

# UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR D'ENGINYERIA AGRONÒMICA  
I DEL MEDI NATURAL



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

USO DE HARINA DE CHONTADURO COMO INGREDIENTE EN LA FORMULACIÓN  
DE PANCAKES: EFECTO DE LA TEMPERATURA Y LA APLICACIÓN DE  
ULTRASONIDOS EN EL PROCESO DE OBTENCIÓN DE LA HARINA Y SU IMPACTO EN  
LAS PROPIEDADES MICROESTRUCTURALES Y REOLÓGICAS DE LA MASA

TRABAJO FIN DE GRADO EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE LOS ALIMENTOS

ALUMNA: Beatriz Martínez Artés

TUTORAS: Gemma Moraga Ballesteros  
Amparo Quiles Chuliá

DIRECTORA EXPERIMENTAL: M<sup>a</sup> Empar Llorca Martínez

CURSO ACADÉMICO: 2020/2021

Valencia, marzo de 2021

## RESUMEN

### **USO DE HARINA DE CHONTADURO COMO INGREDIENTE EN LA FORMULACIÓN DE PANCAKES: EFECTO DE LA TEMPERATURA Y LA APLICACIÓN DE ULTRASONIDOS EN EL PROCESO DE OBTENCIÓN DE LA HARINA Y SU IMPACTO EN LAS PROPIEDADES MICROESTRUCTURALES Y REOLÓGICAS DE LA MASA**

El chontaduro (*Bactris gasipaes*) es un fruto tropical de gran interés a nivel nutritivo, debido a su elevado contenido en proteínas y ácidos grasos insaturados y poliinsaturados, además de  $\beta$ -caroteno, precursor de vitamina A. Destaca la presencia de todos los aminoácidos esenciales y algunos minerales como el fósforo y el calcio. En este sentido, el objetivo del trabajo consistió en estudiar la inclusión de harina de chontaduro en la formulación de pancakes para contribuir a la mejora de sus características nutricionales. Se evaluó el efecto de la aplicación de ultrasonidos y de diferentes tratamientos térmicos sobre las propiedades microestructurales de la harina de chontaduro obtenida. A su vez, se estudió su impacto en las propiedades microestructurales y reológicas de las masas de pancake formuladas. Las harinas de chontaduro se obtuvieron empleando tres temperaturas de homogenización diferentes (60, 70 y 80°C). Posteriormente se dividieron en dos lotes, con y sin aplicación de ultrasonidos. Para el análisis de la microestructura se utilizó un microscopio óptico y un microscopio láser confocal de barrido. Para las medidas reológicas se utilizó un reómetro con geometría de placas paralelas, realizándose un ensayo de comportamiento al flujo y un ensayo oscilatorio de barrido de temperatura. Los resultados confirmaron que los ultrasonidos producen, de manera similar al tratamiento térmico, la rotura de componentes presentes en la harina como los glóbulos de grasa, estructuras celulares y los gránulos de almidón. En las masas de pancake se observó que los ultrasonidos favorecen la fusión entre la grasa y la proteína y la interacción entre los gránulos de almidón y las proteínas. Las muestras sometidas a ultrasonidos exhibieron diferencias significativas en el índice de consistencia y la viscosidad de las masas, mostrando un aumento de sus valores conforme aumentaba la temperatura de homogenización. Los tratamientos térmicos causaron la pregelatinización del almidón de las harinas, lo que tuvo consecuencias sobre los efectos ocasionados por el posterior tratamiento de ultrasonidos. Las muestras que contenían harina de chontaduro presentaron valores más altos de viscosidad que la muestra control (solo harina de trigo), mientras que esta última alcanzaba una mayor rigidez en el producto tras someter la masa a elevadas temperaturas. La presencia de harina de chontaduro provocó un aumento en la temperatura a la que ocurre la gelatinización del almidón procedente del trigo y el resto de cambios físicos que ocurren durante el calentamiento de las masas, siendo más marcado en las formulaciones en las que se empleó harina sometida a ultrasonidos.

**PALABRAS CLAVE:** chontaduro, harina, pancake, ultrasonidos, reología, microestructura

**ALUMNA:** Beatriz Martínez Artés

**VALENCIA, marzo de 2021**

**TUTORAS:** Gemma Moraga Ballesteros

Amparo Quiles Chuliá

**DIRECTORA EXPERIMENTAL:** M<sup>a</sup> Empar Llorca Martínez

## ABSTRACT

### **USE OF CHONTADURO FLOUR AS AN INGREDIENT IN PANCAKE FORMULATION: EFFECT OF TEMPERATURE AND THE APPLICATION OF ULTRASOUND ON THE PROCESS OF OBTAINING FLOUR AND ITS IMPACT ON THE MICROSTRUCTURAL AND RHEOLOGICAL PROPERTIES OF DOUGH**

The chontaduro (*Bactris gasipaes*) is a tropical fruit of great nutritional interest, due to its high content of proteins and unsaturated and polyunsaturated fatty acids, as well as  $\beta$ -carotene, a precursor of vitamin A. It has a notable presence of all the essential amino acids and some minerals such as phosphorus and calcium. In this sense, the aim of the research was to study the inclusion of chontaduro flour in the formulation of pancakes to contribute to the improvement of their nutritional characteristics. The effect of the application of ultrasound and different thermal treatments on the microstructural properties of the chontaduro flour obtained was evaluated. At the same time, their impact on the microstructural and rheological properties of the formulated pancake doughs was studied. The chontaduro flours were obtained using three different homogenization temperatures (60, 70 and 80°C). They were then divided into two batches, with and without the application of ultrasound. An optical microscope and a scanning confocal laser microscope were used for microstructural analysis. For the rheological measurements, a rheometer with parallel plate geometry was used and a flow behaviour test and an oscillatory temperature sweep test were carried out. The results confirmed that ultrasound produces, similar to heat treatment, the breakdown of flour components such as fat globules, cell structures and starch granules. In pancake doughs, it was observed that ultrasound promotes the fusion between fat and protein and the interaction between starch granules and proteins. The samples subjected to ultrasound exhibited significant differences in the consistency index and viscosity of the doughs, showing an increase in their values as the homogenization temperature increased. The heat treatments caused pre-gelatinization of the starch in the flours, which had an impact on the effects caused by the subsequent ultrasound treatment. The samples containing chontaduro flour showed higher viscosity values than the control sample (wheat flour only), while the latter reached a higher stiffness in the product after subjecting the dough to high temperatures. The presence of chontaduro flour caused an increase in the temperature at which the gelatinization of the wheat starch and the other physical changes that occur during the heating of the doughs take place. This increase was more noticeable in the formulations using ultrasonically treated flour.

**KEYWORDS:** chontaduro, flour, pancake, ultrasound, rheology, microstructure

**STUDENT:** Beatriz Martínez Artés

**VALENCIA, March 2021**

**ADVISORS:** Gemma Moraga Ballesteros

Amparo Quiles Chuliá

**RESEARCH DIRECTOR:** M<sup>a</sup> Empar Llorca Martínez

## RESUM

### **ÚS DE FARINA DE CHONTADURO COM A INGREDIENT EN LA FORMULACIÓ DE PANCAKES: EFECTE DE LA TEMPERATURA I L'APLICACIÓ D'ULTRASONS EN EL PROCÉS D'OBTENCIÓ DE LA FARINA I EL SEU IMPACTE EN LES PROPIETATS MICROESTRUCTURALS I REOLÒGIQUES DE LA MASSA**

El chontaduro (*Bactris gasipaes*) és un fruit tropical de gran interès a nivell nutritiu, ja que conté elevats continguts de proteïnes i àcids grassos insaturats i poliinsaturats, a més de  $\beta$ -caroté, precursor de vitamina A. Destaca la presència de tots els aminoàcids essencials i alguns minerals com el fòsfor i el calci. En aquest sentit, l'objectiu del treball va consistir a estudiar la inclusió de farina de chontaduro en la formulació de pancakes per a contribuir a la millora de les seues característiques nutricionals. Es va avaluar l'efecte de l'aplicació d'ultrasons i de diferents tractaments tèrmics sobre les propietats microestructurals de la farina de chontaduro obtinguda. Al seu torn, es va estudiar el seu impacte en les propietats microestructurals i reològiques de les masses de pancake formulades. Les farines de chontaduro es van obtenir emprant tres temperatures d'homogeneïtzació diferents (60, 70 i 80°C). Posteriorment es van dividir en dos lots, amb i sense aplicació d'ultrasons. Per a l'anàlisi de la microestructura es va utilitzar un microscopi òptic i un microscopi làser confocal d'escombratge. Per a les mesures reològiques es va utilitzar un reòmetre amb geometria de plaques paral·leles, realitzant-se un assaig de comportament al flux i un assaig oscil·latori d'escombratge de temperatura. Els resultats van confirmar que els ultrasons produeixen, de manera similar al tractament tèrmic, el trencament de components presents en la farina com els glòbuls de greix, estructures cel·lulars i els grànuls de midó. En les masses de pancake es va observar que els ultrasons afavoreixen la fusió entre el greix i la proteïna i la interacció entre els grànuls de midó i les proteïnes. Les mostres sotmeses a ultrasons van exhibir diferències significatives en l'índex de consistència i la viscositat de les masses, mostrant un augment dels seus valors conforme augmentava la temperatura d'homogeneïtzació. Els tractaments tèrmics van causar la pregelatinització del midó de les farines, la qual cosa va tindre conseqüències sobre els efectes ocasionats pel posterior tractament d'ultrasons. Les mostres que contenien farina de chontaduro van presentar valors més alts de viscositat que la mostra control (només farina de blat), mentre que aquesta última aconseguia una major rigidesa en el producte després de sotmetre la massa a elevades temperatures. La presència de farina de chontaduro va provocar un augment en la temperatura a la qual ocorre la gelatinització del midó procedent del blat i la resta de canvis físics que ocorren durant el calfament de les masses, sent més marcat en les formulacions en les quals es va emprar farina sotmesa a ultrasons.

**PARAULES CLAU:** chontaduro, farina, pancake, ultrasons, reologia, microestructura

**ALUMNA:** Beatriz Martínez Artés

**VALÈNCIA, març de 2021**

**TUTORES:** Gemma Moraga Ballesteros

Amparo Quiles Chuliá

**DIRECTORA EXPERIMENTAL:** M<sup>a</sup> Empar Llorca Martínez

## ÍNDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	1
1.1. El fruto del chontaduro .....	1
1.2. Harina de chontaduro .....	1
1.3. Técnicas de ultrasonidos .....	4
1.4. Mejora nutricional y nuevas tendencias de mercado .....	5
1.5. Análisis de la microestructura .....	7
1.6. Medida de la reología .....	8
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	9
<b>3. MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	10
3.1. Materias primas .....	10
3.1.1. Obtención de las harinas de chontaduro .....	10
3.2. Elaboración de la masa para pancakes .....	11
3.3. Análisis .....	12
3.3.1. Estudio de la microestructura .....	12
3.3.1.1. Estudio de la microestructura de la harina de chontaduro .....	12
3.3.1.2. Estudio de la microestructura de la masa .....	13
3.3.2. Medidas reológicas de la masa .....	13
3.3.2.1. Análisis estadístico .....	14
<b>4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	15
4.1. Análisis de la microestructura .....	15
4.1.1. Microscopía óptica .....	15
4.1.2. Microscopía láser confocal de barrido (CLSM) .....	18
4.2. Caracterización reológica de las masas de pancake .....	22
4.2.1. Estudio del comportamiento al flujo .....	22
4.2.2. Barrido de temperatura .....	25
<b>5. CONCLUSIONES</b> .....	30
<b>6. REFERENCIAS</b> .....	31

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Valores de contenidos proximales de las harinas de chontaduro y de sémola de trigo duro (g/100g de muestra) $\pm$ SD .....	2
<b>Tabla 2.</b> Ingredientes para la elaboración de los pancakes .....	10
<b>Tabla 3.</b> Composición porcentual y cantidades para la elaboración de 25g de masa de pancakes .....	11
<b>Tabla 4.</b> Parámetros K y n para los barridos ascendente y descendente y predicción de la viscosidad de las muestras a un gradiente de velocidad ( $\dot{\gamma}$ ) de $100 \text{ s}^{-1}$ .....	24

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Imágenes obtenidas mediante microscopía óptica de muestras de harina de trigo y de las muestras de harina de chontaduro con homogeneización a 60, 70 y 80°C sin ultrasonidos (C) y con ultrasonidos (U). (a, d, h, l, o, s, w) muestras en campo claro sin tinción; (b, e, i, m, p, t, x) muestras en campo claro con tinción de azul de toluidina; (c, f, j, n, q, u, y) muestras con luz polarizada; (g, k, ñ, r, v, z) muestras con lámpara de fluorescencia .....	17
<b>Figura 2.</b> Imágenes obtenidas mediante microscopía laser confocal de barrido de la muestra de la masa de pancake control (sin harina de chontaduro) y de las muestras de la masa de pancake con harina de chontaduro homogeneizada a 60, 70 y 80°C sin ultrasonidos (C) y con ultrasonidos (U). C – N (a, c, e, g, i, k, m): tinción con Calcofluor White y Nile Red; F – N (b, d, f, h, j, l, n): tinción con FITC y Nile Red .....	20
<b>Figura 3.</b> Relación entre el esfuerzo cortante ( $\sigma$ ) y el gradiente de velocidad ( $\dot{\gamma}$ ) para la muestra control y las muestras con harina de chontaduro, con y sin ultrasonidos, homogeneizadas a 60, 70 y 80°C .....	22
<b>Figura 4.</b> Relación entre el módulo complejo de viscosidad ( $G^*$ ) y la temperatura para la muestra control y las muestras con harina de chontaduro, con y sin ultrasonidos, homogeneizadas a 60, 70 y 80°C .....	27
<b>Figura 5.</b> Relación entre el ángulo de desfase ( $\delta$ ) y la temperatura para la muestra control y las muestras con harina de chontaduro, con y sin ultrasonidos, homogeneizadas a 60, 70 y 80°C .....	29

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. El fruto del chontaduro

El chontaduro (*Bactris Gasipaes* Kunth) es el fruto de una palma perteneciente a la familia de las arecáceas. Tiene su origen en Sudamérica y se consume de manera habitual en países como Colombia, Ecuador o Costa Rica, entre otros. En función del país, este fruto recibe hasta 20 nombres diferentes, los más habituales son chonta o chontaduro, pijibay y cachypai (Patiño, 2002). Actualmente, el chontaduro se cultiva para la obtención de su fruto, así como de palmito. La palma produce grandes racimos de entre 50-100 frutos con el endocarpio amarillo, rojo o verde, en función de la variedad (Leterme *et al.*, 2005). Este fruto resulta interesante a nivel nutritivo, pues posee elevados niveles de  $\beta$ -caroteno, un precursor de la vitamina A, proteínas y ácidos grasos insaturados y poliinsaturados (Dussán-Sarria *et al.*, 2019b), además de una rica composición de minerales, entre los que destacan el fósforo, el calcio, el hierro, el cromo, el selenio y el potasio. Asimismo, de acuerdo con Yuyama *et al.* (2003), el fruto posee los 8 aminoácidos esenciales y muchos de los no esenciales, aunque la metionina y el triptófano se encuentran en bajas cantidades. El chontaduro también destaca por contener compuestos antioxidantes como los compuestos fenólicos, que pueden tener efectos beneficiosos sobre la salud (Reyes-Giraldo *et al.*, 2020). Por todo ello se puede considerar que el chontaduro es un fruto con un gran potencial para la elaboración de productos de mejora nutricional. Sin embargo, el fruto en estado crudo presenta algunos factores antinutricionales. En primer lugar, el fruto crudo contiene cristales de oxalato de calcio, que se acumulan principalmente debajo del exocarpio (Mora-Urpí *et al.*, 1997). El segundo factor antinutricional se corresponde con la presencia de inhibidores de la tripsina, lo cual provoca una disminución de la digestibilidad de las proteínas del alimento y, por tanto, de su aprovechamiento (Murillo *et al.*, 1983). Es por esta razón que el hombre, a diferencia de algunos animales, sólo puede consumirlo cocinado.

