



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA  
UNIDAD IZTAPALAPA  
DIVISIÓN DE CIENCIAS BIOLÓGICAS Y DE LA SALUD

---

---

**Formación de bigeles basados en hidrogel de almidón (yuca,  
camote y chayotextle) y oleogel de cera de abeja para la  
protección de carotenoides**

---

---

**TESIS**

Para obtener el grado de  
**MAESTRA EN BIOTECNOLOGÍA**

**Presenta:**

**Julia De Los Santos Trinidad**

**Directora:**

**Dra. Angélica Román Guerrero**

**Asesores:**

**Dr. Eduardo Jaime Vernon Carter**

**Dr. César Pérez Alonso**

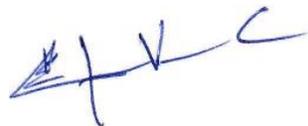
Iztapalapa, Ciudad de México, Julio 2022

El jurado designado por la  
**Comisión Académica del Posgrado en Biotecnología**  
de la Unidad Iztapalapa, aprobó la tesis que presentó  
IBT. JULIA DE LOS SANTOS TRINIDAD

El día 07 de julio del año 2022

Miembros del Jurado

Dr. Eduardo Jaime Vernon Carter  
Presidente



Dr. Francisco Cruz Sosa  
Secretario



Dra. María Eva Rodríguez Huevo  
Vocal



Dra. Nancy Alonso Carrillo  
Vocal



La Maestría en Biotecnología de la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa, pertenece al Padrón Nacional de Posgrados de Calidad (PNPC) del CONACYT y cuenta con apoyo del mismo Consejo; por lo que agradece la beca No. 1080748, recibida para el desarrollo de esta tesis

## AGRADECIMIENTOS Y DEDICATORIAS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por la beca otorgada para la realización de los estudios de la Maestría en Biotecnología.

A la Dra. Angélica Román Guerrero, por su apoyo incondicional y por todas sus enseñanzas. Sin duda su aportación para terminar este trabajo fue muy valioso, no me queda más que agradecerle por todas las cosas que aprendí con usted.

A cada uno de los integrantes de mi familia, en especial a mis padres, por todo el apoyo, cariño y amor incondicional que me han brindado durante toda mi vida. Concluir este proyecto de vida, no sería posible sin el apoyo de todos ellos.

A la Universidad Autónoma Metropolitana, en especial al Dr. Francisco Cruz-Sosa del Departamento de Biotecnología y al Dr. Eduardo Jaime Vernon Carter del Laboratorio de Bioprocesos por las facilidades otorgadas para trabajar en el laboratorio.



Casa abierta al tiempo

# Índice general

Resumen .....	7
1. Introducción .....	9
2. Antecedentes .....	12
<b>2.1 Sistemas gelificados</b> .....	<b>12</b>
<b>2.2 Bigeles</b> .....	<b>15</b>
<b>2.3 Almidón</b> .....	<b>18</b>
<b>2.4 Propiedades funcionales de los almidones</b> .....	<b>20</b>
<b>2.5 Fuentes de almidones</b> .....	<b>21</b>
3. Justificación .....	23
4. Hipótesis .....	24
5. Objetivos .....	25
<b>5.1 Objetivo general</b> .....	<b>25</b>
<b>5.2 Objetivos particulares</b> .....	<b>25</b>
6. Metodología .....	26
<b>6.1 Materiales</b> .....	<b>26</b>
<b>6.2 Acondicionamiento de la materia prima</b> .....	<b>26</b>
<b>6.3 Aislamiento del almidón</b> .....	<b>27</b>
<b>6.4 Formación de los sistemas gelificados</b> .....	<b>27</b>
6.4.1 Preparación del hidrogel (HG) .....	27

