo anterior, el trabajo fue orientado hacia la obtención de una proporción harina-agua que mostrara un comportamiento de transición.

Papilla con 15% de harina de la fracción malla 40

La papilla con 15% de harina de la fracción malla 40 exhibió la misma propiedad de gel fuerte que la papilla con 20%. Los valores de los módulos fueron menores que los de la papilla con 20% (Figura 5). Esto es un indicio de que el carácter de gel fuerte podría perderse al disminuir la concentración. Como se observa en la Figura 6, el módulo de almacenamiento G' es aproximadamente una década mayor que G'' a lo

largo de todo el intervalo de frecuencia, pero ambos módulos son aproximadamente media década menores que los de la papilla con 20% de harina.

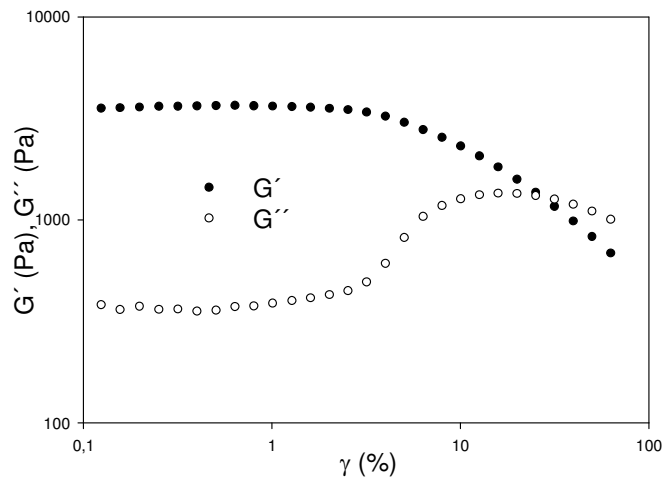


Figura 5. Barrido de deformación ($\omega = 1$ Hz) de una papilla con 15% de harina de la fracción malla 40.

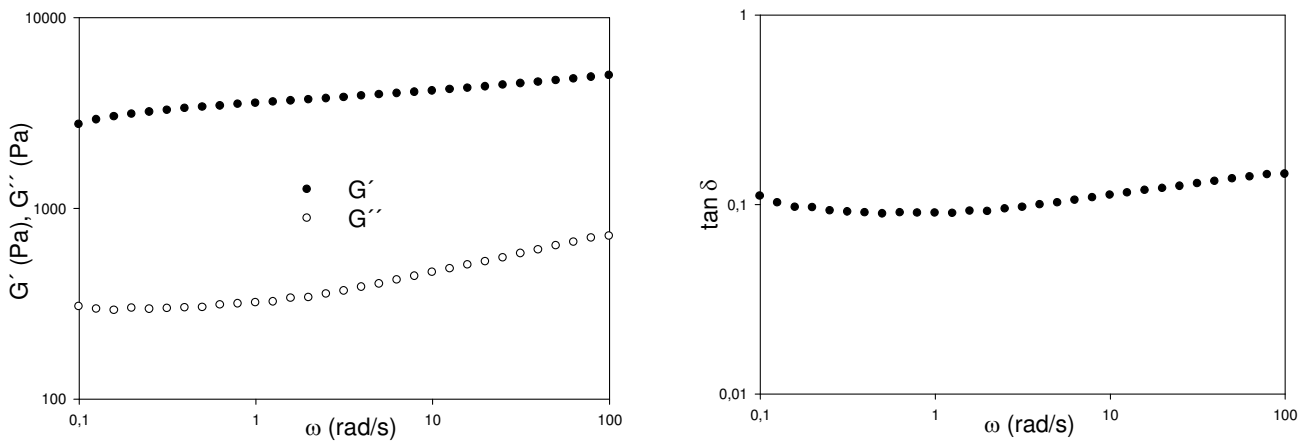


Figura 6. Barrido de frecuencia ($\gamma = 1\%$) de una papilla con 15% de harina de la fracción malla 40. Izquierda: Espectro mecánico; derecha: cambio de la tangente del ángulo de desfase con la frecuencia.

En la Figura 7 se comparan los valores de G' , G'' y $\tan \delta$ de un barrido de frecuencia a deformación constante para las papillas con 15 y 20% harina de la fracción malla 40. El módulo G' de la papilla con 20% de harina es 130% mayor que G' de la papilla con 15%. El valor de G'' de la papilla con 20% es 156% mayor que G'' para la papilla con 15% de harina. Sin embargo, la diferencia entre los valores de $\tan \delta$ para ambos materiales es solamente de 11%. Así, los dos alimentos se comportan como un gel “fuerte”, siendo la papilla con 20% de harina el material con los valores más grandes de G' y G'' .