### 1.2. Harina de chontaduro

Al igual que con otras frutas, es posible obtener harina a partir del chontaduro. En este contexto, existen diversos estudios en relación con la obtención de harina y de almidón a partir del chontaduro y las propiedades de estos derivados. Algunos de estos estudios describen la necesidad de conocer las propiedades funcionales de las harinas para determinar su aplicación en alimentos y los procesos industriales aplicables a las mismas (Valencia *et al.*, 2015). En esta línea, otros estudios sugieren la importancia de conocer las propiedades mencionadas, entre las que se encuentran las propiedades físicas y granulométricas, para la estandarización de productos y la identificación de los parámetros legales respecto al tamaño de las partículas (Dussán-Sarria *et al.*, 2019b y Rios *et al.*, 2018). Es por ello por lo que resulta importante estudiar sus características, así como las consecuencias de su adición a diferentes productos.

En el **Real Decreto 677 de 2016** se establecen las normas básicas de calidad para la elaboración y comercialización de las harinas procedentes de cereales. En el documento se clasifican y definen diferentes tipos de harinas de cereales procesadas. Puesto que no existe legislación específica para las harinas provenientes de frutas y verduras, este Real Decreto puede ser orientativo a la hora de elaborar una harina procedente del chontaduro o de otras frutas o vegetales.

Respecto a la composición, la Tabla 1 muestra el contenido proximal de la harina de chontaduro respecto a la de trigo según Dussán-Sarria *et al.* (2019a).

**Tabla 1.** Valores de contenidos proximales de las harinas de chontaduro y de sémola de trigo duro (g/100g de muestra)  $\pm$ SD

Harina	Humedad	Proteína	Cenizas	Grasa total	Fibra cruda	Carbohidratos
<b>Chontaduro</b>	11,54 $\pm$ 0,23	4,50 $\pm$ 0,51	1,8 $\pm$ 0,22	8,73 $\pm$ 0,32	0,10 $\pm$ 0,01	73,43 $\pm$ 1,51
<b>Trigo durum</b>	11,01 $\pm$ 0,23	13,30 $\pm$ 0,32	1,1 $\pm$ 0,10	1,70 $\pm$ 0,20	2,40 $\pm$ 0,33	77,60 $\pm$ 2,0

Fuente: Dussán-Sarria *et al.* (2019a)

En comparación con la harina de trigo, la harina de chontaduro contiene menores valores de proteína y fibra cruda, mientras que posee mayores valores de grasa. Sin embargo, aunque la cantidad de proteína y fibra en la harina de chontaduro es inferior a la del trigo, la harina de chontaduro es rica en carbohidratos, ácidos grasos, vitaminas, minerales y aminoácidos esenciales, como la lisina, que la convierten en un alimento con buenas cualidades nutritivas para la sustitución de la harina de trigo en algunos productos.

García-Jiménez y Vázquez (2016) estudiaron la relación entre los índices de solubilidad, la absorción de agua y el poder de hinchamiento con la capacidad de modificación de los almidones por tratamientos termomecánicos. Esto resulta vital, pues el almidón es el componente orgánico que se encuentra en mayor proporción en las harinas vegetales. De esta manera, un mayor nivel en los índices de solubilidad, absorción de agua y poder de hinchamiento indica una mayor capacidad del almidón para la formación de geles en presencia de calor y exceso de agua. Hablando concretamente de la obtención de harina de chontaduro, Dussán-Sarria *et al.* (2019b) investigaron las diferentes propiedades funcionales relacionadas con la gelatinización de almidones de diferentes harinas. La harina de chontaduro, en comparación con otras harinas vegetales como la harina de quinoa, contiene un porcentaje de almidón mayor y resultó tener propiedades más favorables para la elaboración de alimentos que precisan de la gelatinización de almidón. El artículo de revisión de Valencia *et al.* (2015) recoge algunos ejemplos de la utilización de la harina de chontaduro y del almidón procedente de la misma. Algunos de estos ejemplos son el gran potencial de estos derivados en la elaboración de pastas alimenticias (De Oliveira *et al.*, 2006), su utilización en la elaboración de bebidas alcohólicas artesanas (Andrade *et al.*, 2003), en la obtención de sustratos bacterianos para la producción de formilasa (Oliveira *et al.*, 2007) y en el desarrollo de alimentos funcionales con elevados contenidos en carotenoides y fibra (Rojas-Garbanzo *et al.*, 2012).

La obtención de harinas a partir de cereales es un proceso bastante simple, basta con realizar la molienda del endospermo, generalmente, del cereal en cuestión hasta alcanzar una textura en forma de polvo. En función de su uso final se muele con mayor o menor intensidad para obtener un polvo más fino. En el caso del chontaduro y de otras frutas, en el proceso de obtención se suceden algunos tratamientos previos antes de la molienda. Por ejemplo, en la investigación de Zamora (2012), la materia prima se lava y trocea antes de sufrir una precocción en agua a 80°C. Seguidamente se deja secar, primero al aire libre y después en un secador de bandejas con circulación de aire caliente para, finalmente, realizar una molienda en dos etapas con ayuda de un molinillo manual y un molino pulverizador. Por último, la harina debe envasarse y almacenarse en las condiciones adecuadas con el fin de conservar sus características el mayor tiempo posible.

No obstante, las harinas pueden sufrir otros tipos de tratamientos, como puede ser la aplicación de temperatura durante su homogeneización o el empleo de técnicas de ultrasonidos. Un tratamiento térmico consiste en la aplicación de calor a un producto durante su proceso de elaboración. La principal finalidad de un tratamiento térmico suele ser la conservación del producto por medio de la destrucción de patógenos y la inactivación de microorganismos y enzimas que lo puedan deteriorar. Este es el caso de la pasteurización y la esterilización, cuya diferencia reside en la intensidad del tratamiento térmico. Sin embargo, existen otros tratamientos térmicos, como el escaldado, cuyo fin no es la conservación del alimento, sino que se trata de un tratamiento previo a otras operaciones de conservación, como el secado. También se puede aplicar calor durante alguna de las etapas para la obtención de la harina, como la homogeneización. Es posible aplicar tratamientos térmicos suaves a alimentos como las harinas de chontaduro, los cuales pueden tener importantes consecuencias sobre uno de sus componentes principales y de más interés en este tipo de alimento, el almidón. El resultado principal al aplicar calor, siempre que haya presencia de agua y en función de la temperatura aplicada, es la gelatinización del almidón en mayor o menor medida, aunque pueden darse otras consecuencias. La gelatinización del almidón es un proceso que tiene como consecuencia la pérdida de orden molecular en el gránulo, provocando cambios irreversibles en la capacidad de absorción del agua, el hinchazón del gránulo y el aumento de su solubilidad, la fusión de la región cristalina, el aumento en la viscosidad y la pérdida de birrefringencia (Donovan, 1979). Uno de los factores más importantes a tener en cuenta a la hora de realizar un tratamiento térmico es la temperatura, así como el tiempo de aplicación, pues estos van a tener consecuencias directas sobre el alimento tratado. Una excesiva temperatura o tiempo de tratamiento pueden provocar el deterioro a nivel organoléptico del alimento, disminuyendo su calidad. Por otra parte, estos mismos factores a un nivel elevado pueden terminar por provocar la cocción del alimento. En algunos casos, como el chontaduro, esta consecuencia puede resultar de utilidad dado que por sus factores antinutricionales no debe consumirse crudo.

Por otra parte, se debe tener en cuenta la posibilidad de utilizar una mezcla de harinas para la obtención de un producto, este factor es de gran importancia por su influencia en la textura y en la digestibilidad (Dussán-Sarria *et al.*, 2019b). Así, la mezcla

de harina de chontaduro y harina de trigo puede resultar de interés a la hora de obtener o cambiar la formulación de algunos productos.

### 1.3. Técnicas de ultrasonidos

Los ultrasonidos son una forma de energía de vibración mecánica en un sólido o fluido a una frecuencia superior a la frecuencia máxima audible para el oído humano (16–18 kHz) (Jayasooriya *et al.* 2004). Las técnicas de ultrasonidos representan un tratamiento emergente con un amplio campo de actuación en la industria alimentaria, con utilidad en procesos de filtración, homogeneización, esterilización o secado, entre otros (Dolatowski *et al.*, 2007). Además, esta técnica tiene diversas ventajas respecto a su uso en el procesamiento de alimentos como, por ejemplo, mezcla y micromezcla más efectivas, transferencia de masa y energía más rápida, gradientes térmicos y de concentración reducidos, temperatura reducida, extracción selectiva y tamaño de equipo reducido (Chemat *et al.*, 2011). La aplicación de ultrasonidos en algunos alimentos puede resultar de interés, ya que permite reducir el tiempo y la temperatura necesarias y, en consecuencia, el consumo energético de la operación y la calidad funcional de dichos alimentos (Majid *et al.*, 2015). La revisión de Gamboa-Santos *et al.* (2012) recoge conclusiones similares sobre la utilidad de los ultrasonidos de potencia en pretratamientos y en la deshidratación de frutas y hortalizas. En los numerosos estudios realizados sobre el campo de los ultrasonidos, queda patente su eficacia para la inactivación de enzimas y la aceleración de la operación de secado, así como un bajo efecto térmico, que puede ayudar a la conservación de los componentes termolábiles de la materia prima.

La operación de secado permite la conservación de los alimentos mediante un incremento de su estabilidad debido a la disminución de la actividad de agua. De esta manera, se consigue limitar la actividad biológica y los cambios fisicoquímicos que pueden producirse durante el almacenamiento. Una ventaja adicional es que la operación produce una pérdida de peso, con lo que favorece su transporte y necesita un menor espacio de almacenamiento. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que, en función de la técnica y la temperatura de secado, puede producirse una pérdida de calidad por cambios estructurales y bioquímicos (Campo-Vera *et al.*, 2018). En este mismo artículo de revisión, se recopilan diversos experimentos de secado con diferentes frutas y se recogen las consecuencias de realizar un pretratamiento con ultrasonidos. Las consecuencias principales son una disminución significativa del tiempo de secado, en función de la fruta, y un aumento tanto en la difusividad efectiva como en el coeficiente de transmisión de masa. Si se analizan casos concretos, Parada *et al.* (2012) estudiaron la aplicación de un pretratamiento con ultrasonidos previamente a la operación de secado convectivo de mora de Castilla. Se estudió el efecto de varios factores, llegando a la conclusión de que las variables más relevantes en cuanto a la velocidad de secado son la potencia de ultrasonido y la temperatura del aire. Además de la velocidad de secado, se estudiaron también los efectos del pretratamiento sobre las propiedades funcionales de la fruta, analizando las variables de potencia, tiempo de aplicación y temperatura. Únicamente esta última tuvo un efecto significativo sobre la retención de compuestos funcionales en el fruto. Por tanto, se puede afirmar que el

pretratamiento con ultrasonidos tiene un efecto relevante sobre el comportamiento del fruto durante el proceso de secado.

Sin embargo, como ya se ha comentado, los ultrasonidos tienen utilidad en otros procesos diferentes de la operación de secado. Resulta interesante recalcar el estudio de Velásquez-García *et al.* (2016), en el que estudiaron el efecto del pretratamiento con ultrasonidos sobre la extracción de compuestos bioactivos de mesocarpio de chontaduro mediante la técnica de fluidos supercríticos. Para las pruebas se utilizó harina obtenida a partir de mesocarpio de chontaduro. La aplicación de este pretratamiento no produjo cambios en el rendimiento de la extracción respecto a la extracción sin pretratamiento, sin embargo, sí produjo un descenso en el tiempo de extracción. Los extractos obtenidos se corresponden con carotenoides, especialmente  $\beta$ -caroteno. La actividad antioxidante del extracto que había sufrido pretratamiento resultó ser significativamente mayor a la del extracto sin pretratamiento, lo que demuestra que el pretratamiento con ultrasonidos es favorable a la extracción de compuestos bioactivos en extracciones con fluidos supercríticos. Estos resultados evidencian que los ultrasonidos no afectan al contenido de compuestos bioactivos, por lo que un tratamiento con ultrasonidos no destruirá los compuestos bioactivos presentes en un alimento y, por tanto, no disminuirá su valor saludable.