6.4.2	Preparación de oleogel (OG).....	27
6.4.3	Preparación de bigeles .....	28
<b>6.5</b>	<b><i>Caracterización fisicoquímica de los sistemas gelificados</i></b> .....	<b>29</b>
6.5.1	Capacidad de retención de fase solvente (sinéresis).....	29
6.5.2	Espectroscopia de difracción de rayos X (XRD) .....	29
6.5.3	Espectroscopia de Infrarrojo con Transformada de Fourier (FT-IR).....	29
6.5.4	Morfología .....	30
6.5.5	Propiedades reológicas .....	30
6.5.6	Propiedades texturales .....	31
<b>6.6</b>	<b><i>Estabilidad de los bigeles</i></b> .....	<b>31</b>
<b>6.7</b>	<b><i>Evaluación de la protección de carotenoides en los bigeles</i></b> .....	<b>31</b>
<b>6.8</b>	<b><i>Análisis estadístico</i></b> .....	<b>32</b>
<b>7.</b>	<b>Resultados</b> .....	<b>33</b>
<b>7.1</b>	<b><i>Rendimiento de extracción de almidones</i></b> .....	<b>33</b>
<b>7.2</b>	<b><i>Formación y caracterización de HG y OG</i></b> .....	<b>35</b>
7.2.1	Espectroscopia de difracción de rayos X (XRD) .....	39
7.2.2	Espectroscopia FT-IR.....	41
7.2.3	Propiedades reológicas .....	44
<b>7.3</b>	<b><i>Obtención de bigeles</i></b> .....	<b>46</b>
<b>7.4</b>	<b><i>Caracterización de los bigeles</i></b> .....	<b>48</b>
7.4.1	Propiedades reológicas .....	53
7.4.2	Propiedades de textura.....	55
<b>7.5</b>	<b><i>Protección de carotenoides en bigeles tipo O/W</i></b> .....	<b>57</b>
<b>8.</b>	<b>Conclusiones</b> .....	<b>63</b>
<b>9.</b>	<b>Referencias</b> .....	<b>64</b>
<b>10.</b>	<b>Anexos</b> .....	<b>75</b>



# Índice de figuras

Figura 2.1. Principales agentes gelificantes utilizados en la formación de hidrogeles y oleogeles.....	14
Figura 2.2. Clasificación de los sistemas bigelados de acuerdo con su distribución de fases. ....	16
Figura 2.3. Diagrama de preparación de un bigel, la obtención del oleogel requiere calentamiento, mientras que el hidrogel y el bigel pueden prepararse con un calentamiento opcional (Martín-Illana, et al., 2022) .....	17
Figura 2.4. Estructura de los gránulos de almidón (Imagen tomada de Seung, 2020).....	19
Figura 2.5. Clasificación de almidones y características estructurales. ....	20
Figura 2.6. Principales fuentes de almidón estudiadas .....	22
Figura 7.1. Tubérculos de yuca, camote y chayotextle (arriba), las rodajas de cada tubérculo (centro) y los almidones extraídos (abajo).....	33

Figura 7.2. Micrografía de los gránulos de almidón obtenidos de tres tipos de tubérculos, utilizando luz directa (arriba) y luz polarizada (abajo).....	35
Figura 7.3. Imágenes de los hidrogeles formados con las tres fuentes de almidón (10% p/p). .....	36
Figura 7.4. Micrografía de los hidrogeles obtenidos con almidón de tres tipos de tubérculos, utilizando luz directa (arriba) y luz polarizada (abajo).....	37
Figura 7.5. Oleogeles (OG) formados con aceite vegetal y cera de abeja a distintas concentraciones (izquierda) y sus micrografías bajo luz directa (centro) y luz polarizada (derecha). ....	38
Figura 7.6. Patrones de difracción de rayos X para (a) almidones nativos y (b) hidrogeles de yuca, camote y chayotextle. ....	40
Figura 7.7. Patrones de difracción de rayos X para los oleogeles de cera de abeja. ....	41
Figura 7.8. Perfiles de espectroscopia FT-IR de hidrogeles de almidón de yuca, camote y chayotextle. ....	42
Figura 7.9. Perfiles de FT-IR para los oleogeles formados con cera de abeja.....	43
Figura 7.10. Perfiles de curvas de flujo de HG para los hidrogeles de almidón. ....	44
Figura 7.11. Perfil viscoelástico de los hidrogeles formados con almidones. ....	45
Figura 7.12. Perfiles reológicos: a) curvas de flujo y b) módulos de almacenamiento ( $G'$ ) y de pérdida ( $G''$ ) para los oleogeles. ....	46
Figura 7.13. Bigeles tipo O/W formados con HG de almidón y OG5. ....	47
Figura 7.14. Morfología de bigeles O/W formados con almidón de yuca con tinción de la fase HG con Azul Nilo (izquierdo) y fase OG <sub>5</sub> con Rojo Nilo (derecho). ....	49
Figura 7.15. Morfología de bigeles O/W formados con almidón de camote con tinción de la fase HG con Azul Nilo (izquierdo) y fase OG <sub>5</sub> con Rojo Nilo (derecho). ....	50
Figura 7.16. Morfología de bigeles O/W formados con almidón de chayotextle con tinción de la fase HG con Azul Nilo (izquierdo) y fase OG <sub>5</sub> con Rojo Nilo (derecho). ...	51
Figura 7.17. Perfiles de XRD y FTIR para los bigeles formados con almidones de yuca (a y d), camote (b y e) y chayotextle (c y f).....	52