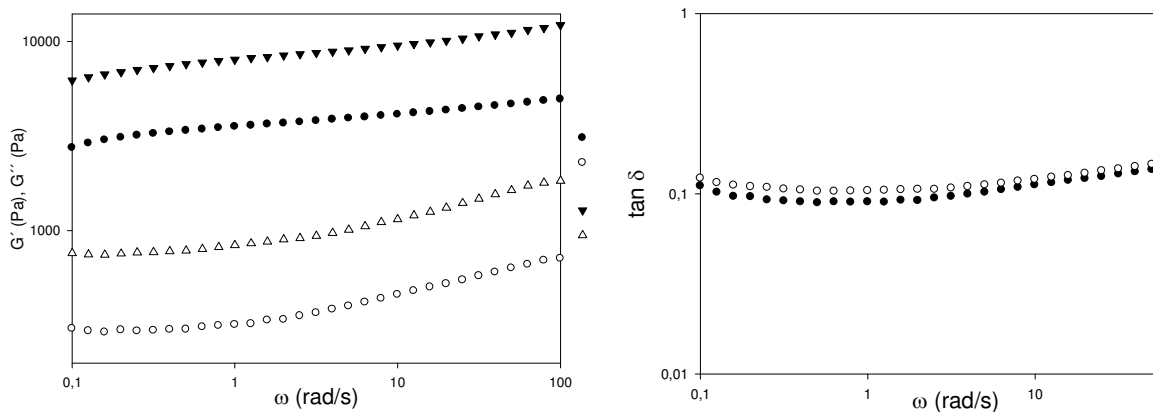


Figura 7. Barrido de frecuencia ($\gamma = 1\%$) de papillas con 15 y 20% de harina de la fracción malla 40. Los valores de G' y G'' son mayores para la papilla con 20% de harina. El comportamiento del ángulo de desfase con respecto a la frecuencia (derecha) es similar para ambos materiales.

El criterio para continuar fue buscar un material con una tendencia al flujo pero con una estructura de red macromolecular apenas auto soportable para evitar la sedimentación.

Papilla con 10% de harina de la fracción malla 40

La papilla con 10% de harina presentó mayor sedimentación que la de 5%. En la Figura 8 se muestra el barrido de deformación de la papilla con 10% de harina para la cual fue posible obtener, aun con la fuerte tendencia a la sedimentación, la zona de viscoelasticidad lineal. Habiendo examinado las fronteras entre 10 y 15%, el intervalo se redujo para buscar una papilla preparada con harina de maíz nixtamalizado sin sedimentación significativa ni con comportamiento de gel fuerte. Buscamos un sistema en el cual la gelificación de amilosa no fuera exhaustiva para que, ante la frecuencia impuesta a deformación constante, los módulos de pérdida y de almacenamiento cambiaran y no permanecieran constantes como en el caso de un gel fuerte.

Papilla con 12.5% de harina de la fracción malla 40

En la Figura 9 se observa un aumento de los módulos dinámicos con la frecuencia. Las ecuaciones que se ajustan a estos datos son $G' = 2.8 \times 10^3 \omega^{0.121}$ y $G'' = 4.04 \times 10^2 \omega^{0.185}$. De esta manera, es evidente que esta papilla no es un gel fuerte. Su aspecto físico fue el de un pudín.

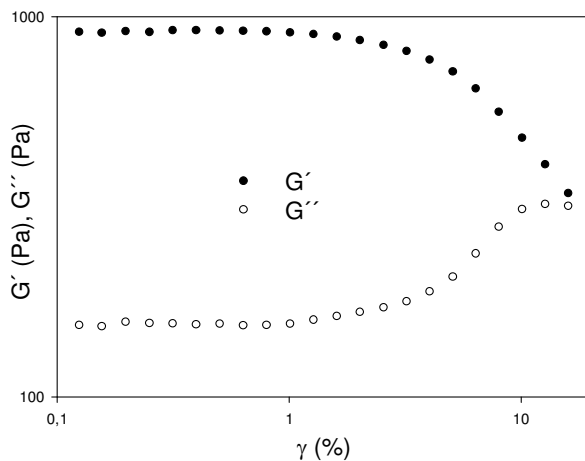


Figura 8. Barrido de deformación ($\omega = 1$ Hz) de una papilla con 10% de harina de la fracción malla 40.