Uno de los aspectos más relevantes a tener en cuenta a la hora de utilizar técnicas de ultrasonidos es predecir el efecto que estos pueden tener sobre los compuestos más importantes del alimento que se va a tratar. En el caso de la harina de chontaduro, resulta fundamental estudiar el efecto que pueden tener los ultrasonidos sobre el almidón. De esta forma, Gélvez *et al.* (2016) demostraron que los ultrasonidos en harina de trigo retrasan la transición de fase de la gelatinización del almidón, por lo que aumenta la temperatura de gelatinización. Esto es consecuencia de los cambios producidos en la estructura amorfa y cristalina del gránulo de almidón. Por otra parte, Majzoobi *et al.* (2015) y Manchun *et al.* (2012) concluyeron que mayores tiempos y temperaturas en el tratamiento de ultrasonidos provocan la rotura de los gránulos de almidón, afectando a sus propiedades funcionales. La degradación del gránulo es responsable del incremento de su capacidad de absorción de agua y del poder de hinchamiento, que tiene como consecuencia una mejora de la solubilidad en agua fría. Otro efecto de la destrucción de la estructura del gránulo es la disminución en la entalpía de gelatinización.

#### **1.4. Mejora nutricional y nuevas tendencias de mercado**

La utilización de harina de chontaduro en la formulación de productos de bollería, como pueden ser unos pancakes, responde a una tendencia que se encuentra en auge. La tendencia 'healthy', en lo referente a la alimentación, está sufriendo un constante aumento durante los últimos años, tanto en nuestro país como en muchos otros. Respondiendo al incremento de esta tendencia entre los consumidores, las industrias han visto una oportunidad de mercado en la fabricación de productos que cubran esta necesidad, ya sean productos light, bajos en grasas o azúcares, u otros productos que ofrezcan otro tipo de mejoras nutricionales. La industria de los productos de bollería, en la cual se pueden incluir los pancakes, es especialmente interesante a la hora de buscar

la mejora nutricional, ya que de partida no son habitualmente productos con buenas características nutritivas.

Así, Doménech-Asensi *et al.* (2015) mostraron cómo a través de cambios en la formulación tradicional de croissants, mediante la sustitución de algunas grasas por inulina y aceite de girasol alto oleico, se consigue proporcionar al producto un perfil nutricional más equilibrado, sin perder la aceptación sensorial del consumidor. Por otra parte, Iglesias (2012) estudió en su tesis el efecto de la sustitución parcial de harina de trigo convencional por semillas de chía o derivados sobre la calidad final del pan y la aceptación por parte de los consumidores, todo ello con el objetivo de llevar a cabo una mejora nutricional del pan. Ormaza (2010), por otro lado, presenta en su estudio la mejora nutricional de pancakes mediante la utilización de lupino molido en sustitución parcial de la harina de trigo, el cual posee un elevado valor biológico. El tipo de mejora nutricional mostrado en los anteriores ejemplos se basa en la sustitución de algunos ingredientes para mejorar la calidad nutritiva del producto final. Otro tipo de mejora nutricional es el descrito en la tesis de Palacios (2007), en la cual se seleccionaron las bacterias lácticas con mayor actividad fitasa, con el fin de producir la hidrólisis del ácido fítico presente en cantidad considerable en el pan integral, y que representa un factor antinutricional que actúa reduciendo la biodisponibilidad de algunos aminoácidos y minerales. En este otro caso, la mejora consiste en la eliminación de factores antinutricionales que reducen la capacidad de aprovechamiento de los nutrientes de algunos alimentos.

También es posible encontrar trabajos que describen la sustitución parcial de harina de trigo por harina de chontaduro en diferentes productos de panificación. Riascos (2018) realizó esta sustitución de harina para la elaboración de galletas, llegando a las siguientes conclusiones a nivel nutricional: el chontaduro posee características favorables para la sustitución de la harina de trigo, constituyendo en el producto final una mayor fuente de grasas, minerales y fibra, aunque representa un menor aporte de proteínas que la harina original. Otro ejemplo es el trabajo llevado a cabo por Albizuri (2019), en el que se sustituyó parte de la harina de maíz para la elaboración de un snack extruido. El estudio comprobó que en los productos extruidos que incluían harina de chontaduro existe un mayor nivel de compuestos bioactivos como fenoles totales, carotenoides y vitamina C, por lo que presentan una mayor actividad antioxidante frente a los snacks elaborados únicamente con harina de maíz. Otro experimento de interés es el de López-Calvo *et al.* (2015), en el cual se elaboró pan a base de una mezcla de harina de maíz y chontaduro para valorar sus propiedades funcionales y la aceptación por parte del consumidor. El experimento concluye que se trata de un producto con potencial comercial, puesto que los consumidores perciben en él un producto novedoso y saludable, además de buen sabor. A nivel nutritivo, se trata de un pan con elevado contenido de fibra y carotenoides y gran capacidad antioxidante. Existen otros ejemplos de alimentos fuera de la categoría de productos de panificación que utilizan harina de chontaduro en su formulación. Por ejemplo, en los análisis realizados por Hleap y Rodríguez (2015) la adición de harina de chontaduro a salchichas de tilapia roja, una especie de pez híbrido de origen africano e israelí, permite mejorar algunas propiedades

texturales y aumentar la aceptación sensorial del producto final. Al igual que en el caso anterior, en el artículo de Martínez (2019), la harina de chontaduro se utiliza como extensor cárnico en la elaboración de mortadela. En este aspecto, la harina de chontaduro resultó ser un extensor cárnico de alta calidad como consecuencia de su capacidad para aumentar la absorción de agua.

Muy ligada a la tendencia 'healthy' se encuentra otra tendencia surgida recientemente y que consiste en la introducción en el mercado de harinas vegetales alternativas. Según los datos de AINIA (Pérez, 2019) actualmente la principal fuente proteica es de tipo animal, sin embargo, el aumento de la demanda en las próximas dos décadas requerirá acudir a otras fuentes de proteínas para asegurar la sostenibilidad de la cadena alimentaria. En este contexto aparece una gran cantidad de nuevos productos que incorporan proteína vegetal que, además de contribuir a la sostenibilidad, proporcionan una alternativa saludable al consumidor. A menudo estos productos incluyen harinas vegetales, elaboradas a base de frutas, verduras o legumbres. Esta reciente tendencia busca sustituir parcial o completamente las harinas convencionales u otro tipo de ingredientes para obtener productos sostenibles y saludables. La harina de trigo es deficiente en algunos aminoácidos como la lisina, por lo que la sustitución de esta harina por otra no convencional en un producto puede resultar en una mejora de su perfil de aminoácidos. Los productos en los que se pueden encontrar esta nueva tendencia van desde hamburguesas vegetales hasta snacks y productos de bollería.

### **1.5. Análisis de la microestructura**

La microestructura permite conocer la organización y el comportamiento de los componentes de un alimento y se encuentra estrechamente relacionada con sus propiedades reológicas. Los análisis de microestructura se realizan habitualmente mediante técnicas microscópicas, las cuales pertenecen al campo de la microscopía. La microscopía se define como el conjunto de técnicas y métodos que hacen posible la visualización de objetos de estudio que, por sus reducidas dimensiones, no pueden ser percibidas por el ojo humano. Dos técnicas de microscopía a destacar son la microscopía óptica y la microscopía láser confocal de barrido. En primer lugar, la microscopía óptica permite visualizar los objetos de estudio mediante una serie de lentes ópticas que amplían dicho objeto. A este tipo de microscopios se pueden acoplar lámparas de fluorescencia o aplicar filtros que permiten observar diferentes componentes en una muestra, así como utilizar luz polarizada para la observación de la misma. Por otra parte, la microscopía láser confocal (CLSM) hace posible la obtención de imágenes tridimensionales del objeto de estudio gracias a la eliminación de la luz que procede de los planos fuera del foco, por lo que solo se detecta la luz dentro del plano focal, obteniéndose así imágenes de gran calidad. Aplicado al campo de los alimentos, este tipo de técnicas permiten determinar qué componentes se encuentran dentro de una muestra y el estado que presentan mediante diferentes métodos de tinción que posibilitan distinguirlos. Un ejemplo de ello es la investigación de Gómez *et al.* (2016), en la que se utilizó un microscopio óptico y técnicas de microscopía laser confocal de barrido para estudiar la estructura de diferentes panna cottas.

## 1.6. Medida de la reología

Uno de los aspectos principales que aborda este trabajo es la caracterización reológica de la masa de pancakes formulada con las diferentes harinas. La reología es la ciencia que permite estudiar los fenómenos de deformación y/o flujo de un cuerpo al ser expuesto a un determinado esfuerzo (Chiralt *et al.*, 2007). La medida de la reología de un alimento es de gran utilidad para determinar cuatro aspectos de gran interés. Nos ayuda a conocer su estructura, a controlar los procesos y seleccionar los equipos adecuados para cada producto, es útil en el proceso de desarrollo de nuevos productos y permite establecer controles de calidad, ya que a menudo las características reológicas tienen gran influencia en la aceptación sensorial del producto. De esta manera, la caracterización de un alimento fluido, como puede ser la masa de un pancake, puede realizarse de diferentes formas. Existen diferentes equipos que permiten llevar a cabo medidas reológicas, aunque cada uno de ellos sirve para unos tipos específicos de fluidos y proporcionan parámetros distintos. Algunos de ellos, los reómetros, tienen modelos matemáticos aplicables. Los reómetros pueden ser de dos tipos: de cilindros concéntricos o sistemas de medida cono-placa o placa-placa, útiles para fluidos más viscosos. Estos equipos pueden proporcionar diferentes curvas en función de lo que se desee estudiar. Así, a través de ellos es posible obtener reogramas que permiten caracterizar su comportamiento al flujo o estudiar su comportamiento en reposo. Por tanto, los reómetros permiten hacer ensayos de flujo, los cuales permiten medir la viscosidad, o resistencia al flujo, de un material. Como resultado de estas medidas se obtiene, entre otros datos, el reograma que relaciona la viscosidad con el gradiente de velocidad, así como la curva de variación de la viscosidad en función del tiempo o de la temperatura (Chiralt *et al.*, 2007). Además, estos equipos también permiten la realización de ensayos oscilatorios, los cuales contribuyen a la caracterización de las propiedades microestructurales en reposo de un alimento. Se trata de ensayos dinámicos independientes del tiempo que se realizan dentro del rango de viscoelasticidad lineal, que se corresponde con aquel en el que la relación entre el esfuerzo y la deformación muestra una relación lineal. Estos ensayos permiten obtener una serie de funciones viscoelásticas dinámicas que contribuyen a determinar la proporción entre el componente elástico y viscoso del alimento y cuantificar en qué medida se comporta como sólido o como líquido. Los parámetros obtenidos son los módulos elástico ( $G'$ ) y viscoso ( $G''$ ), los cuales se identifican con comportamiento sólido y líquido, respectivamente. Estos módulos forman, a su vez, el módulo complejo ( $G^*$ ). El ángulo de desfase es otro parámetro importante que sirve como indicador de la viscoelasticidad de un material. Se trata del desfase entre el esfuerzo aplicado y la deformación medida. (Talens *et al.*, 2018). Dentro de los ensayos oscilatorios, las rampas de temperatura permiten estudiar el proceso de gelatinización del almidón, entre otros aspectos. (García, 2008). En este caso, el ensayo se realiza dentro del intervalo de viscoelasticidad lineal, aplicando una amplitud y una frecuencia de oscilación constantes, mientras se aumenta la temperatura de manera gradual.

## 2. OBJETIVOS

El objetivo general de este trabajo de fin de grado fue estudiar la inclusión de harina de chontaduro en la formulación de pancakes para contribuir a la mejora de sus características nutricionales y evaluar su impacto en diferentes aspectos.

Para ello se establecieron los siguientes objetivos específicos.

- 1- Estudiar el efecto de los diferentes tratamientos térmicos sufridos para la obtención de las harinas.
- 2- Valorar la influencia de la aplicación de ultrasonidos en el proceso de producción de las harinas.
- 3- Estudiar las consecuencias de los anteriores factores sobre las propiedades reológicas de la masa de pancake y la microestructura de la harina y la masa de pancake.

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. Materias primas

Para el desarrollo de este trabajo de fin de grado se utilizaron diferentes tipos de harina de chontaduro (*Bactris gasipaes H.B.K.*) proporcionados por la Universidad de La Sabana (Colombia). Las harinas de chontaduro y el resto de los ingredientes utilizados en la elaboración de la masa de los pancakes se recogen en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Ingredientes para la elaboración de los pancakes

Ingrediente	Marca
Harina de chontaduro	Universidad de La Sabana (Colombia)
Harina de trigo	Río
Sal fina	Hacendado
Azúcar blanco	Azucarera
Huevos	Huevos Guillén
Leche entera	Central Lechera Asturiana

##### 3.1.1. Obtención de las harinas de chontaduro

Los diferentes tipos de harina de chontaduro utilizados fueron proporcionados por la Universidad de La Sabana (Colombia). En este trabajo se emplearon en total 6 tipos de harina de chontaduro, que diferían en el modo de obtención. Para la obtención de las harinas se sometió la pulpa del fruto a dos procesos, homogeneización y secado.

En primer lugar, para la obtención de la pulpa, se limpiaron y desinfectaron frutos maduros de chontaduro, eliminando las inflorescencias. Seguidamente se realizó un escaldado por convección a 100°C durante 5 minutos, con un 100% de humedad relativa y con un posterior choque térmico. El choque térmico se llevó a cabo introduciendo los frutos escaldados en agua con hielo durante 40 segundos, con el fin de facilitar la retirada de la piel. La pulpa obtenida contaba con una composición aproximada de 52%p/p de agua, 40%p/p de almidón, (12.4% amilosa y el 66% amilopectina), 6%p/p de proteína, 10%p/p de grasa total y 4%p/p de fibra total. Una vez obtenida la pulpa, esta se sometió a un proceso de homogeneización. Se utilizó un equipo Thermomix® durante 5 minutos a velocidad 6, lo que equivale a 3100rpm. Se diferenciaron tres tratamientos en función de la temperatura de homogeneización: 60, 70 y 80°C. Estas temperaturas se fijaron teniendo en cuenta el rango de temperaturas de gelatinización

del almidón (65-75°C) hallado por De Melo Neto *et al.* (2015). Una vez homogeneizada, la pulpa se separó en dos lotes: un lote que no sufrió tratamiento y otro lote que se sometió a pulsos continuos de ultrasonidos en baño Elmasonic® S 300 H (37 kHz) a temperatura ambiente durante 3 minutos. Tras esta etapa, todas las muestras se sometieron a un secado en estufa Memmert® a 60°C durante 24h. Para ello, se dispusieron con un grosor de 2mm sobre una rejilla de secado. Finalmente, las muestras se estabilizaron en un desecador y se trituraron haciendo uso de nuevo de la Thermomix® a velocidad 10 (10200rpm) durante 2,5 minutos a temperatura ambiente. De esta manera se obtuvo la harina final, que se almacenó en un lugar seco. Los códigos de identificación de las harinas obtenidas son los siguientes:

- 60C: Harina proveniente de homogenización a 60°C, sin posterior tratamiento de ultrasonido
- 60U: Harina proveniente de homogenización a 60°C, con posterior tratamiento de ultrasonido
- 70C: Harina proveniente de homogenización a 70°C, sin posterior tratamiento de ultrasonido
- 70U: Harina proveniente de homogenización a 70°C, con posterior tratamiento de ultrasonido
- 80C: Harina proveniente de homogenización a 80°C, sin posterior tratamiento de ultrasonido
- 80U: Harina proveniente de homogenización a 80°C, con posterior tratamiento de ultrasonido

### 3.2. Elaboración de la masa para pancakes

Para la elaboración de la masa se siguió el siguiente protocolo. Se prepararon 25g de cada muestra siguiendo las proporciones que se muestran en la Tabla 3.