Figura 7.18. Perfiles de flujo (izq.) y propiedades viscoelásticas (der.) para los bigeles formados con almidones de yuca (a y d), camote (b y e) y chayotextle (c y f). 54

Figura 7.19. Bigeles a base de almidón de yuca, camote y chayotextle incorporado el carotenoide durante el tiempo de almacenamiento ( $t_0$  y  $t_7$ ). .....60

Figura 7.20. Gráfica de espacio de color durante el tiempo de almacenamiento ( $t_0$  y  $t_7$ ) de los bigeles con las coordenadas  $a^*$ ,  $b^*$  y el tono. ....61



# Índice de tablas

Tabla 7.1 Rendimientos extracción de almidón a partir de tubérculos.....	34
Tabla 7.2. Parámetros reológicos para los hidrogeles de almidón. ....	45
Tabla 7.3. Parámetros de textura para los sistemas gelificados HG, OG5, y BG empleando distintos almidones. ....	57
Tabla 7.4. Parámetros de color de los bigeles O/W estabilizadas con los tres almidones al cabo de 7 días de almacenamiento bajo exposición directa a luz (25° C).....	59



## Resumen

Los bigeles (BG) o geles híbridos, se forman a partir de la mezcla de dos fases de gel, oleogel (OG) e hidrogel (HG). Investigaciones recientes han reportado que estos sistemas tienen gran potencial de aplicaciones en la industria de los alimentos, principalmente en la protección, liberación y entrega controlada de compuestos bioactivos, con propiedades funcionales superiores a las de los OGs y HGs. El propósito de este trabajo de investigación fue desarrollar y caracterizar bigeles para la protección de un compuesto lipofílico, basados en OGs de aceite de canola, cera de abeja en distintas concentraciones y  $\beta$  caroteno, e HGs empleando tres tipos de almidón (yuca, camote y chayotextle) disperso en agua. Los OGs se mezclaron con los HGs en distintas proporciones másicas (70:30, 60:40 y 50:50), a una velocidad de homogenización y temperatura determinada. A los sistemas HGs, OGs y BGs se les evaluaron sus propiedades reológicas (viscoelásticas y propiedades de flujo), morfología por microscopía óptica, cristalinidad por XRD, estructura por FT-IR, análisis de perfil de textura (APT) y color Lab. Los resultados mostraron que los tres almidones presentaron la capacidad para la formación de hidrogeles, siendo el almidón de yuca la que presentó mayor capacidad de retención de agua. El OG formado con 5% de cera de abeja, fue el más adecuado para la formación de BGs con propiedades más adecuadas. Los geles (OGs, HGs y BGs) mostraron un módulo elástico ( $G'$ ) mayor que el módulo viscoso ( $G''$ ) en función del % de deformación en la región viscoelástica lineal, y un comportamiento reoadelgazante en función de la tasa de corte. Las micrografías ópticas indican que los BGs resultantes mostraron un sistema de tipo aceite-en-agua (O/W), es decir, que el OG se encontraba disperso en el HG. Los resultados de XRD y FT-IR, señalan que los BGs fueron formados por interacciones físicas entre OGs y HGs, ya que los BGs no mostraron señales nuevas o distintas, esperadas en interacciones químicas. Los BGs mostraron buena estabilidad en la protección del  $\beta$  caroteno, por lo que estos sistemas a base de almidones y cera de abeja presentan características adecuadas para su uso en la protección de compuestos bioactivos de interés alimentaria.