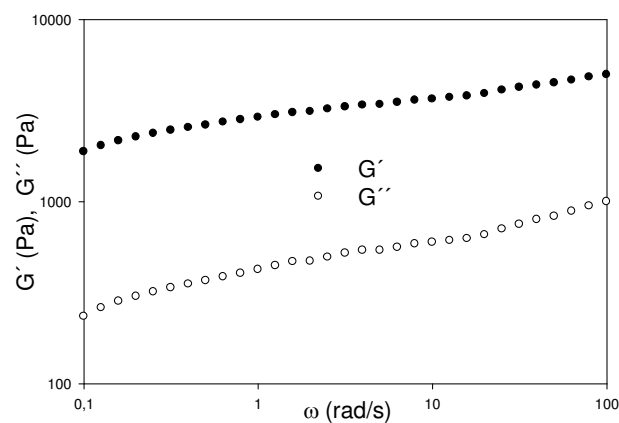


Figura 9. Barrido de frecuencia ($\gamma = 2\%$) de una papilla con 12.5% de harina de la fracción malla 40.

La Figura 10 muestra la dependencia del ángulo de desfase con la frecuencia. Este comportamiento puede ser interpretado como una tendencia al flujo al aumentar la frecuencia. La papilla con 12.5% de harina de la fracción malla 40 no sedimentó y no tiene un comportamiento de “gel” fuerte.

Papilla comercial

Analizamos un producto comercial de amplia aceptación por los infantes que comienzan la ingesta de sólidos. El análisis consistió en realizar la misma prueba de barrido de frecuencia en cizalla oscilatoria para introducir en nuestro trabajo un espectro mecánico “modelo” que brindara información cuantitativa de la tendencia al flujo “ideal” para poder comparar con las papillas preparadas en el laboratorio. Los movimientos que efectúa un adulto para masticar y tragar su alimento corresponden con valores de frecuencia entre 10 y 100 rad/s (Mouquet & Trèche 2001). Fijar este punto

como referencia fue muy útil, ya que brindó información más representativa para el proyecto del cual forma parte este trabajo.

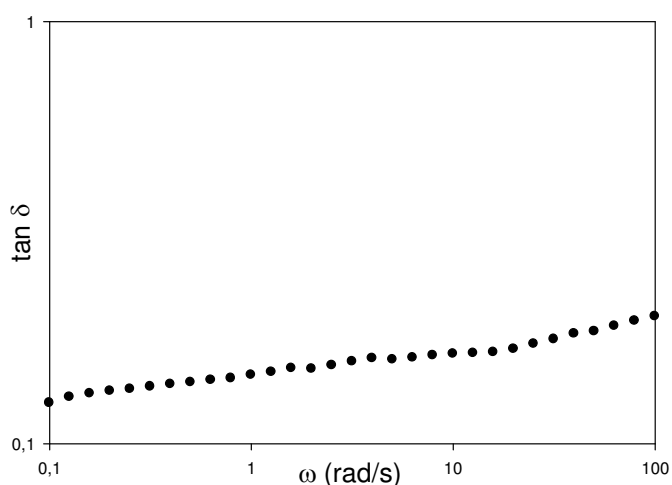


Figura 10. Cambio del ángulo de desfase con la frecuencia ($\gamma = 2\%$) de una papilla con 12.5% de harina de la fracción malla 40.

La Figura 11 muestra un comportamiento de “gel débil” para la papilla comercial, es decir, el módulo de almacenamiento no es muy superior al de pérdida a lo largo del intervalo de frecuencia en el que se situaron todos nuestros experimentos. Así también se observa como el módulo de pérdida G'' aumenta más rápidamente que el módulo de almacenamiento G' conforme avanzamos en la escala de frecuencia. En otras palabras, el carácter viscoso del material tiene un mayor aumento que el elástico, por lo que a altas frecuencias el comportamiento global del material es diferente que a valores pequeños. Suponiendo que los valores de frecuencia relacionados con la masticación de un infante recién destetado sean ligeramente menores de que los de un adulto, resultaría natural que este producto sea ampliamente aceptado puesto que su tendencia al flujo es muy marcada y comienza desde 1 rad/s como se puede observar en la Figura 12.

Obtuvimos así un espectro mecánico modelo que puede decirnos cuantitativamente, con funciones reológicas, qué tan alejados o cercanos estamos de un producto sensorialmente agradable. Por lo tanto, el siguiente paso fue evaluar el efecto del tamaño de partícula preparando papillas con 12.5% de harina pero de fracciones diferentes. Esta proporción produce una buena “consistencia” y es fácil de manejar experimentalmente para realizar los análisis. A partir de las fracciones malla 40 y 60, se prepararon dos papillas para comparar sus espectros mecánicos y posteriormente con la papilla comercial.