**Tabla 3.** Composición porcentual y cantidades para la elaboración de 25g de masa de pancakes

<b>Ingredientes</b>	<b>%p/p</b>	<b>g</b>
Harina de chontaduro*	12,14	3,04
Harina de trigo	12,14	3,04
Huevos enteros	18,12	4,53
Leche entera líquida	54,35	13,59
Bicarbonato de sodio	0,91	0,23
Azúcar	1,81	0,45
Sal	0,54	0,14
<b>TOTAL</b>	<b>100</b>	<b>25,02</b>

\*En la muestra control se sustituye por harina de trigo

Las muestras que incluyen harina de chontaduro en su formulación presentan una proporción del 50% de harina de trigo y 50% de harina de chontaduro. Por su parte, la muestra control no incluye harina de chontaduro en su formulación, únicamente harina de trigo. Por ello, en la muestra control, el porcentaje correspondiente a la harina de chontaduro se suma al de harina de trigo, siendo 24,28% el porcentaje final de harina de trigo en el control. El resto de los ingredientes para la muestra control mantienen la misma proporción que en la Tabla 3.

El protocolo de elaboración de la masa se describe a continuación. En primer lugar, se mezclaron por separado los ingredientes secos y los húmedos. Seguidamente se incorporó despacio la mezcla de los ingredientes secos sobre la base húmeda. Todo esto se realizó de manera manual, el tiempo de mezcla fue 3 minutos. Una vez obtenida la masa, se dejó reposar durante una hora en refrigeración. Se siguió el mismo protocolo tanto para la muestra control (solo con harina de trigo) como para cada una de las muestras de harina de chontaduro.

### **3.3. Análisis**

#### **3.3.1. Estudio de la microestructura**

##### **3.3.1.1. Estudio de la microestructura de la harina de chontaduro**

Para el estudio de la microestructura óptica de las harinas se utilizó un microscopio óptico Nikon Eclipse E800 (Nikon Eclipse 80i, Nikon Co., Ltd., Tokyo, Japón) acoplado a una cámara Nikon DC11 (Nikon Co., Ltd., Tokyo, Japón). Para capturar y almacenar las imágenes a 1280 x 1024 pixels se empleó el software NIS-Elements F (version 4.0, Nikon, Tokyo, Japan). Las imágenes se observaron a 10x, 20x y 40x. Se realizaron observaciones tanto por campo claro como con luz polarizada y fluorescencia.

Las observaciones por campo claro se llevaron a cabo con la muestra sin teñir y teñida con azul de toluidina (1g/L). La tinción con azul de toluidina permite observar la estructura del tejido vegetal de chontaduro y de los gránulos de almidón. Además, para poder determinar si los gránulos de almidón mantienen una estructura cristalina, las harinas también se estudiaron con luz polarizada. Para observar la autofluorescencia de los compuestos autofluorescentes de las harinas, se utilizó una lámpara de mercurio con un filtro FITC (ex máx. = 482 nm, em máx. = 536 nm) como fuente de excitación. Para ello, se disolvieron 0.03g de harina en 3mL de agua. Con una pipeta Pasteur se colocó una porción de disolución sobre un porta de vidrio y se cubrió con un cubreobjetos de vidrio. Para teñir la muestra con azul de toluidina se adicionó 10µL de agente de tinción a la muestra situada en el porta y a continuación, se cubrió con un cubreobjetos.

### 3.3.1.2. Estudio de la microestructura de la masa

En el caso de las masas de los pancakes se utilizó la microscopía láser confocal de barrido (CLSM), acoplando un microscopio láser confocal ZEISS 780 a un microscopio invertido Axio Observer Z1 (Carl Zeiss, Germany). Para la visualización de las muestras se utilizó el objetivo de inmersión en agua C-Apochromat 40x/1.2 W. Con la ayuda del software de microscopio ZEN, se obtuvieron y almacenaron las imágenes con una resolución de 1024 x 1024 pixels. Los agentes de tinción utilizados para las muestras fueron el Nile Red, utilizado para detectar grasa, la fluoresceína (FITC), para visualizar proteínas y el Calcofluor White (Fluka, Sigma-Aldrich, Missouri, USA), empleado para teñir polisacáridos. El Nile Red se excitó con la línea de láser 561 y se detectó en el rango de 576-620 nm, mientras que el FITC se excitó con la línea de láser 488 y se detectó en el rango de 499-525 nm y el Calcofluor White se excitó con la línea de diodo 405 y se detectó en el rango de 410-477 nm.

Para preparar las muestras observadas en el microscopio se colocó una pequeña porción de cada una de las masas preparadas con las diferentes harinas de chontaduro sobre un portaobjetos de vidrio. Seguidamente, se añadieron los diferentes agentes de tinción, incorporando 20 $\mu$ L de cada uno de ellos sobre las muestras correspondientes y dejando un tiempo de reposo de 10 minutos. Tras el tiempo de espera se cubrió con un cubreobjetos y se procedió a la observación en el microscopio.

### 3.3.2. Medidas reológicas de la masa

Para el análisis reológico de la masa se utilizó el reómetro Kinexus KNX2210 y el software informático rSpace for Kinexus. Las medidas reológicas se llevaron a cabo utilizando la geometría de placas paralelas (40 mm diámetro). Se realizaron dos tipos de medidas reológicas.

En primer lugar, se llevó a cabo un ensayo para evaluar el comportamiento al flujo de las masas de pancake formuladas, registrándose la variación de la viscosidad y el esfuerzo cortante con el gradiente de velocidad, teniendo en consideración el tiempo. Las condiciones aplicadas en este ensayo fueron una temperatura de 20°C y un GAP de 1mm. Se realizó una rampa de gradiente de velocidad ascendente de 0 hasta 200 s<sup>-1</sup> (5 min), seguida de una rampa descendente de 200 a 0 s<sup>-1</sup> (5 min). En ensayo se realizó por triplicado.

En segundo lugar, se llevó a cabo un ensayo oscilatorio de barrido de temperatura a una amplitud y frecuencia constantes. El barrido abarcó desde 30 hasta 100°C, con una rampa de 5°C/min. Se trabajó dentro del intervalo de viscoelasticidad lineal, empleando una frecuencia de 1Hz, GAP de 1mm y una deformación del 0,05%. A partir del módulo elástico y viscoso, se obtuvo el módulo complejo y el ángulo de desfase, con el fin de

medir la viscoelasticidad de la masa y caracterizar su comportamiento durante el calentamiento. El ensayo se realizó por triplicado.

#### **3.3.2.1. Análisis estadístico**

Los datos obtenidos en el ensayo de flujo se ajustaron al modelo de ley de potencia de Ostwald-de-Waele. Los parámetros y datos resultantes del ajuste se sometieron a un ANOVA simple con la ayuda del software Statgraphics Centurion XVIII. De este modo, se realizó un ANOVA simple utilizando como factor el tipo de muestra y realizando el análisis en diversas ocasiones con las variables dependientes  $K$ ,  $n$  y viscosidad a  $100\text{s}^{-1}$ , tanto para el barrido ascendente como para el descendente.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. Análisis de la microestructura

El análisis de la microestructura se llevó a cabo mediante las técnicas microscópicas descritas anteriormente y se observaron tanto las harinas de chontaduro utilizadas como las masas finales de los pancakes. Estas técnicas permiten observar el estado de los componentes presentes en las muestras.

#### 4.1.1. Microscopía óptica

Como se ha descrito previamente en materiales y métodos, en el caso de la observación de las harinas de chontaduro se optó por técnicas de microscopía óptica con aplicación del tinte de azul de toluidina, luz polarizada y lámpara de fluorescencia, para distinguir diferentes componentes de la muestra.

Por una parte, el tinte de azul de toluidina permite la coloración de los tejidos celulares residuales que quedan tras la obtención de la harina. Por otra parte, la luz polarizada facilita visualizar si la estructura de los gránulos de almidón continúa intacta, mostrando cruces de malta o si, por el contrario, ha perdido la estructura cristalina y su birrefringencia como consecuencia del proceso de gelatinización y, por tanto, no aparecen dichas cruces. Finalmente, la luz fluorescente será de utilidad para observar los compuestos con autofluorescencia en la muestra, en este caso los carotenos.

Se muestran a continuación, en la Figura 1, las imágenes obtenidas por microscopía óptica tanto de la harina de trigo, como de las diferentes muestras de harina de chontaduro, tratadas a diferentes temperaturas de homogeneización, con o sin aplicación de ultrasonidos.

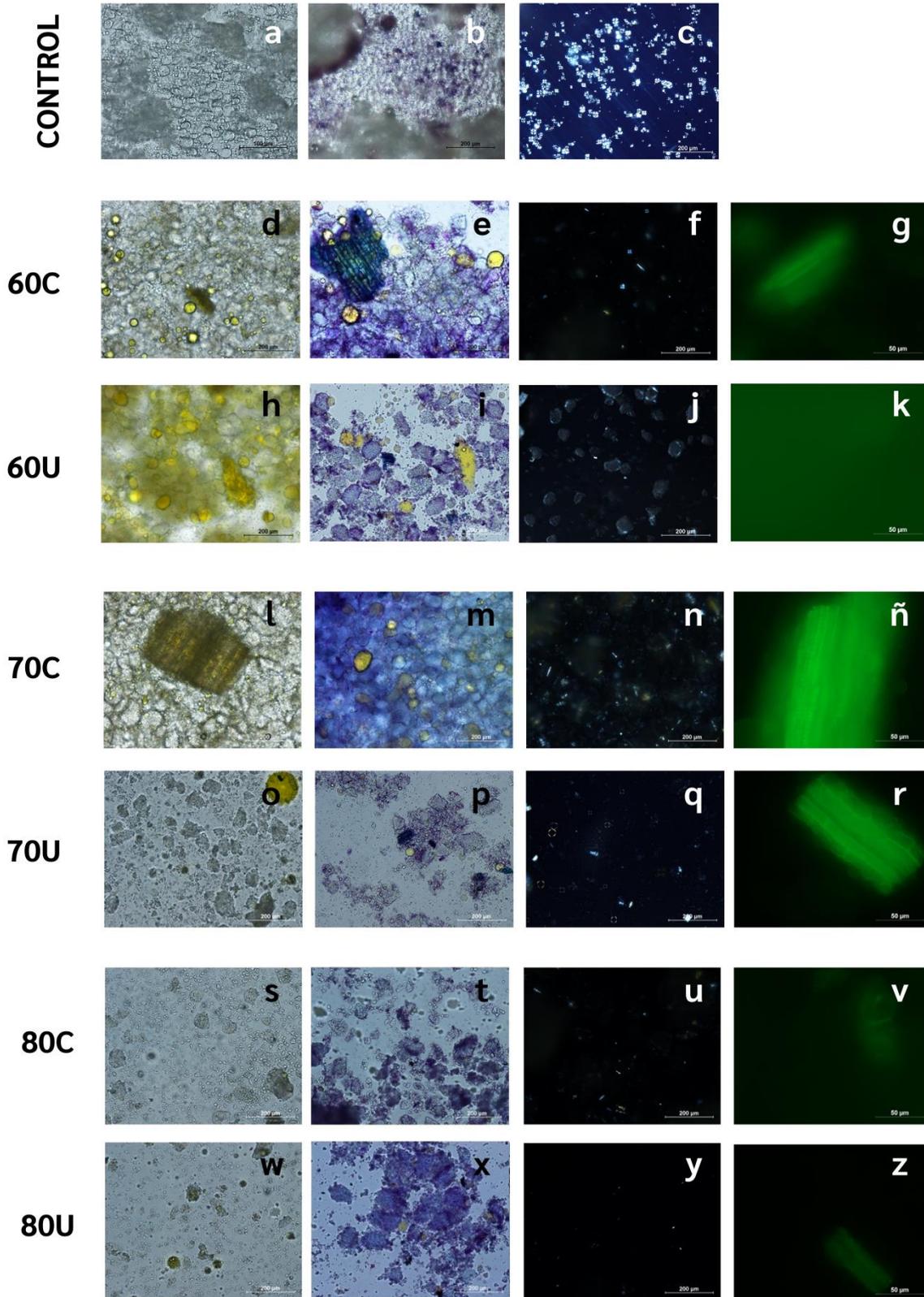
En la harina de trigo, que se corresponde con la harina utilizada en la masa control, se distinguen poblaciones de gránulos de almidón de diferentes tamaños (Figura 1 a), los gránulos aparecen intactos. Aparecen teñidas en azul algunas partículas de tejido vegetal con las paredes celulares intactas (Figura 1 b). La imagen tomada con luz polarizada (Figura 1 c) muestra una gran cantidad de cruces de malta, lo cual prueba la integridad de los gránulos de almidón.