Casa abierta al tiempo

## Abstract

Bigels (BG) or hybrid gels are formed from the mixture of two gel phases, oleogel (OG) and hydrogel (HG). Recent research has reported that these systems have great applications potential in the food industry, mainly in the protection, release and controlled delivery of bioactive compounds, displaying superior functional properties than OGs and HGs. The purpose of this research work was to develop and characterize bigels for the protection of a lipophilic compound, based on OGs from canola oil, beeswax in different concentrations and  $\beta$ -carotene, and HGs using three types of starch (cassava, sweet potato and chayotextle) dispersed in water. The OGs were mixed with the HGs in different mass proportions (70:30, 60:40 and 50:50), at a determined homogenization speed and temperature. The HGs, OGs and BGs systems were evaluated for their rheological properties (viscoelastic and flow properties), morphology by optical microscopy, crystallinity by XRD, structural features by FT-IR, texture profile analysis (TPA) and Lab color. Results showed that the three starches presented the capacity for the formation of hydrogels, being cassava starch the one that presented the highest water retention capacity. The OG formed with 5% beeswax was the most suitable for the formation of BGs with more adequate properties. The gels (OGs, HGs and BGs) showed an elastic modulus ( $G'$ ) greater than the viscous modulus ( $G''$ ) in the linear viscoelastic region as a function of % deformation, and a shear-thinning flow behavior as a function of the shear rate. The optical micrographs indicate that the resulting BGs showed an oil-in-water (O/W) type system, that is, the OG was dispersed in the HG. The XRD and FT-IR results indicate that the BGs were formed by physical interactions between OGs and HGs, since the BGs did not show new or different signals, expected in chemical interactions. The BGs showed good stability in the protection of  $\beta$ -carotene, so these systems based on starches and beeswax have adequate characteristics for their use in the protection of bioactive compounds of food interest.



Casa abierta al tiempo

# 1. Introducción

Un gel puede definirse como un sistema coloidal semisólido, con propiedades viscoelásticas asociadas a la naturaleza química del agente gelante que se utilice y una alta capacidad de retención de agua. Como se ha mencionado previamente, los geles pueden clasificarse dependiendo de la naturaleza química de sus componentes como hidrogeles, cuando la fase continua de estos sistemas consiste de un solvente polar como el agua, o bien como organogeles donde la fase continua está compuesta por solventes orgánicos, aceites minerales o aceites vegetales ([Martín-Illana et al., 2022](#)).

Durante los últimos años los sistemas gelificados han ganado importancia debido a las ventajas que ofrecen dada su versatilidad de aplicaciones en las industrias farmacéutica y cosmética, principalmente. En el caso de los hidrogeles, estos exhiben propiedades funcionales como buena espacibilidad, sobretodo cuando se emplea en aplicaciones tópicas, efecto refrescante y humectante, y fácil eliminación debido a su naturaleza hidrofílica, con la desventaja de no tener buen efecto para el acarreo de bioactivos de naturaleza lipofílica, limitando su aplicabilidad sólo a bioactivos hidrosolubles. Se han empleado diversos polímeros naturales o sintéticos de carácter hidrofílico para su estructuración, como gomas, alginatos, gelatina, carbopol, etc., cuyas propiedades fisicoquímicas han mejorado la estabilización de los hidrogeles. Los oleogeles por su parte, permiten el acarreo y disolución de bioactivos hidrofóbicos y mejorando su biodisponibilidad debido a que presentan mejor compatibilidad con membranas celulares, teniendo como inconveniente que, en aplicaciones tópicas, este tipo de sistemas deja residuos, dificultando su eliminación de la piel después de la aplicación debido a su

pegajosidad y residuos aceitosos (Vintiloiu & Leroux, 2008). Existen múltiples oleogeladores que han sido empleados para la estructuración de los oleogeles, como los ácidos grasos, fitoesteroles, monoglicéridos, lecitina y ceras, entre otros. Las ceras han demostrado una fuerte capacidad para la gelificación de la fase lipídica, siendo la cera de abeja uno de las más estudiadas, debido a su buena capacidad de unión al aceite y propiedades fisicoquímicas adecuadas (Pang et al., 2020).

De acuerdo a los anterior, los sistemas conocidos como bigeles son formulaciones semisólidas que se preparan mezclando dos geles a una alta velocidad (Rehman et al., 2014), que pueden ser geles coloidales o una mezcla de un gel acuoso (hidrogel) y oleosa (organogel u oleogel) (Almeida et al., 2008; Mokhtar-Ibrahim et al., 2013).