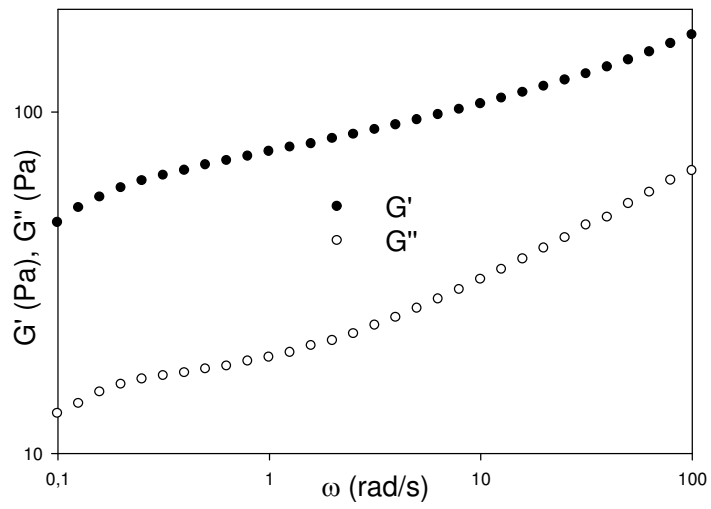


Figura 11. Barrido de frecuencia ($\gamma = 1\%$) de una papilla comercial.

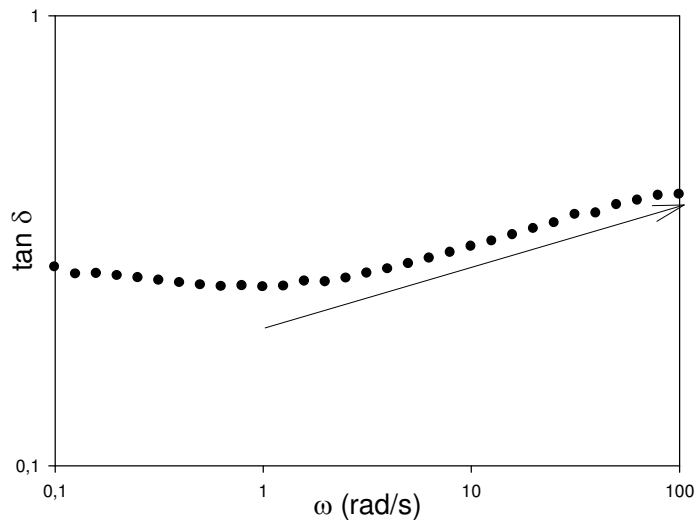


Figura 12. Cambio del ángulo de desfase con la frecuencia ($\gamma = 1\%$) de una papilla comercial. La flecha indica la zona de frecuencia en la que el material muestra un comportamiento de flujo.

EFEECTO DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA

La Figura 13 muestra que G' y G'' de la fracción malla 40 responden de manera similar al aumento de la frecuencia mientras que para la fracción malla 60 G'' tiende a crecer más rápidamente que G' al aumentar la frecuencia. Esto quiere decir que el comportamiento de la papilla preparada con la fracción malla 60 tiende más a fluir, lo cual se confirma con la dependencia del ángulo de desfase con la frecuencia (Figura 14). Las ecuaciones de ajuste de los módulos de almacenamiento para las mallas 40 y 60 son, respectivamente, $G' = 2.8 \times 10^3 \omega^{0.121}$ y $G' = 1.27 \times 10^3 \omega^{0.0727}$. Sin embargo, el crecimiento de G'' para ambas papillas es similar. Las ecuaciones de ajuste de los módulos de pérdida para las mallas 40 y 60 son, respectivamente, $G'' = 4.04 \times 10^2 \omega^{0.185}$ y $G'' = 1.227 \times 10^2 \omega^{0.18}$.