En las muestras de harina 60C sin teñir (Figura 1 d) se pueden distinguir poblaciones de gránulos de almidón de diferentes tamaños, así como la presencia de grasa estructurada en forma de glóbulos. Algunos de los gránulos de almidón están hinchados y rotos, lo cual ha provocado la liberación de parte de su contenido, esto puede deberse a la pregelatinización (Figura 1 e). Se observan teñidas de azul (Figura 1 e) partículas de tejido vegetal con algunas paredes celulares intactas. En cuanto a las imágenes de luz polarizada (Figura 1 f), se aprecian algunas cruces de malta, lo que indica

que algunos gránulos de almidón todavía permanecen intactos. Sí que se evidencian partículas de tejido vegetal con autofluorescencia (Figura 1 g). La aplicación de ultrasonidos parece ejercer un efecto de disgregación sobre los gránulos de almidón (Figura 1 h e i). En este caso se encuentran hinchados, rotos y desintegrados (figura 1 i). La grasa forma menos glóbulos y parte de ella se encuentra desestructurada y dispersa (Figura 2 h). Bajo la luz polarizada (Figura 2 j) ya no se observan cruces de malta a consecuencia de la destrucción de los gránulos de almidón. Esta muestra presenta mucha autofluorescencia difundida por la muestra (Figura 2 k).

La muestra 70C presenta gránulos de almidón hinchados y, en algunos casos, rotos y con lixiviación (Figura 1 l y m), por lo que no aparecen cruces de malta, como consecuencia de la pregelatinización (Figura 1 n). Se aprecian partículas de tejido vegetal (Figura 1 m), pudiendo distinguirse paredes celulares intactas que presentan fluorescencia (Figura 1 ñ). La grasa se encuentra tanto en forma de glóbulos como desestructurada (Figura 1 l y m). La muestra con ultrasonidos exhibe gránulos de almidón hinchados con un elevado grado de disgregación y desintegración (Figura 1 o y p) que no presentan cruces de malta (Figura 1 q). La grasa está parcialmente desestructurada (Figura 1 o) y las partículas vegetales muestran fluorescencia (Figura 1 r).

Por último, la muestra sometida a 80°C sin ultrasonidos revela unos gránulos de almidón hinchados y muy rotos con lixiviación (Figura 1 s y t) que no presentan cruces de malta (Figura 1 u) ya que, a esta temperatura, los efectos de la gelatinización son más notables. En este caso, la grasa se encuentra desestructurada y asociada a los gránulos (Figura 1 s y t). Las partículas de tejido vegetal presentan escasa autofluorescencia (Figura 1 v). Tras someterla a ultrasonidos, la muestra exhibe gránulos hinchados, muy rotos y disgregados, grasa desestructurada (Figura 1 w, x e y) y partículas vegetales con poca fluorescencia (Figura 1 z), al igual que en el caso anterior.



**Figura 1.** Imágenes obtenidas mediante microscopía óptica de muestras de harina de trigo y de las muestras de harina de chontaduro con homogeneización a 60, 70 y 80°C sin ultrasonidos (C) y con ultrasonidos (U). (a, d, h, l, o, s, w) muestras en campo claro sin tinción; (b, e, i, m, p, t, x) muestras en campo claro con tinción de azul de toluidina; (c, f, j, n, q, u, y) muestras con luz polarizada; (g, k, ñ, r, v, z) muestras con lámpara de fluorescencia

En general, las diferencias entre las harinas que no han sufrido ultrasonidos y las que sí lo han hecho se traducen en un nivel mayor de desintegración y disgregación de los gránulos de almidón de estas últimas, lo que puede provocar la pérdida de la cruz de malta. También influye sobre la grasa, modificando su estructura de manera que esta se dispersa. Llama la atención que únicamente las muestras de harina de chontaduro presentan glóbulos de grasa, ya que en las imágenes de harina de trigo no se aprecia ninguno. Sin embargo, también se observa que, a mayores temperaturas de homogeneización, más se deterioran los componentes de las harinas. Así, conforme aumenta la temperatura los gránulos presentan un mayor grado de hinchamiento y se rompen más, por lo que cada vez aparecen menos cruces de malta. A su vez, con el aumento de temperatura, las paredes celulares aparecen cada vez más disgregadas y presentan menos fluorescencia.

Todas las harinas de chontaduro parecen estar pregelatinizadas, aunque se han podido observar cruces de malta en la muestra 60C, ya que a esta temperatura todavía está comenzando el proceso de gelatinización y muchos de los gránulos están intactos.

Por tanto, la aplicación de ultrasonidos y de mayores temperaturas de homogeneización sobre las harinas provocaron efectos más acentuados respecto a las harinas que no habían sufrido estos tratamientos. Sin embargo, cabe destacar que a medida que aumenta la temperatura de homogeneización, las diferencias entre la muestra con ultrasonidos y sin ultrasonidos son menos notorias. Esto es, a una temperatura de homogeneización de 60°C, las diferencias entre ambas muestras son notables, mientras que a 80°C las diferencias entre ellas son menores. Esto se debe a que tanto el tratamiento con ultrasonidos como el tratamiento térmico tienen consecuencias similares en las harinas, por lo que, a temperaturas altas de tratamiento de homogeneización, los efectos de ambos tratamientos se confunden.

#### **4.1.2. Microscopía láser confocal de barrido (CLSM)**

Como se ha explicado anteriormente en el apartado de materiales y métodos, los agentes de tinción utilizados en la observación de las muestras son el Nile Red, para la detección de grasa, la fluoresceína (FITC), para la visualización de proteínas y el Calcofluor White, para distinguir polisacáridos.

La Figura 2 expone las imágenes obtenidas mediante microscopía láser confocal de barrido para la muestra control y todas las muestras que contienen harina de chontaduro.

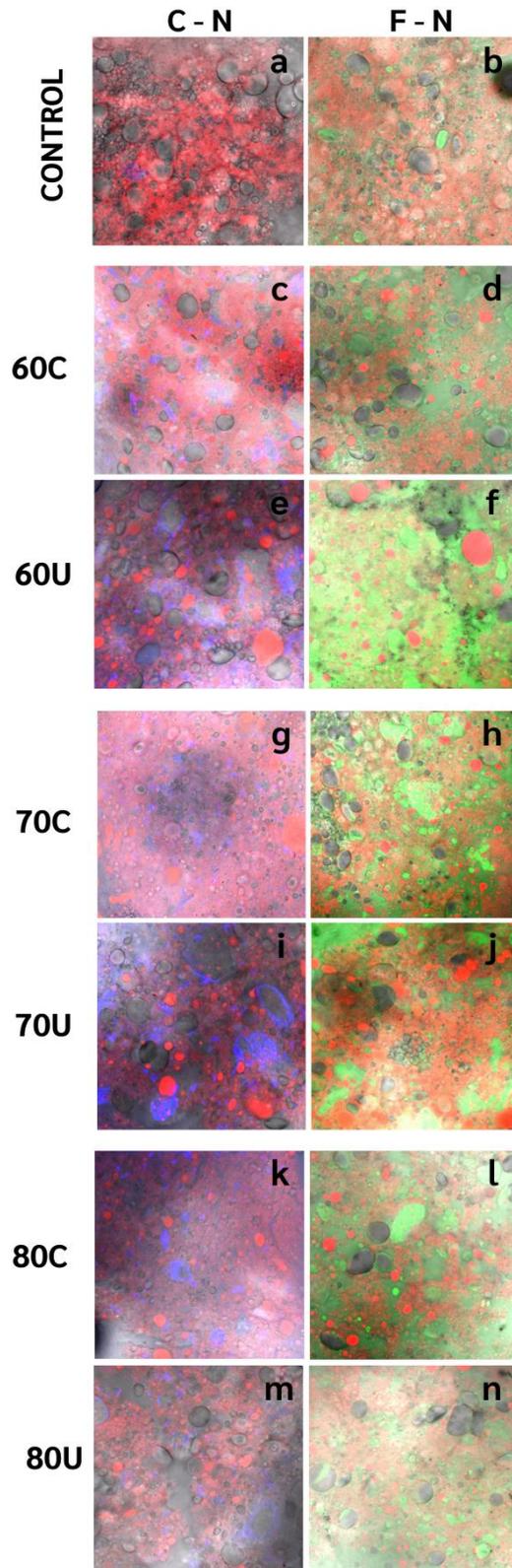
La masa control está formada por una fase continua compuesta por grasa y proteína fusionadas, de manera que la grasa se encuentra dispersa por la masa y no en forma de glóbulos (Figura 2 a y b). Los gránulos de almidón aparecen intactos y se distinguen poblaciones de diferentes tamaños. Algunas proteínas interaccionan con los gránulos de almidón, de manera que estos aparecen teñidos de verde (Figura 2 b). En la imagen con Calcofluor (Figura 2 a) se aprecian algunos restos de paredes celulares

teñidos de azul. No se encuentran cristales de azúcar o sal, lo que significa que se han disgregado e integrado bien con el resto de los ingredientes de la masa.

En la muestra 60C se observa que la masa está formada por una fase continua constituida por grasa y, en mayor medida, por proteína (Figura 2 c y d). En este caso, la grasa no se encuentra tan fusionada con la proteína como en el control, sino que se encuentra dispersa por la masa, parcialmente en forma de glóbulos (Figura 2 c y d). Algunos de los gránulos de almidón aparecen rotos y se diferencian poblaciones de diferentes tamaños. Algunos de ellos se encuentran interaccionando con proteínas y aparecen teñidos de verde (Figura 2 d). Teñidos de color azul, se distinguen más restos de material celulósico que en la muestra control, distribuidos por toda la masa y rodeados de grasa (Figura 2 c). No se observan cristales de azúcar o sal, estos componentes se han integrado y fusionado con el resto de los componentes de la masa como en la masa control. En lo que respecta a la muestra 60U, la masa ya no parece estar compuesta por una fase continua de grasa y proteína fusionada, sino que está constituida principalmente por proteína y la grasa aparece dispersa en forma de glóbulos (Figura 2 f). Se aprecian diferentes poblaciones de gránulos de almidón, aunque algunos aparecen rotos y desintegrados (Figura 2 e y f). Se observa más interacción de estos con las proteínas respecto a la muestra que no ha sufrido tratamiento de ultrasonidos (Figura 2 e), así como más restos de material celulósico (Figura 2 e). Al igual que en el caso anterior, no hay presencia de cristales de azúcar o sal.

La muestra 70C presenta una masa con una fase continua compuesta por grasa y mayoritariamente proteína, fusionadas (Figura 2 g y h). La grasa está parcialmente desestructurada y en forma de glóbulos. Se distinguen gránulos de diferentes tamaños tanto intactos como rotos y algunos de ellos aparecen interaccionando con proteínas. Se observan algunos restos de material celulósico rodeados de grasa (Figura 2 g). No se observan cristales de azúcar o sal. La muestra 70U exhibe una fase continua formada por grasa y proteína fusionadas en un grado mayor al de la muestra 70C (Figura 2 j), también se observa grasa desestructurada y en forma de glóbulos. Se distinguen gránulos de almidón de diferentes tamaños, algunos de ellos aparecen desintegrados y otros interaccionando con proteínas (Figura 2 j). Se distinguen bastantes restos de material celulósico distribuidos por la masa, más que en la muestra sin tratamiento de ultrasonidos (Figura 2 i). No se observan cristales de azúcar o sal.

La muestra 80C presenta una masa con fase continua de grasa y proteína en mayor proporción (Figura 2 l). En este caso la proteína y la grasa no parecen estar muy fusionadas y gran parte de esta última se encuentra en glóbulos. Se observan gránulos de almidón de diferentes tamaños, algunos de ellos rotos y otros aparecen interaccionando con proteínas. Aparecen algunos restos de paredes celulares rodeados de grasa (Figura 2 k). No se observan cristales de azúcar o sal. La muestra 80U, al igual que en las muestras de 70°C, presenta una masa con fase continua de grasa y mayoritariamente proteína con una mayor fusión que en la muestra sin ultrasonidos, aunque gran parte de la grasa aparece desestructurada y otra parte en forma de glóbulos (Figura 2 n). Los gránulos de almidón son de diferentes tamaños, algunos aparecen rotos y desintegrados y otros aparecen interaccionando con proteínas. Se aprecian algunos restos de material celulósico repartidos por toda la masa (Figura 2 m). No se observan cristales de azúcar o sal.



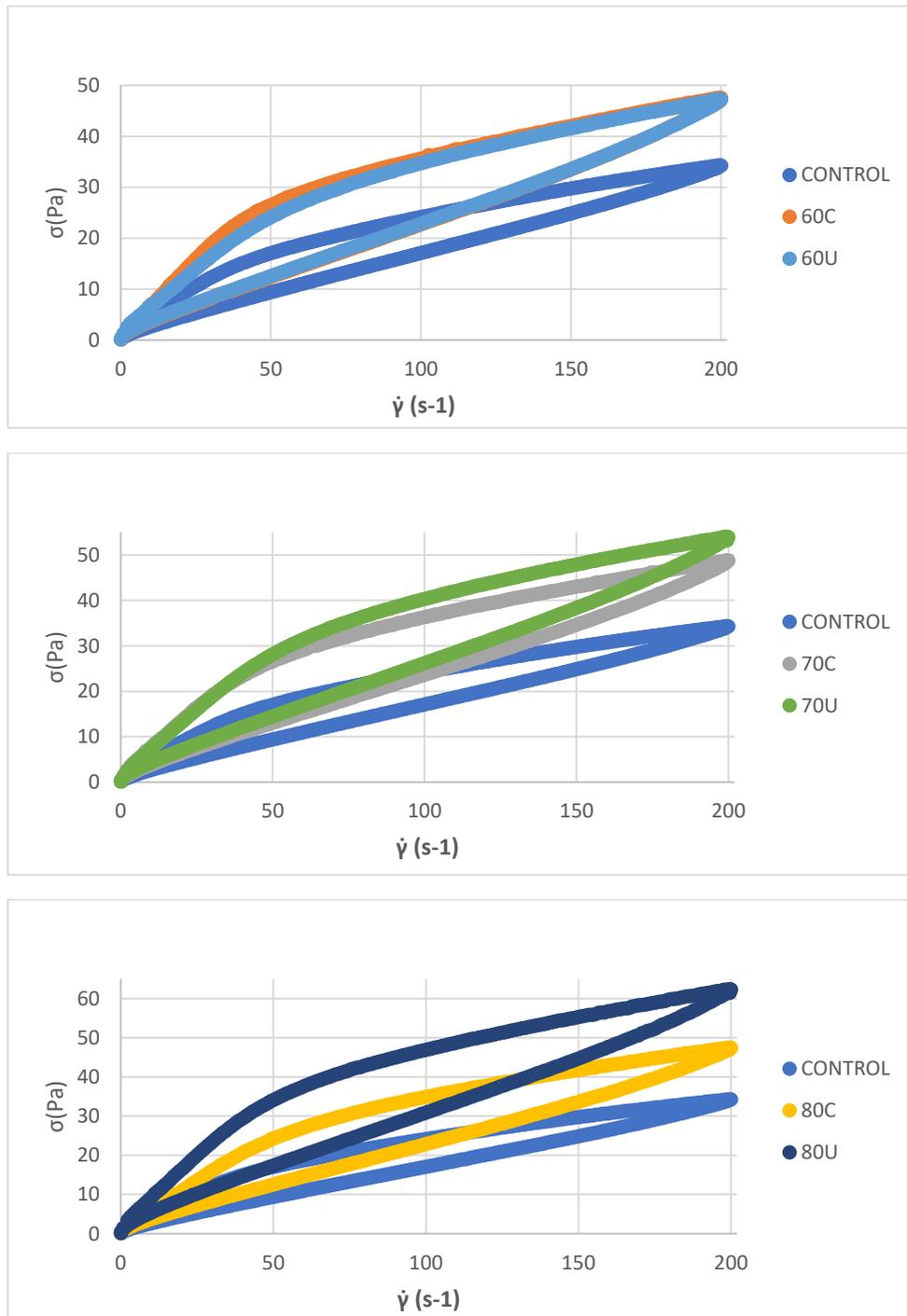
**Figura 2.** Imágenes obtenidas mediante microscopía laser confocal de barrido de la muestra de la masa de pancake control (sin harina de chontaduro) y de las muestras de la masa de pancake con harina de chontaduro homogeneizada a 60, 70 y 80°C sin ultrasonidos (C) y con ultrasonidos (U). C – N (a, c, e, g, i, k, m): tinción con Calcofluor White y Nile Red; F – N (b, d, f, h, j, l, n): tinción con FITC y Nile Red