Los bigeles han demostrado una serie de aplicaciones industriales en las áreas biomédicas y farmacéuticas, cuyas aplicaciones sobresalen por su uso como portadores o vehículos para la administración simultánea de fármacos o moléculas bioactivas (Rehman et al., 2014). Asimismo, su uso en formulaciones de las industrias cosmética y alimentaria aún es escasa y se encuentra en desarrollo (Bollom et al., 2020). Dentro de las principales ventajas que ofrecen estos sistemas se encuentra la estabilidad prolongada que proveen a los sistemas coloidales durante el almacenamiento, presentando mayor estabilidad en comparación con emulsiones y otros sistemas bifásicos dispersos, además de no requerir infraestructura especializada, ni alta demanda de aditivos como los agentes tensoactivos (Lupi et al., 2015; Rehman & Hanif-Zulfakar, 2014).

En este sentido, los almidones han mostrado poseer propiedades funcionales adecuadas para formar y estabilizar sistemas gelificados. El almidón es un polisacárido constituido por dos polímeros químicamente distinguibles: la amilosa y la amilopectina (Jane, 2006). Sus aplicaciones se centran en la industria alimentaria, química, textil y farmacéutica, como agentes estabilizadores, emulsificantes, mejoradores de textura, entre otros, siendo estas propiedades funcionales determinantes en la calidad del producto final (Pedrosa & Schmiele, 2019). Las fuentes convencionales más importantes para la extracción del almidón son los granos de los cereales, aunque en los últimos años ha habido una tendencia creciente en la búsqueda de nuevas fuentes no convencionales como alternativas para obtener almidones que presenten diversas características fisicoquímicas, estructurales y

funcionales, que amplíen la gama de usos en las diversas áreas industriales. Entre las nuevas fuentes que pueden ser utilizados para la extracción de este polisacárido se encuentran los tubérculos, los cuales juegan un papel significativo en el sistema global de alimentación y contribuyen a los requerimientos energéticos de gran cantidad de personas en los países en vías de desarrollo ([Hernández-Medina et al, 2008](#)).

Por lo anterior, el presente trabajo tiene como objetivo emplear tres fuentes de almidones: yuca (*Manihot esculenta*), camote dulce (*Ipomoea batatas*), y chayotextle (*Sechium edule*) en hidrogeles, y aceite de canola y cera de abeja en oleogeles, para la formación y caracterización de bigeles como sistemas de acarreo, protección contra degradación y liberación controlada de betacaroteno como compuesto modelo. Debido a que los carotenoides son los principales colorantes naturales utilizados en la industria alimentaria, por ello es importante la búsqueda de nuevos métodos más eficientes para su protección a la degradación del color.



## 2. Antecedentes

### 2.1 Sistemas gelificados

Los geles basados en el uso de polímeros representan un tipo de materiales suaves cuyas aplicaciones en el área de alimentos se centran en el reemplazo de la fracción lipídica de los alimentos. Estos sistemas se forman de al menos dos componentes principales: un componente líquido (polar o no polar) que actúa como solvente y un componente sólido que actúa como agente gelificante, generalmente empleando moléculas de bajo peso molecular ([Shakeel et al., 2021](#)). Generalmente los geles son expresados como sistemas con alta concentración de solvente que se encuentra confinado en una matriz formada por un agente estructurante que se encuentra a una concentración baja, formando el esqueleto del gel ([Davidovich-Pinhas, 2018](#)). El agente gelificante atrapa la fase disolvente formando una estructura de red tridimensional para dar características semisólidas, donde la menor cantidad de líquido es adecuado para asegurar el carácter elástico de la matriz gelificada ([Babu et al., 2014](#); [Rathod & Mehta, 2015](#); [Shakeel et al., 2018](#)). Desde este punto de vista, el esqueleto del gel puede conformarse por pequeñas moléculas que se autoensamblan ([Skillin et al., 2014](#)), o bien mediante la formación de redes poliméricas ([Suzuki & Hanabusa, 2010](#)), los cuales forman los arreglos 3D por medio de interacciones físicas o químicas. En el primer caso, las interacciones se atribuyen a la formación de enlaces tipo puentes de hidrógeno, interacciones electrostáticas, fuerzas de van der Waals, fuerzas hidrofóbicas, entre otras, y se ven influenciadas por factores ambientales como el pH, la temperatura, y la fuerza iónica ([Buerkle & Rowan, 2012](#); [Davidovich-Pinhas, 2018](#)). En el caso de las interacciones por vía química, éstas generan enlaces covalentes que no pueden ser susceptibles de manipulación ([Rubinstein & Colby, 2003](#)).