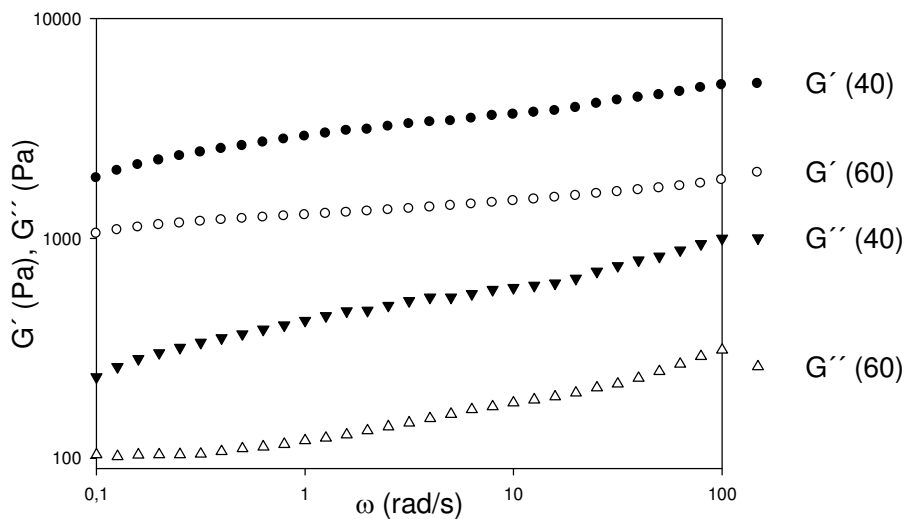


Figura 13. Barrido de frecuencia ($\gamma = 1\%$) para dos papillas con 12.5% de harina de las fracciones malla 40 y 60.

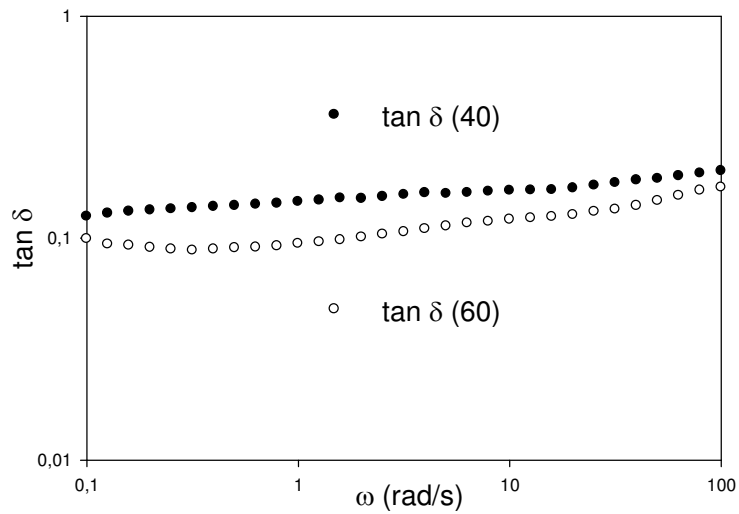


Figura 14. Cambio del ángulo de desfase con la frecuencia ($\gamma = 1\%$) para dos papillas con 12.5% de harina de las fracciones malla 40 y 60.

En la Figura 14 se aprecia como el uso de la fracción 60 (0.250 mm) le confiere al material un carácter ligeramente más elástico si se compara con un tamaño de partícula mayor utilizando la fracción malla 40 (0.425 mm). A través de las pruebas de cizalla oscilatoria, fue posible apreciar que el refinamiento del harina podría ser benéfico para igualar respuestas o comportamientos ante un estímulo determinado.

Las Figuras 15, 16 y 17 muestran el efecto del tamaño de partícula a concentración constante de harina en un barrido de frecuencia. La respuesta al aumento de la frecuencia de la papilla con 12.5% de harina de la fracción malla 60 tiene mayor similitud con la respuesta de la papilla comercial.