A nivel general se puede apreciar que los ultrasonidos favorecen la fusión entre la grasa y la proteína y la interacción entre los gránulos de almidón y las proteínas. Además, el tratamiento con ultrasonidos produce desestructuración de la grasa, así como rotura y desintegración de los gránulos de almidón. En las muestras tratadas con ultrasonidos se observa una mayor cantidad de restos celulares. Puesto que la harina de trigo contiene una cantidad mayor de proteína que la de chontaduro y que, en la composición de las masas de los pancakes la harina está constituida por 50% harina de trigo y 50% harina de chontaduro, cabe deducir que es el trigo el que aporta mayormente la proteína observada, aunque el chontaduro también posee un elevado contenido en proteína. Las muestras 70U y 80U presentaron un mayor nivel de fusión de los componentes de la fase continua como consecuencia de la disgregación de los glóbulos de grasa, lo que se puede traducir en un aumento en la viscosidad de las muestras sometidas a ultrasonidos.

## 4.2. Caracterización reológica de las masas de pancake

### 4.2.1. Estudio del comportamiento al flujo

La Figura 3 presenta los reogramas obtenidos en las diferentes masas de pancake, los cuales reflejan la variación del esfuerzo cortante registrado ( $\sigma$ ) al realizar el barrido ascendente y descendente del gradiente de velocidad ( $\dot{\gamma}$ ).



**Figura 3.** Relación entre el esfuerzo cortante ( $\sigma$ ) y el gradiente de velocidad ( $\dot{\gamma}$ ) para la muestra control y las muestras con harina de chontaduro, con y sin ultrasonidos, homogeneizadas a 60, 70 y 80°C

Las muestras formuladas con harina de chontaduro sin ultrasonidos presentaron un comportamiento similar independientemente de la temperatura de homogeneización. Por otra parte, las muestras procesadas con ultrasonidos sí reflejaron un comportamiento al flujo dependiente de la temperatura de homogeneización. Las diferencias en las muestras con ultrasonidos se hicieron más notables a temperaturas más elevadas, registrándose valores de esfuerzo cortante más altos en la muestra 80U.

Los reogramas obtenidos permitieron clasificar la masa de pancake como un fluido no newtoniano en el cual la relación entre el esfuerzo cortante y el gradiente de velocidad no es constante. La pendiente en cada punto corresponde a la viscosidad (ecuación 1), una medida de la resistencia a la deformación de un material al ser sometido a un esfuerzo. La viscosidad es función del gradiente de velocidad y del tiempo.

$$\eta = \sigma / \dot{\gamma} \quad (\text{ec.1})$$

donde:

- $\eta$ : viscosidad (Pa·s)
- $\sigma$ : esfuerzo cortante (Pa)
- $\dot{\gamma}$ : gradiente de velocidad ( $s^{-1}$ )

En ambas curvas, ascendente y descendente, los resultados obtenidos se ajustaron al modelo de Ostwald-de-Waele o ley de potencia (ecuación 2), ya que las muestras no presentaron esfuerzo umbral para comenzar a fluir.

$$\sigma = K \cdot \dot{\gamma}^n \quad (\text{ec. 2})$$

donde:

- $\sigma$ : esfuerzo cortante (Pa)
- K: índice de consistencia del flujo ( $Pa \cdot s^n$ )
- $\dot{\gamma}$ : gradiente de velocidad ( $s^{-1}$ )
- n: índice de comportamiento al flujo ( $n < 1$ : Pseudoplástico;  $n = 1$ : Newtoniano;  $n > 1$ : Dilatante)

Dentro de los fluidos no newtonianos, todas las masas presentaron un comportamiento de fluido tixotrópico cuya viscosidad, además de disminuir al aumentar el gradiente de velocidad, también disminuyó con el tiempo (Chiralt *et al.*, 2007), registrándose la curva descendente siempre por debajo de la curva ascendente. Las masas formuladas con harina de chontaduro presentaron un mayor carácter tixotrópico al presentar un área de histéresis mayor que las masas control. En la Tabla 4 se presentan los parámetros K y n obtenidos tras el ajuste no lineal del modelo de Ostwald a los datos experimentales, así como la viscosidad aparente predicha por el modelo a  $100 s^{-1}$ . Al comparar ambos barridos se observa una disminución en los valores de K y  $\eta_{100}$  con el tiempo. Sin embargo, los valores de n fueron más cercanos a 1 como consecuencia de la reorganización de las partículas y su orientación al flujo, de manera que con el tiempo se aproxima más a un comportamiento newtoniano.

**Tabla 4.** Parámetros  $K$  y  $n$  para los barridos ascendente y descendente y predicción de la viscosidad de las muestras a un gradiente de velocidad ( $\dot{\gamma}$ ) de  $100 \text{ s}^{-1}$

ASCENDENTE				
Muestra	N	K (Pa·s <sup>n</sup> )	$\eta_{100}$ (Pa·s)	R <sup>2</sup>
Control	0,56 ± 0,02	1,80 ± 0,26 <sup>a</sup>	0,231 ± 0,014 <sup>a</sup>	0,995
60C	0,51 ± 0,03	3,74 ± 0,22 <sup>de</sup>	0,391 ± 0,075 <sup>cd</sup>	0,987
60U	0,53 ± 0,01	2,88 ± 0,21 <sup>bc</sup>	0,337 ± 0,006 <sup>b</sup>	0,990
70C	0,51 ± 0,02	3,56 ± 0,16 <sup>cd</sup>	0,366 ± 0,021 <sup>bcd</sup>	0,987
70U	0,54 ± 0,03	3,33 ± 0,52 <sup>cd</sup>	0,398 ± 0,021 <sup>de</sup>	0,989
80C	0,57 ± 0,05	2,54 ± 0,48 <sup>b</sup>	0,341 ± 0,008 <sup>bc</sup>	0,989
80U	0,52 ± 0,03	4,27 ± 0,66 <sup>e</sup>	0,458 ± 0,005 <sup>e</sup>	0,987

DESCENDENTE				
Muestra	N	K (Pa·s <sup>n</sup> )	$\eta_{100}$ (Pa·s)	R <sup>2</sup>
Control	0,94 ± 0,03	0,22 ± 0,05 <sup>a</sup>	0,166 ± 0,012 <sup>a</sup>	0,998
60C	0,94 ± 0,04	0,38 ± 0,17 <sup>de</sup>	0,270 ± 0,067 <sup>cd</sup>	0,997
60U	0,94 ± 0,01	0,31 ± 0,03 <sup>bc</sup>	0,237 ± 0,007 <sup>b</sup>	0,997
70C	0,94 ± 0,01	0,33 ± 0,03 <sup>cd</sup>	0,249 ± 0,015 <sup>bcd</sup>	0,997
70U	0,92 ± 0,03	0,42 ± 0,11 <sup>cd</sup>	0,282 ± 0,027 <sup>de</sup>	0,997
80C	0,93 ± 0,03	0,34 ± 0,08 <sup>b</sup>	0,245 ± 0,021 <sup>bc</sup>	0,997
80U	0,90 ± 0,02	0,52 ± 0,08 <sup>e</sup>	0,327 ± 0,020 <sup>e</sup>	0,997

(a-e) Letras diferentes como superíndices dentro de la misma columna indican diferencias significativas ( $P < 0,05$ ) entre las muestras.

Tras realizar un ANOVA simple en cada uno de los barridos, se obtuvieron las mismas conclusiones tanto para el barrido ascendente como para el descendente. Se observaron diferencias estadísticamente significativas ( $P < 0,05$ ) en los valores de viscosidad y de índice de consistencia al flujo entre las diferentes muestras, sin diferencias significativas ( $P > 0,05$ ) respecto al índice de comportamiento al flujo.

De manera general, la adición de harina de chontaduro supuso un aumento de la viscosidad de las muestras respecto al control. Esto puede ser debido a la composición, por el mayor contenido graso de la harina de chontaduro, y a la fusión de los componentes de la fase continua, concordando a su vez con la pregelatinización del almidón descrita previamente. Esta pregelatinización puede tener como efecto un aumento de la capacidad de absorción de agua y del poder espesante, lo que explica los mayores valores de viscosidad.

Por otra parte, se observaron diferencias de viscosidad entre las muestras de harina de chontaduro con y sin ultrasonidos. En las muestras con harinas que habían sufrido ultrasonidos, la viscosidad obtuvo diferencias significativas ( $P < 0,005$ ) entre las diferentes temperaturas aplicadas en el tratamiento térmico. Las muestras con ultrasonidos tratadas a las temperaturas más altas manifestaron mayores valores de viscosidad frente a las muestras que no habían sido tratadas. Sin embargo, en el caso de

las muestras con harinas que no han sufrido ultrasonidos, no se detectaron diferencias significativas ( $P > 0,05$ ) en la viscosidad a diferentes temperaturas.

En lo que respecta al índice de consistencia al flujo (K), las muestras que habían sufrido ultrasonidos mostraron diferencias significativas entre temperaturas de tratamiento ( $P < 0,05$ ), siguiendo una tendencia similar a la que se refleja en los datos de viscosidad. De esta manera, la muestra con ultrasonidos a la temperatura de tratamiento más elevada ( $80^{\circ}\text{C}$ ), obtuvo valores mayores de K frente a la muestra sin ultrasonidos. Las muestras que no habían sufrido ultrasonidos revelaron diferencias estadísticamente significativas entre ellas ( $P < 0,05$ ). La temperatura más alta ( $80^{\circ}\text{C}$ ) mostró valores más altos de K respecto a las otras temperaturas, que presentaron valores similares.

Conforme aumenta la temperatura de homogeneización, la diferencia entre las muestras con y sin ultrasonidos se hacen más visibles. Esto se ve reflejado, sobre todo, en las muestras tratadas a  $80^{\circ}\text{C}$  y puede deberse a los efectos de los ultrasonidos combinados con los de la operación de homogeneización. Como se ha visto anteriormente, los ultrasonidos producen la rotura de los gránulos de almidón, lo cual puede tener consecuencias sobre el comportamiento del flujo, aumentando la viscosidad de las masas. Al aumentar la temperatura, los efectos producidos son más agresivos de manera que, sumados a los efectos de los ultrasonidos, la integridad de los gránulos de almidón se ve afectada en mayor medida, lo que tiene consecuencias de mayor magnitud respecto a las muestras homogeneizadas a menores temperaturas.

#### **4.2.2. Barrido de temperatura**

El objetivo principal de este barrido consistió en establecer el punto de gelatinización del almidón y ver el comportamiento de la masa con el aumento de temperatura. La gelatinización del almidón es un proceso durante el cual los gránulos de almidón empiezan a absorber agua conforme aumenta la temperatura y, en consecuencia, aumentan su volumen. Finalmente, los gránulos pueden llegar a romperse de manera parcial, liberando amilosa y amilopectina, y formar pastas o geles. El rango de gelatinización es característico de cada tipo de almidón y permite discriminar entre variedades. La temperatura de gelatinización se sitúa en torno a  $60\text{-}75^{\circ}\text{C}$  y varía en función del origen del almidón (Pineda-Gómez *et al.* 2010). En el caso del almidón de trigo, la temperatura de gelatinización se encuentra entre  $62\text{-}76^{\circ}\text{C}$  (Gélvez *et al.*, 2016) mientras que, el almidón procedente del chontaduro, gelatiniza en un rango de temperaturas más amplio, entre  $59\text{-}88^{\circ}\text{C}$  (Giraldo *et al.*, 2010). Si se tiene en cuenta el tratamiento térmico sufrido por las harinas de chontaduro durante la operación de homogeneización y los resultados observados en el apartado de la microestructura de la harina, se puede llegar a la conclusión de que la temperatura aplicada a las harinas durante su obtención ha tenido como consecuencia la pregelatinización de las mismas. Es por ello que los cambios observados durante el barrido de temperatura pueden ser debidos a diversas causas. Algunas de estas causas son la gelatinización del almidón procedente de la harina de trigo, la desnaturalización de las proteínas, procedentes

tanto de la harina como del huevo o la leche, y la evaporación del agua del alimento, entre otros cambios físicos que, como consecuencia de la cocción, pueden afectar a la consistencia de la masa.