Existen diferentes clasificaciones de los sistemas gelificados. Estas pueden basarse en el tipo de estructura 3D que se forma en las redes poliméricas, o bien el tipo de polaridad que tenga la fase solvente. Los principales grupos son los organogeles, hidrogeles, emulsiones gelificadas, bigeles, entre otros (Ajazudin et al., 2013; Li & Mooney, 2016; Shakeel et al., 2018; Shakeel et al., 2021). Los hidrogeles se obtienen cuando la fase disolvente está compuesta por un disolvente polar, mientras que los organogeles u oleogeles se obtienen cuando la fase disolvente está constituida por un disolvente no polar u orgánico, como los aceites vegetales comestibles (Abdallah & Weiss, 2000). En estos sistemas, la formación del gel emplea moléculas de bajo peso molecular como los péptidos o ácidos grasos, o de alto peso molecular como los polisacáridos y proteínas. Debido a las características de cada uno de estos sistemas, los hidrogeles ofrecen una plataforma para desarrollar aplicaciones fisiológicas (Ahmed, 2015; Peppas et al., 2000), mientras que los oleogeles exhiben un espectro diferente de propiedades físicas que pueden modificarse “a la medida” para ofrecer características de hidrofobicidad y actividad antimicrobiana específicas, debido a la baja actividad de agua en estos sistemas (Skilling et al., 2014), en la Figura 2.1 se muestran los principales compuestos empleados como agentes gelificantes.

Además, los procesos de gelificación de fases oleosas (organogelificación) han permitido convertir líquidos no polares en materiales sólidos suaves mediante fenómenos de superficie o fuerzas capilares, sin modificar las propiedades químicas de la fase líquida (Patel, 2017; Shakeel et al., 2021), logrando la formación de redes 3D en el gel, a través del arreglo estructural de las redes cristalinas, micelas, fibras o agregados, formados por el agente gelificante. A pesar de que tanto los hidrogeles como los oleogeles poseen características que ofrecen ventajas sobre la protección, acarreo y liberación de compuestos bioactivos (antioxidantes, fármacos, etc.), estos sistemas aún son susceptibles de exhibir cierta inestabilidad ante los factores ambientales que les rodean, por lo que una de las estrategias que ha comenzado a tener mayor auge es la incorporación de una de estas fases gelificadas dentro de la otra, formando sistemas estructurados bifásicos (Martin-Illana, et al., 2022; Cui et al., 2022), como los bigeles.