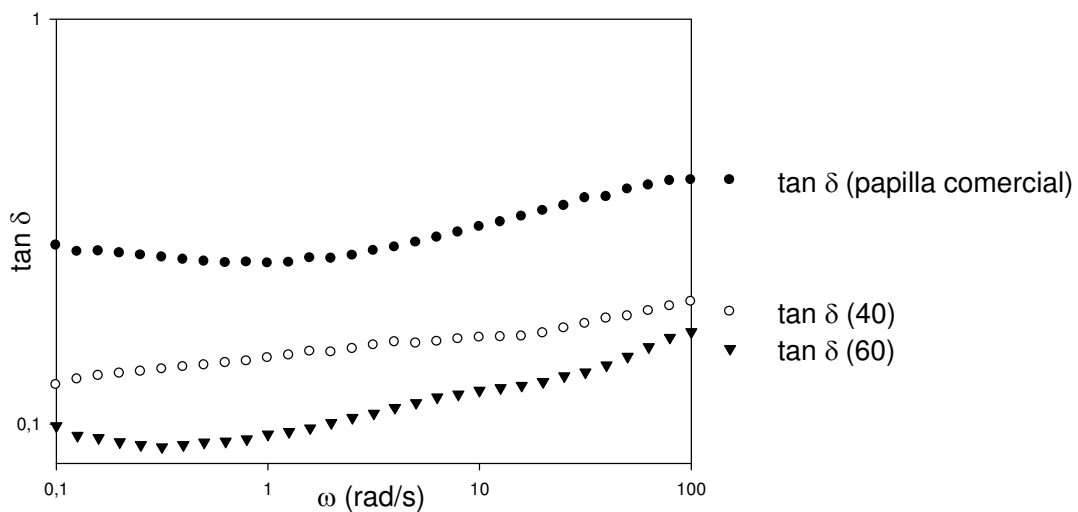


Figura 15. Cambio del ángulo de desfase con la frecuencia ($\gamma = 1\%$) para papillas con 12.5% de harina de las fracciones malla 40, 60 y una papilla comercial.

En la Figura 16 se muestra que en el intervalo de frecuencia entre 0.1 y 1 rad/s la respuesta de la papilla con 12.5% de harina de la fracción malla 40 responde de manera diferente al aumentar de la frecuencia, mientras la respuesta de la papilla con fracción malla 60 responde de manera similar a la papilla comercial.

En la Figura 17 eliminamos el ángulo de desfase de la fracción malla 40 y cortamos la escala de las ordenadas para mostrar que la dependencia de $\tan \delta$ con respecto a la frecuencia es muy similar entre la papilla comercial y la papilla con 12.5% de harina de la fracción malla 60. Esto significa que, aunque de consistencias diferentes macroscópicamente perceptibles, la respuesta viscoelástica de ambos alimentos es parecida y lo único que establece la diferencia es el carácter elástico más marcado en la papilla preparada en el laboratorio.

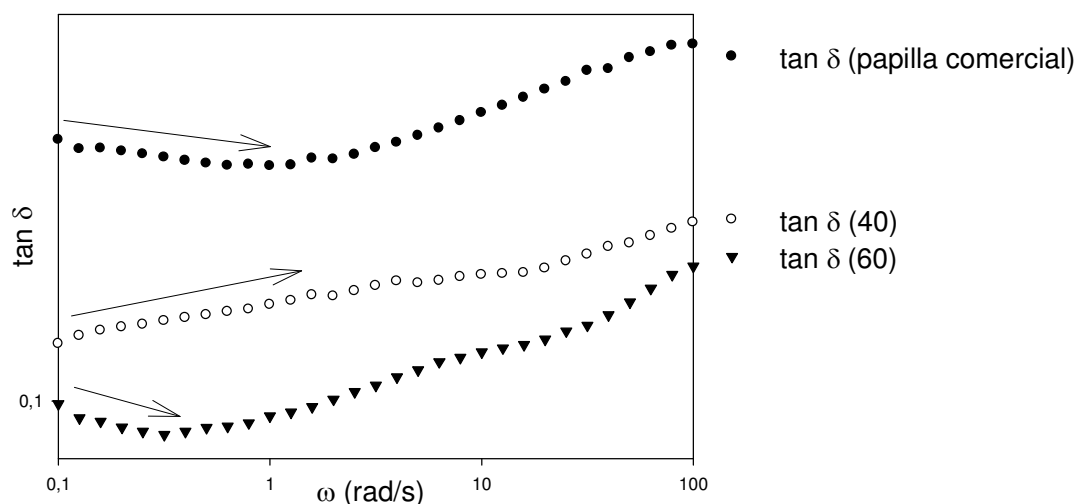


Figura 16. Variación del ángulo de desfase con la frecuencia ($\gamma = 1\%$) para una papilla comercial y papillas con 12.5% de harina de las fracciones malla 40, 60.