En los siguientes reogramas se observa la variación del módulo complejo a medida que aumenta la temperatura. El módulo complejo (ecuación 3) representa la resistencia total de un material ante una deformación aplicada. Este consta del módulo elástico, que es directamente proporcional a la energía almacenada por el material al sufrir una deformación, y por el módulo viscoso, que es directamente proporcional a la energía liberada por el material al ser deformado. (Talens *et al.*, 2018).

$$G^* = G' + G'' \quad (\text{ec. 3})$$

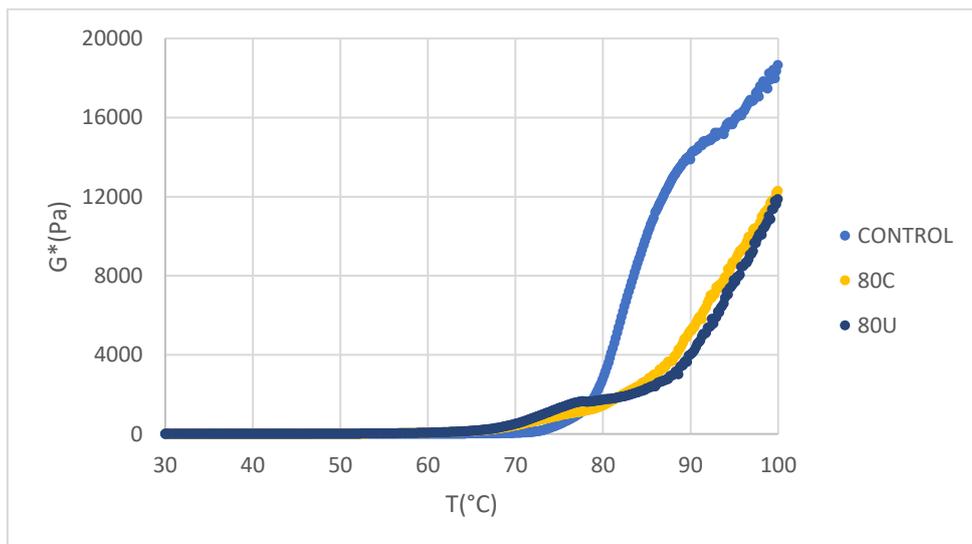
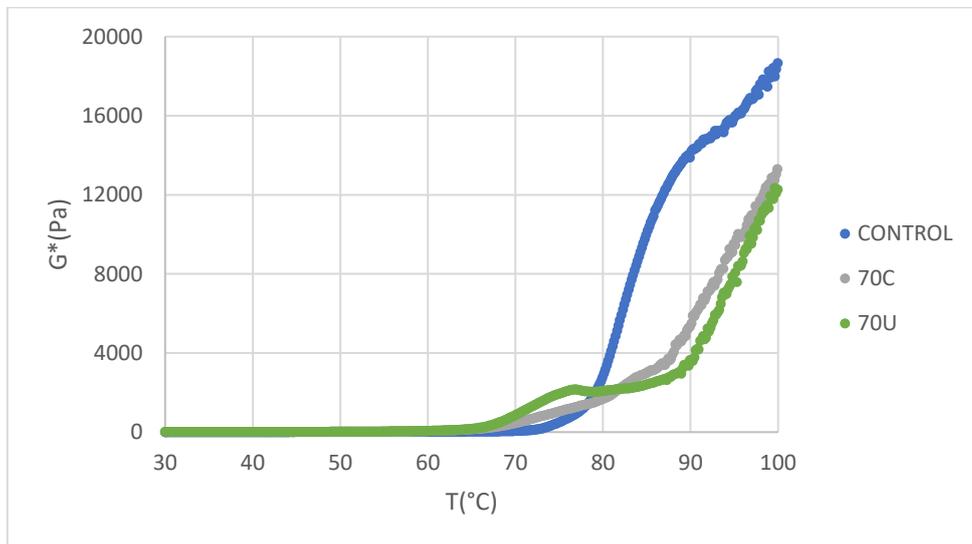
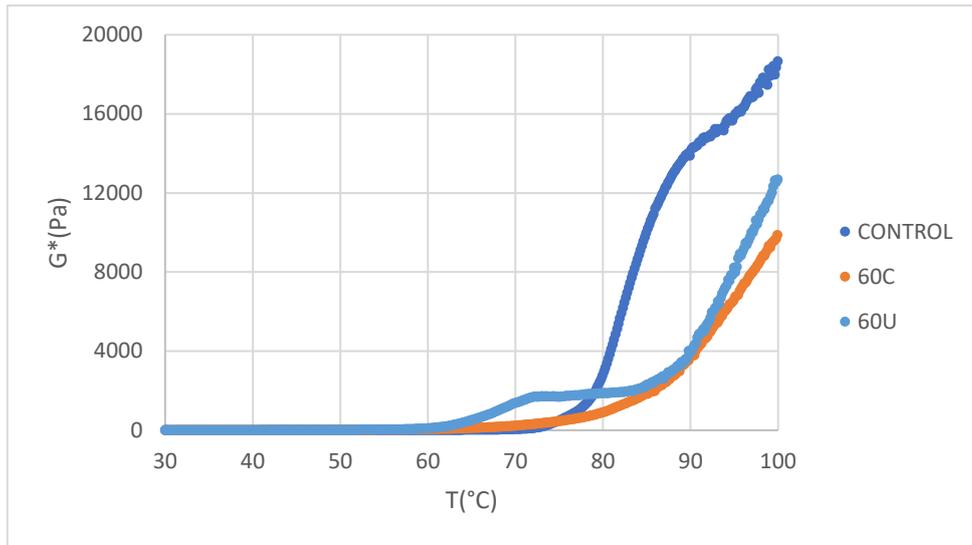
donde:

G\*: módulo complejo

G': módulo elástico

G'': módulo viscoso

La Figura 4 revela cómo las muestras aumentan el valor del módulo complejo conforme avanza el barrido de temperatura durante el ensayo. El control, en comparación con el resto de las muestras, alcanza valores superiores del módulo complejo. Puesto que el módulo complejo es una medida de la rigidez del material, cabe deducir que las muestras que contienen harina de chontaduro alcanzan una menor rigidez respecto a la muestra control de harina de trigo. Inicialmente, los valores del módulo complejo son mayores en las muestras con harina de chontaduro que en el control, esto se corresponde con la pregelatinización de las harinas. En la figura se observa que, mientras en la muestra control el módulo complejo comienza a aumentar entorno a los 73°C, en las muestras con harina de chontaduro el ascenso se da a temperaturas más bajas, entre 62-69°C. Llama la atención el cambio de tendencia presentado únicamente por las muestras con ultrasonidos entorno a los 73-75°C. Los ultrasonidos tienen como consecuencia el aumento de la viscosidad de la masa, por lo que las muestras tratadas presentan un cambio de tendencia que no se observa en el resto de las muestras. Alrededor de los 85°C, las muestras con harina de chontaduro comienzan a aumentar de manera exponencial. La presencia en las masas de harina de chontaduro con almidón pregelatinizado provoca un aumento del módulo complejo en un inicio, aunque la gelatinización del almidón de la harina de trigo y el resto de cambios físicos ocurre a una temperatura mayor que en el control.



**Figura 4.** Relación entre el módulo complejo de viscosidad ( $G^*$ ) y la temperatura para la muestra control y las muestras con harina de chontaduro, con y sin ultrasonidos, homogeneizadas a 60, 70 y 80°C

El ángulo de desfase (ecuación 4) permite clasificar la naturaleza del fluido estudiado.

$$\text{tg } \delta = \frac{G''}{G'} \quad (\text{ec. 4})$$

donde:

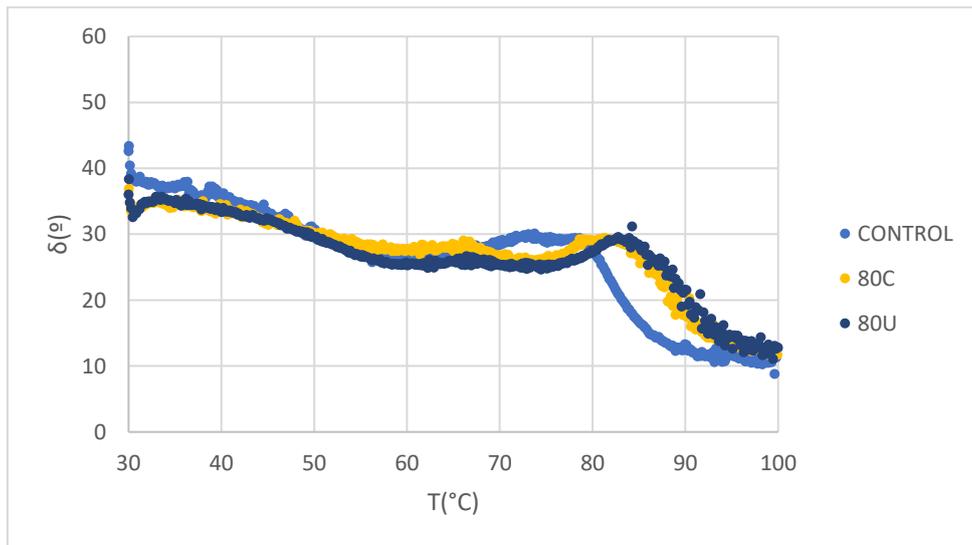
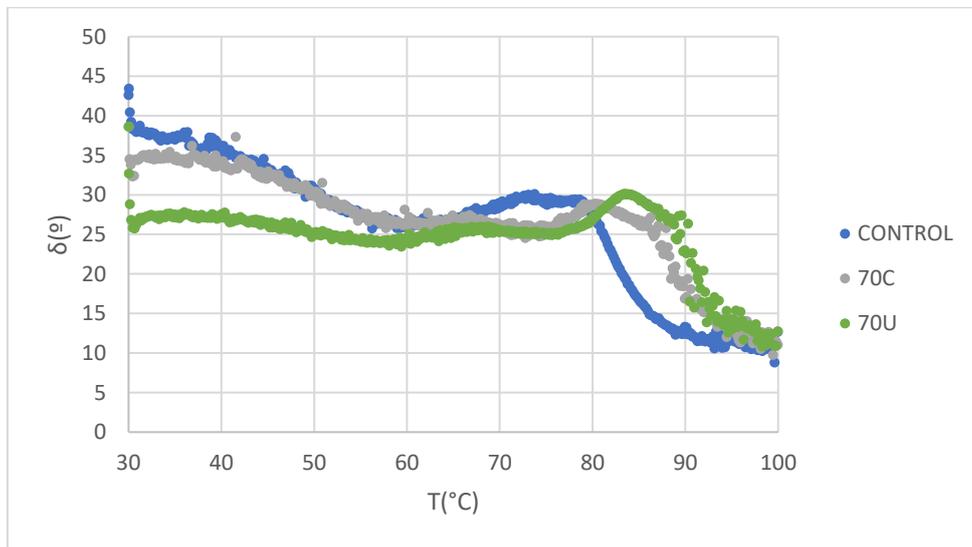
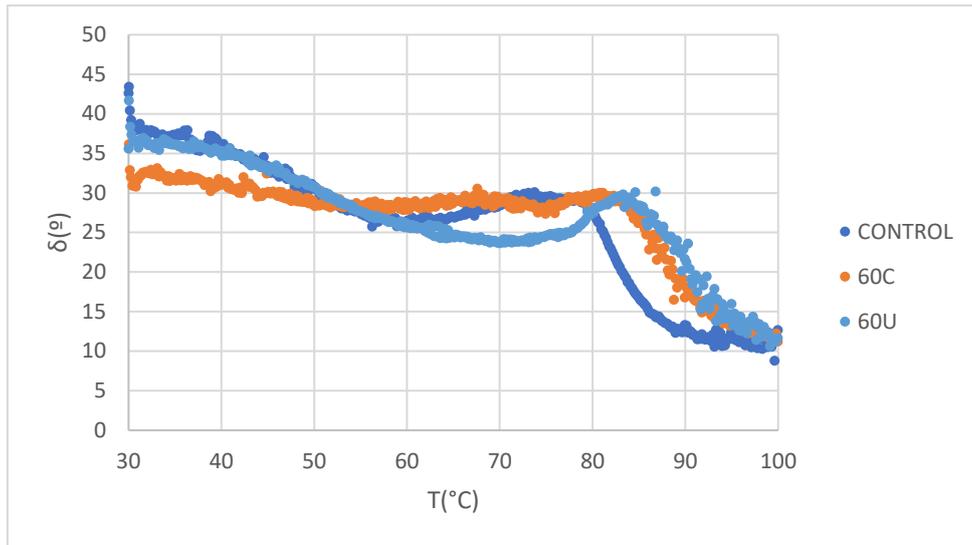
$\delta$ : ángulo de desfase

$G''$ : módulo viscoso

$G'$ : módulo elástico

En la Figura 5 se confirma que, como es habitual en los alimentos, las masas de todas las muestras analizadas tienen un comportamiento viscoelástico ( $0^\circ < \delta < 90^\circ$ ). En todos los casos  $\delta < 45^\circ$ , por lo que predomina el carácter elástico sobre el viscoso, con valores de  $G' > G''$ . Conforme se alcanzan las temperaturas más elevadas  $\delta$  disminuye, acercándose al comportamiento elástico ideal ( $\delta \approx 0^\circ$ ).

Puesto que el almidón procedente del chontaduro se encontraba gelatinizado previamente al ensayo, se deduce que los cambios del comportamiento de la masa observados en las muestras con chontaduro se deben, entre otros factores, al almidón de la harina de trigo. Las muestras manifestaron un cambio de comportamiento en torno a un ángulo de desfase de  $28-30^\circ$ , alcanzado un valor final de entre  $10-12^\circ$  de ángulo de desfase. Las masas que contienen harina de chontaduro exhiben temperaturas de gelatinización superiores a la muestra control ( $T^a$  gelatinización Control:  $73^\circ\text{C}$ ;  $T^a$  gelat. masas con harina de chontaduro:  $80,5-84^\circ\text{C}$ ), lo que indica que la introducción de chontaduro en la formulación de la masa tiene un importante impacto sobre los cambios físicos ocurridos en ella con la temperatura, siendo más marcado en las formulaciones en las que se empleó harina sometida a ultrasonidos.