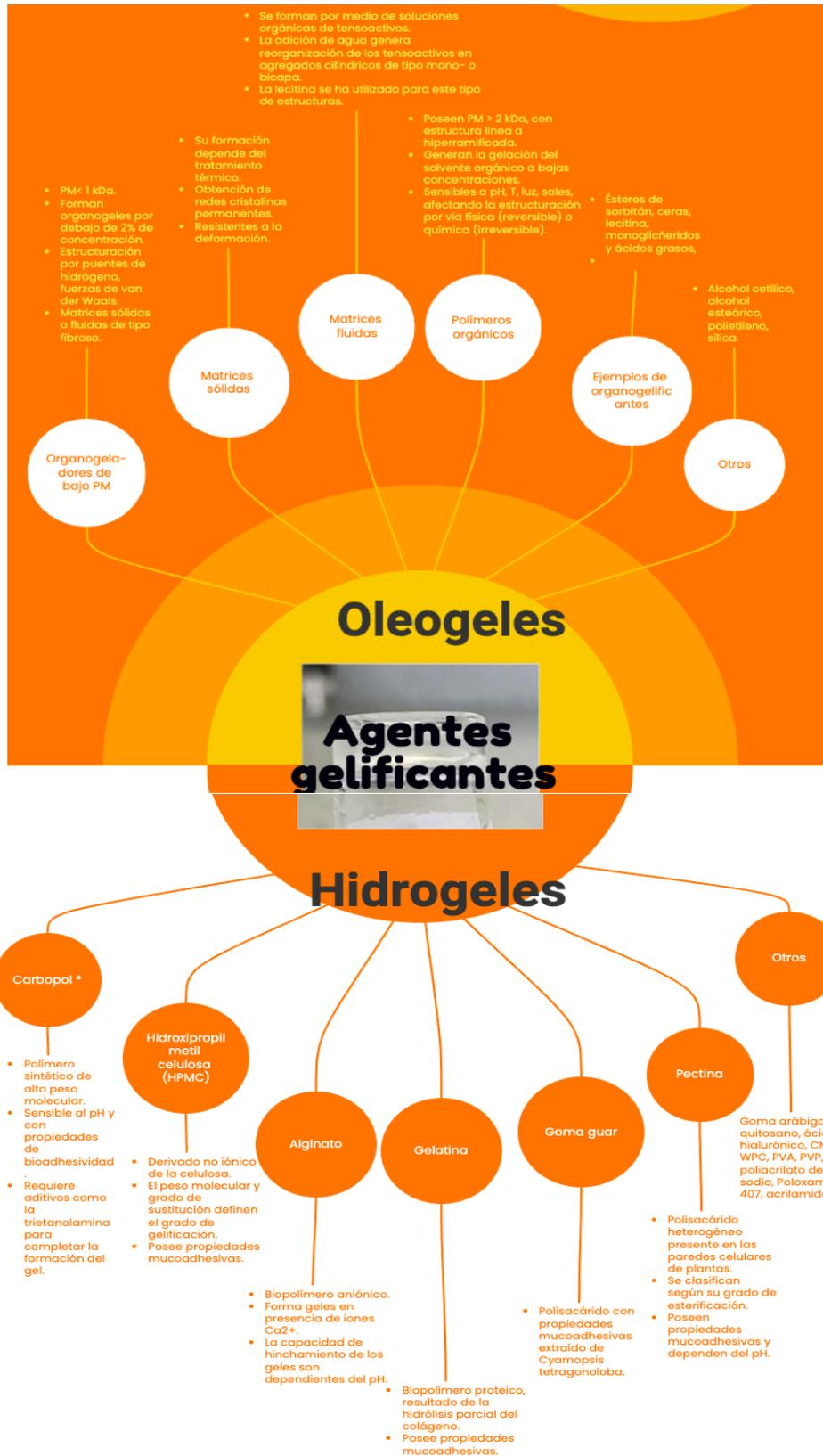


Figura 2.1. Principales agentes gelificantes utilizados en la formación de hidrogeles y oleogeles.

## 2.2 Bigeles

Los bigeles o geles híbridos son sistemas bifásicos complejos que resultan de la combinación de un hidrogel y un oleogel (Martín-Illana, et al., 2022). Este término fue descrito por primera vez por Almeida et al., (2008), quien denominó a la mezcla de un organogel con un hidrogel bajo el término de "bigel". Desde entonces, el interés la comprensión y aplicación de estos sistemas ha aumentado, debido a sus propiedades fisicoquímicas y funcionales mejoradas (Deng et al., 2015), siendo su capacidad para actuar simultáneamente como vehículo de compuestos hidrófilos e hidrófobos, su mayor ventaja. Además, la naturaleza semisólida de ambas fases, confiere a estos geles una mayor estabilidad termodinámica y cinética en comparación con otros sistemas bifásicos como las emulsiones y los emulgeles (Behera et al., 2015; Patel-Kodela et al., 2017), por lo cual son de gran interés en diversas áreas de la industria. A pesar de los estudios recientes sobre este tipo de sistemas gelificados, la mayoría de las aplicaciones se han centrado en áreas farmacéuticas y cosméticas, dejando un potencial de desarrollo en el área de los alimentos. De acuerdo con la distribución de fases, los bigeles pueden clasificarse en tres grupos principales, de acuerdo con su organización estructural y la distribución de las fases geladas, como se muestra en la Figura 2.2.