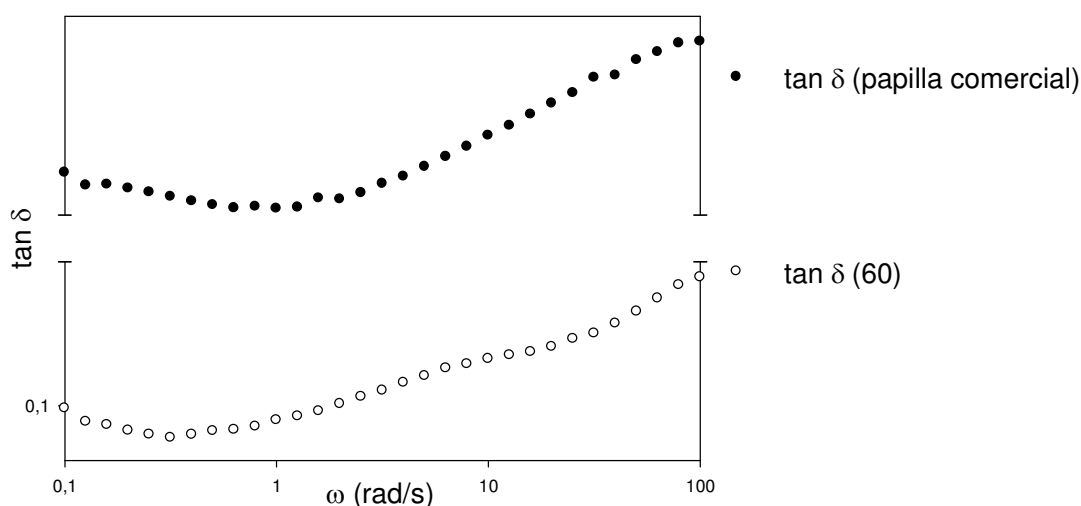


Figura 17. Variación del ángulo de desfase con la frecuencia ($\gamma = 1\%$) para la papilla con 12.5% de harina de la fracción malla 60 y una papilla comercial.

En resumen, la papilla comercial tiene un comportamiento tipo “gel débil” en la cual el módulo de almacenamiento no es muy superior al de pérdida y el ángulo de desfase es en promedio 16.3° , mientras que las papillas preparadas en el laboratorio muestran un comportamiento característico de un gel más estructurado, es decir, el módulo de almacenamiento es muy superior al de pérdida, ambos son prácticamente independientes de la frecuencia y el ángulo de desfase promedio es menor, 6.45° , para la fracción malla 60 y 8.9° para la fracción malla 40. Así, se pretende predecir mediante pruebas fundamentales si la consistencia de una papilla será aceptada por un niño en etapa de destete y reducir el número de pruebas sensoriales en los estudios para desarrollar nuevos alimentos de complemento. Partimos del espectro mecánico de un alimento considerado referencia tomando en cuenta simplemente su gran distribución en el mercado. Sin embargo, pueden existir otros criterios de evaluación para fijar un estándar considerando también la experiencia en el análisis sensorial de quienes interaccionan en diversas comunidades para promover la ingesta de nuevos productos.

Papilla con 11.5% de harina

Pensando en las posibilidades de refinar el harina y la determinación de los tamaños de partícula óptimos para desarrollar el alimento ideal, realizamos un pequeño estudio adicional disminuyendo la concentración de harina hasta 11.5%. No debemos perder de vista que no se exploró con detenimiento la concentración frontera, presumiblemente menor de 12.5%, porque de hacerlo, nos hubiéramos alejado aún más del aporte

nutrimental necesario. Mediante la comparación mostrada en la Figura 17, brindamos información adicional sobre la influencia del tamaño de partícula a través de pruebas reológicas fundamentales. Preparamos una papilla con 11.5% de harina, sin importar por el momento el compromiso con la densidad energética de nuestro alimento, para evaluar las tendencias de flujo a concentraciones menores, ya que una sugerencia primaria sería una mayor tendencia al flujo si el gel no ha sido completamente formado o estamos apenas por arriba del valor de concentración donde ocurre la formación del gel.

En la Figura 18 se puede apreciar, resaltado con un círculo, que a frecuencias altas, la papilla con 12.5% de harina de la fracción malla 60 tiende a fluir más que con 12.5% de la fracción malla 40 y 11.5% con malla 40. Recordemos que fue esta misma papilla con 12.5% de la fracción malla 60 la que presentó la respuesta mas similar a la de la papilla comercial aunque su carácter elástico sea mayor que el de la fracción malla 40 a la misma concentración.

Con todo lo anterior, se sugiere que la reometría puede ser utilizada como una herramienta adicional en la búsqueda de papillas sensorialmente más agradables y de mayor aporte energético sirviendo como un punto de referencia y probablemente de toma de decisiones antes de emprender la evaluación de un nuevo producto en el trabajo de campo.