**Figura 5.** Relación entre el ángulo de desfase ( $\delta$ ) y la temperatura para la muestra control y las muestras con harina de chontaduro, con y sin ultrasonidos, homogeneizadas a 60, 70 y 80°C

## 5. CONCLUSIONES

El tratamiento térmico aplicado en el proceso de obtención de la harina provocó la pregelatinización del almidón del chontaduro, teniendo consecuencias sobre los efectos causados por el posterior tratamiento de ultrasonidos.

Los ultrasonidos produjeron, de manera similar al tratamiento térmico, la rotura de componentes presentes en la harina como los glóbulos de grasa, estructuras celulares o los gránulos de almidón. Estos efectos se vieron aumentados al aplicar mayores temperaturas de homogeneización.

La adición de harina de chontaduro supuso un aumento en la viscosidad de las masas respecto al control, lo que se relacionó fundamentalmente con la pregelatinización del almidón.

Las masas formuladas con harinas sometidas a ultrasonidos y temperaturas de homogeneización más altas presentaron un mayor nivel de fusión entre los diferentes componentes de la fase continua, lo que se relacionó con el aumento registrado en su viscosidad. No se detectaron diferencias significativas en la viscosidad de las masas formuladas con harinas a las que no se aplicó ultrasonidos, independientemente de la temperatura de homogeneización aplicada.

La presencia de harina de chontaduro provocó un aumento en la temperatura a la que ocurre la gelatinización del almidón procedente del trigo y el resto de cambios físicos durante el calentamiento de las masas, siendo más marcado en las formulaciones en las que se empleó harina sometida a ultrasonidos.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- (1) ALBIZURI, A. (2019). Caracterización de las propiedades físicas y funcionales de un producto extruido a base de harina de maíz y chontaduro (*Bactris gasipaes* H.B.K) y evaluación de su aceptabilidad sensorial.
- (2) ANDRADE, J. S., PANTOJA, L. Y MAEDA, R. N. (2003). Melhora do rendimento e do processo de obtenção da bebida alcoólica de pupunha (*Bactris gasipaes* Kunth). *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, 23: 34–38.
- (3) CAMPO-VERA, Y., GÉLVEZ-ORDOÑEZ, V. M. Y AYALA-APONTE, A. (2018). Ultrasonido en el procesamiento (homogeneización, extracción y secado) de alimentos. *Bioteología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 16 (1): 102-113.
- (4) CHEMAT F., ZILL-E-HUMA Y KHAN, M. K. (2011). Applications of ultrasound in food technology: Processing, preservation and extraction. *Ultrasonics Sonochemistry*, 18 (4): 813–835.
- (5) CHIRALT, A., MARTÍNEZ, N., GONZÁLEZ, C., TALENS, P. Y MORAGA, G. (2007). *Propiedades físicas de los alimentos*. Ed. Universitat Politècnica de València. Valencia, España.
- (6) DE MELO NETO, B. A., BARBOSA, A. A., DOS SANTOS LEITE, C. X., DE ALMEIDA, P. F., BONOMO, R. C. F., Y PONTES, K. V. (2015). Chemical composition and functional properties of starch extracted from the pejibaye fruit (*Bactris gasepae* Kunth). *Acta Scientiarum. Technology*, 37 (1): 105-110.
- (7) DE OLIVEIRA, M. K., MARTINEZ-FLORES, H. E., ANDRADE, J. S., GARNICA-ROMO, M. G. Y CHANG, Y. K. (2006) *Use of pejibaye flour (Bactris gasipaes Kunth) in the production of food pastes*. *International journal of food science & technology*, 41 (8): 933–937.
- (8) DOLATOWSKI, Z., STADNIK, J. Y STASIAK, D. (2007). Applications of ultrasound in food technology. *Acta Scientiarum Polonorum Technologia Alimentaria*, 6 (3): 88-99.
- (9) DOMÉNECH-ASENSI, G., FRONTELA-SASETA, C., PERIAGO, M. J. Y ROS, G. (2015). Mejora del perfil nutricional de productos de bollería: composición nutricional y aceptabilidad. VIII Congreso de Ciencia y Tecnología de Alimentos y de Ingeniería de Alimentos, Badajoz (España).
- (10) DONOVAN, J.W. (1979). Phase transitions of the starch–water system. *Biopolymers*, 18: 263-275.

- (11) DUSSÁN-SARRIA, SAÚL, DE LA CRUZ-NOGUERA, R. E., Y GODOY, S. P. (2019). Estudio del Perfil de Aminoácidos y Análisis Proximal de Pastas Secas Extruidas a Base de Harina de Quinoa y Harina de Chontaduro. *Información tecnológica*, 30 (6): 93-100.
- (12) DUSSÁN-SARRIA, S., HURTADO-HURTADO, D. L., Y CAMACHO-TAMAYO, J. H. (2019). Granulometry, Functional Properties and Color Properties of Quinoa and Peach Palm Fruit Flour. *Información tecnológica*, 30 (5): 3-10.
- (13) GAMBOA-SANTOS, J., MONTILLA, A., CÁRCEL, J. A., GARCÍA-PÉREZ, J. V. Y VILLAMIEL, M. (2012). Aplicación de ultrasonidos de potencia en el pretratamiento y la deshidratación de hortalizas y frutas. *Alimentaria*, 438: 94-103.
- (14) GARCÍA, J. C. (2008). Tema 3. Viscoelasticidad lineal. *Universidad de Alicante, Departamento de Ingeniería Química*.
- (15) GARCÍA-JIMÉNEZ, A. Y VÁZQUEZ, C. L. (2016). Masa y harina de maíz nixtamalizado. *Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 1 (2): 78-82.
- (16) GÉLVEZ, V. M., LUNA, J. M., CAMPO, Y. (2016). Efecto del ultrasonido en las propiedades térmicas de almidón de trigo. *Vitae*, 23: S754-S758.
- (17) GIRALDO, A., DUFOUR, D., RIVERA, F., SÁNCHEZ, T., SCHEDEMAN X. Y GONZÁLES, A. (2010). Estudio de la diversidad del chontaduro (*Bactris gasipaes*) consumido en Colombia. (Poster en línea).
- (18) GÓMEZ, Á., HERNANDO, M. I. Y QUILES, M. D., (2016). Incorporación de nuevas emulsiones en la formulación de panna cottas. Estudio estructural y sensorial.
- (19) HLEAP, J. I., Y RODRÍGUEZ, G. C. (2015). Propiedades texturales y sensoriales de salchichas de tilapia roja (*Oreochromis sp.*) con adición de harina de chontaduro (*Bactris gasipaes*). *Ingeniería y Desarrollo*, 33 (2): 198-215.
- (20) IGLESIAS, E. (2012). Mejora del valor nutricional y tecnológico de productos de panadería por incorporación de ingredientes a base de chía (*Salvia hispanica L.*).
- (21) JAYASOORIYA, S. D., BHANDARI, B. R., TORLEY, P. Y D'ARCY B. R. (2004) Effect of high power ultrasound waves on properties of meat: a review. *International Journal of Food Properties*, 7 (2): 301-319.
- (22) LETERME, P., GARCÍA, M. F., LONDOÑO, A. M., ROJAS, M. G., BULDGEN, A. Y SOUFFRANT, W-B. (2005). Chemical composition and nutritive value of peach palm (*Bactris gasipaes* Kunth) in rats. *Journal of the Science Food and Agriculture*, 85 (9): 1505-1512.

- (23) LÓPEZ-CALVO, R., PÉREZ, A. M., GUILLÉN, C. I., VILLAPLANA, S. C., Y CASTRO, M. L. P. (2015). Evaluación de la aceptación por consumidores de un bocadillo de pejibaye (*Bactris gasipaes*) y estudio de su potencial como alimento funcional. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, 65 (1): 51-58.
- (24) MAJID, I., NAYIK, G. A. Y NANDA, V. (2015). Ultrasonication and food technology: A review. *Cogent Food & Agriculture*, 1 (1), 1071022.
- (25) MAJZOBI, M., SEIFZADEH, N., FARAHNAKY, A. Y MESBAHI, G. (2015) Effects of Sonication on Physical Properties of Native and Cross-Linked Wheat Starches. *Journal of Texture Studies*, 46 (2): 105–112.
- (26) MANCHUN, S., NUNTHANID, J., LIMMATVAPIRAT, S., Y SRIAMORNSAK, P. (2012). Effect of ultrasonic treatment on physical properties of tapioca starch. *Advanced materials research* by Trans Tech Publications Ltd, 506: 294-297.
- (27) MARTÍNEZ, C. A. (2019). Efecto de la inclusión de harina de chontaduro (*Bactris gasipaes*) en la calidad de la mortadela. Tesis doctoral en Tecnología de alimentos. Universidad Técnica de Ambato. 74 pp.
- (28) MORA-URPÍ, J., WEBER, J. C. Y CLEMENT, C. R. (1997). *Peach palm, Bactris gasipaes Kunth*. Ed. Bioersity International. Roma, Italia.
- (29) MURILLO, M., KRONEBERG, A., MATA, J. F., CALZADA, J. G. Y CASTRO, V. (1983). Estudio preliminar sobre factores inhibidores de enzimas proteolíticas presentes en la harina de pejibaye (*Bactris gasipaes*). *Revista de biología tropical*, 31 (2): 227-231.
- (30) OLIVEIRA, A. N. D., OLIVEIRA, L. A. D., ANDRADE, J. S. Y CHAGAS-JÚNIOR, A. F. (2007). Produção de amilase por rizóbios, usando farinha de pupunha como substrato. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, 27 (1): 61–66.
- (31) ORMAZA, M. L. (2010). Elaboración de pancakes de chocho como alternativa para el desayuno escolar.
- (32) PALACIOS, M. C. (2007). Mejora nutricional de productos derivados de cereales mediante el uso de nuevos fermentos. Tesis Doctoral en Ciencia y Tecnología de Alimentos. Universitat Politècnica de València. 139 pp.
- (33) PARADA, J., ROMERO, C., Y YÉPEZ, B. (2012). Aplicación de ultrasonido en el procesamiento de mora de Castilla (*Rubus glaucus Benth*): Efecto sobre la calidad funcional y evaluación como pretratamiento al secado convectivo. *Alimentos Hoy*, 21 (27): 15-38.

- (34) PATIÑO, V. M. (2002). *Historia y Dispersión de los Frutales nativos del Neotrópico*. Ed: CIAT Publications. Cali, Colombia. 655 pp.
- (35) Pérez, B. (2019). *Proteínas 2030: Líneas de innovación que marcan tendencia*. AINIA. Visto el 22 de Septiembre de 2020. <https://www.ainia.es/tecnoalimentalia/consumidor/tendencias-proteinas-vegetales/>
- (36) Pineda-Gómez, P., Coral, D. F., Arciniegas, M. L., Rorales, A., y Rodríguez, M. E. (2010). Papel del agua en la gelatinización del almidón de maíz: estudio por calorimetríadiferencial de barrido. *Ingeniería y Ciencia (Medellín, Colombia)*, 6 (11): 129-141.
- (37) Real Decreto 677/2016, de 16 de diciembre, por el que se aprueba la norma de calidad para las harinas, las sémolas y otros productos de la molienda de los cereales. *Boletín Oficial del Estado*. Madrid, 17 de diciembre de 2016, núm. 304, pp. 88513-88519. <https://www.boe.es/boe/dias/2016/12/17/pdfs/BOE-A-2016-11951.pdf>
- (38) REYES-GIRALDO, A. F., GUTIERREZ-MONTERO, D. J., ROJANO, B. A., ANDRADE-MAHECHA, M. M., Y MARTÍNEZ-CORREA, H. A. (2020). Sequential extraction process of oil and antioxidant compounds from chontaduro epicarp. *The Journal of Supercritical Fluids*, 166, 105022.
- (39) RIASCOS, A. P. (2018) Evaluación de las propiedades físicas y nutricionales de una galleta con inclusión de harina de chontaduro (*Bactris gasipaes*).
- (40) RIOS, M. J. B. L., DAMASCENO-SILVA, K. J., MOREIRA-ARAÚJO, R. S. D. R., FIGUEIREDO, E. A. T. D., ROCHA, M. D. M., Y HASHIMOTO, J. M. (2018). Chemical, Granulometric and Technological Characteristics of Whole Flours from Commercial Cultivars of Cowpea. *Revista Caatinga*, 31 (1): 217-224.
- (41) ROJAS-GARBANZO, C., PÉREZ, A. M., CASTRO, M. L. P. Y VAILLANT, F. (2012). Major physicochemical and antioxidant changes during peach-palm (*Bactris gasipaes* H.B.K.) flour processing. *Fruits*, 67 (6): 415-427.
- (42) TALENS, P. Y UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA. ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA AGRONÓMICA Y DEL MEDIO NATURAL - ESCOLA TÈCNICA SUPERIOR D'ENGINYERIA AGRONÒMICA I DEL MEDI NATURAL (2018). Caracterización del comportamiento viscoelástico de un alimento mediante un ensayo oscilatorio.
- (43) VALENCIA, G. A., MORAES, I. C. F., LOURENÇO, R. V., BITTANTE, A. M. Q. B., Y SOBRAL, P. J. D. A. (2015). Physicochemical, morphological, and functional properties of flour and starch from peach palm (*Bactris gasipaes* K.) fruit. *Starch-Stärke*, 67 (1-2): 163-173.

- (44) VELÁSQUEZ-GARCÍA, J., GUTIERREZ, D. J., ANDRADE-MAHECHA, M. M., Y MARTÍNEZ-CORREA, H. A. (2016). Pretratamiento con ultrasonido en extracción de compuestos bioactivos de mesocarpio de chontaduro (*Bactris gasipaes*) usando CO2 supercrítico. *Agronomía Colombiana*, 34: 1370-1373.
- (45) YUYAMA, L.K, AGUIAR, J.P., YUYAMA K, CLEMENT, C.R., MACEDO, S.H., FÁVARO, D.I., AFONSO, C., VASCONCELLOS, M.B., PIMENTEL, S.A., BADOLATO, E.S. Y VANNUCCHI, H. (2003). Chemical composition of the fruit mesocarp of three peach palm (*Bactris gasipaes*) populations grown in Central Amazonia, Brazil. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 54 (1): 49-56.
- (46) ZAMORA, J. D. (2012). Evaluación del proceso de obtención de harina de palmito (*Bactris gasipaes*) y su aplicación en planificación en el cantón Quevedo.