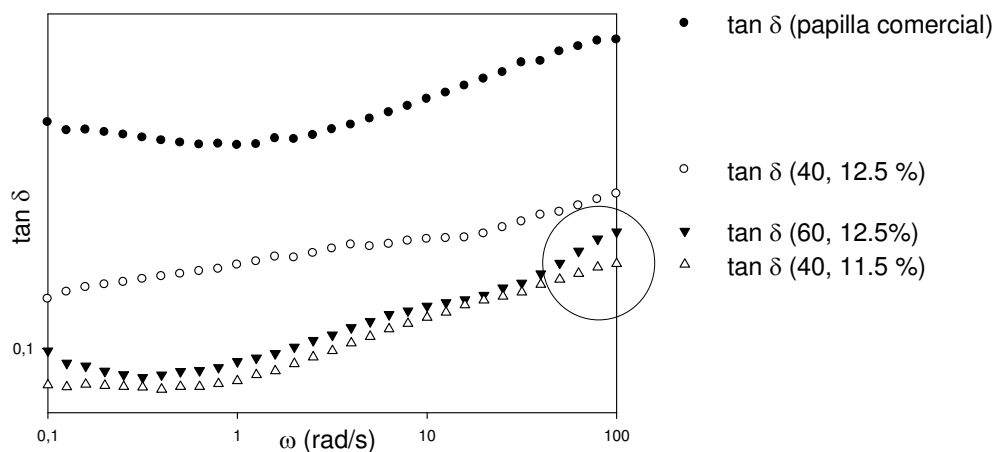


Figura 18. Cambio del ángulo de desfase con la frecuencia ($\gamma = 1\%$) para la papilla comercial, la papilla con 12.5% de harina de la fracción malla 40, 12.5% de harina de la fracción malla 60 y 11.5% de harina de la fracción malla 40.

CONCLUSIONES

La proporción harina-agua afecta de manera sustancial las propiedades viscoelásticas de las papillas preparadas con harina de maíz nixtamalizado. Los materiales que pueden ser preparados asignando diferentes proporciones de los dos componentes van desde las suspensiones semi-diluidas hasta los geles.

Las papillas preparadas en este trabajo con harina de maíz nixtamalizado son materiales que tienen un comportamiento reológicamente bien definido, por lo que se sugiere ampliar los estudios con otros alimentos de complemento tomando en cuenta la estandarización llevada a cabo en nuestro trabajo para la elaboración de los productos.

El tamaño de partícula tiene una menor influencia en el producto final en términos cuantitativos, pero no en los cualitativos. Su consideración será importante cuando se busque un producto con características de flujo definidas.

Existe una gama de consistencias que es posible obtener dependiendo de la cantidad de harina y tamaño de partícula, lo cual ofrece la posibilidad de preparar papillas con diferentes “texturas” y grados de viscoelasticidad.

A través del examen de las propiedades viscoelásticas es posible determinar qué proporciones y tamaños de partícula convienen para aproximar los productos a base de harina de maíz nixtamalizado a los productos comerciales si así se desea.

Es posible desarrollar sistemas bifásicos con diferente grado de elasticidad y viscosidad a través de la combinación de variables como la proporción de ingredientes y el tamaño de partícula obteniendo información absoluta a través de pruebas reológicas fundamentales.

REFERENCIAS

- Doublier, J.L. (1981). Rheological Studies on Starch – Flow Behavior of Wheat Starch Pastes. *Starch/Stärke*, 33(12), 415 – 420.
- Ferry, J.D. (1980). *Viscoelastic Properties of Polymers*. John Wiley & Sons Inc., New York.
- Gimbi, D.M., Kamau, D. & Almazan, M. (1997). Improved corn and millet based weaning foods: Formulation, viscosity, and nutritional and microbial quality. *Journal of Food Processing and Preservation*, 21(6), 507 – 524.
- Kikafunda, J. K., Walker, A. F., Abeyasekera, S. (1997). Optimising viscosity and energy of maize porridges for child weaning in developing countries. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 48, 401 – 409.
- Lorri, W. & Svanberg, U. (1993). Lactic acid-fermented cereal gruels: viscosity and flour concentration *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 44(3), 207 – 213.
- Mouquet, C. & Trèche, S. (2001). Viscosity of gruels for infants: a comparison of measurement procedures. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 52, 389-400.
- Nout, M. J. R. & Ngoddy, P.O. (1997). Technological aspects of preparing affordable fermented complementary foods, *Food Control*, 8(5/6), 279 – 287.
- Onyango, C., Okoth, M. W. & Mbugua, S. K. (2003), The pasting behaviour of lactic-fermented and dried uji (an East African sour porridge). *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 83, 1412 – 1418.
- Svanberg, U. & Lorri, W. (1997). Fermentation and nutrient availability. *Food Control*, 8, 319-327.
- Tecante, A., (2005). Viscoelasticity, en *Food Engineering*, Barbosa-Cánovas, G.V. (ed) *Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS)*, UNESCO, pp. 285-303.
- Trèche, S. & Mbome, I. (1999). Viscosity, energy, density and osmolality of gruels for infants prepared from locally produced commercial flours in some developing countries. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 50(2), 117 - 125.