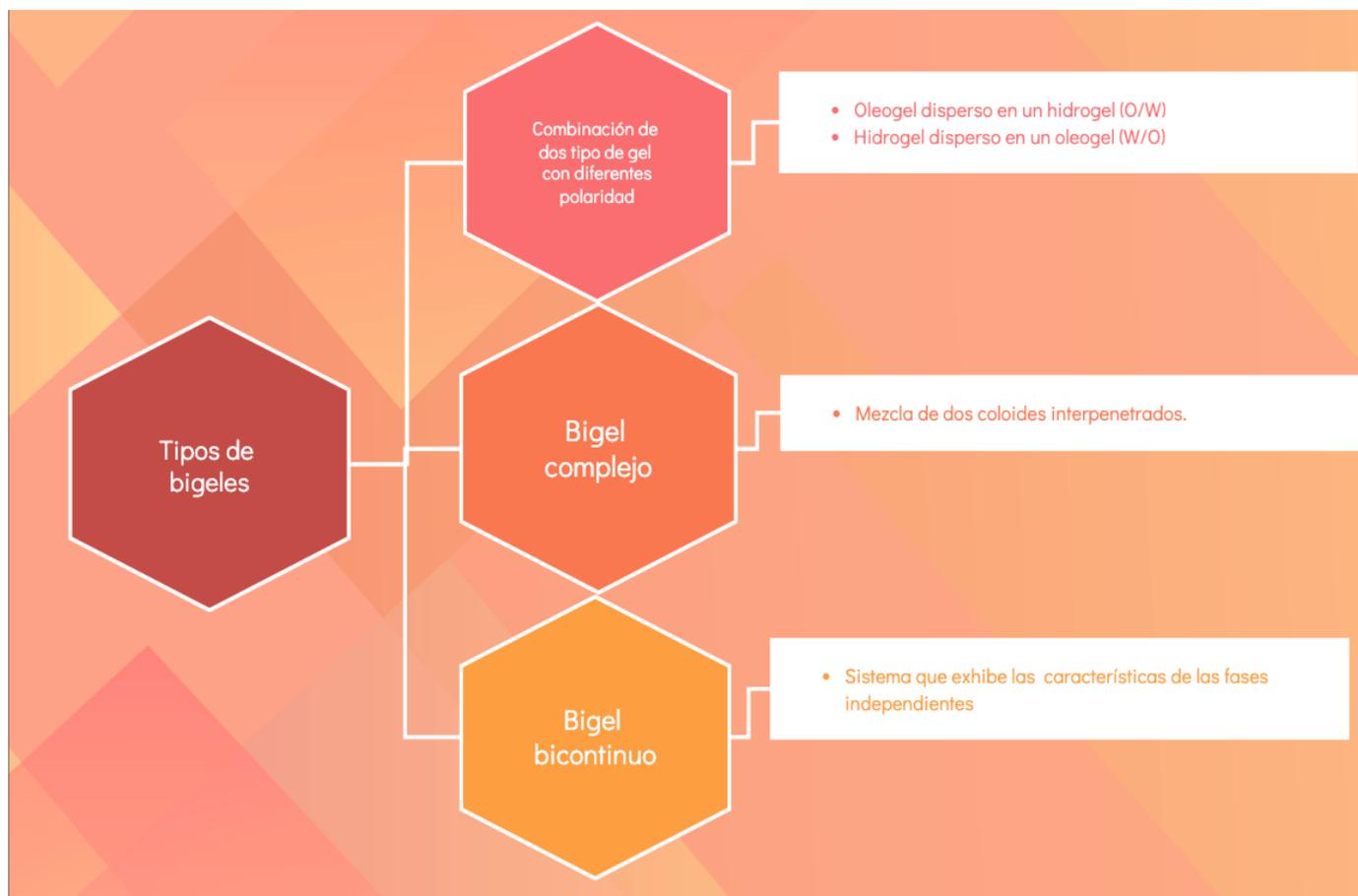


Figura 2.2. Clasificación de los sistemas bigelados de acuerdo con su distribución de fases.

Al igual que los emulgeles, los bigeles poseen las ventajas tanto de las emulsiones como de los geles (hidrogeles y oleogeles), superando los inconvenientes o desventajas que posee cada sistema (Sagiri et al., 2015). Sin embargo, a diferencia de las emulsiones, los bigeles no necesitan el uso de compuestos tensoactivos, mostrando estabilidad prolongada y la capacidad de contener compuestos bioactivos tanto lipofílicos como hidrofílicos (Andonova et al., 2017).

La preparación de los bigeles consiste en la preparación de los geles individuales, hidrogel y oleogel, y su posterior mezclado (Figura 2.3). Durante esta segunda etapa, el proceso de mezclado del hidrogel en el oleogel, o viceversa, se lleva a cabo bajo la influencia de factores ambientales como la temperatura, la velocidad de mezclado, considerando que la relación másica entre las fases geladas es relevante para la estructuración de los bigeles (Martín-Illana et al., 2022).

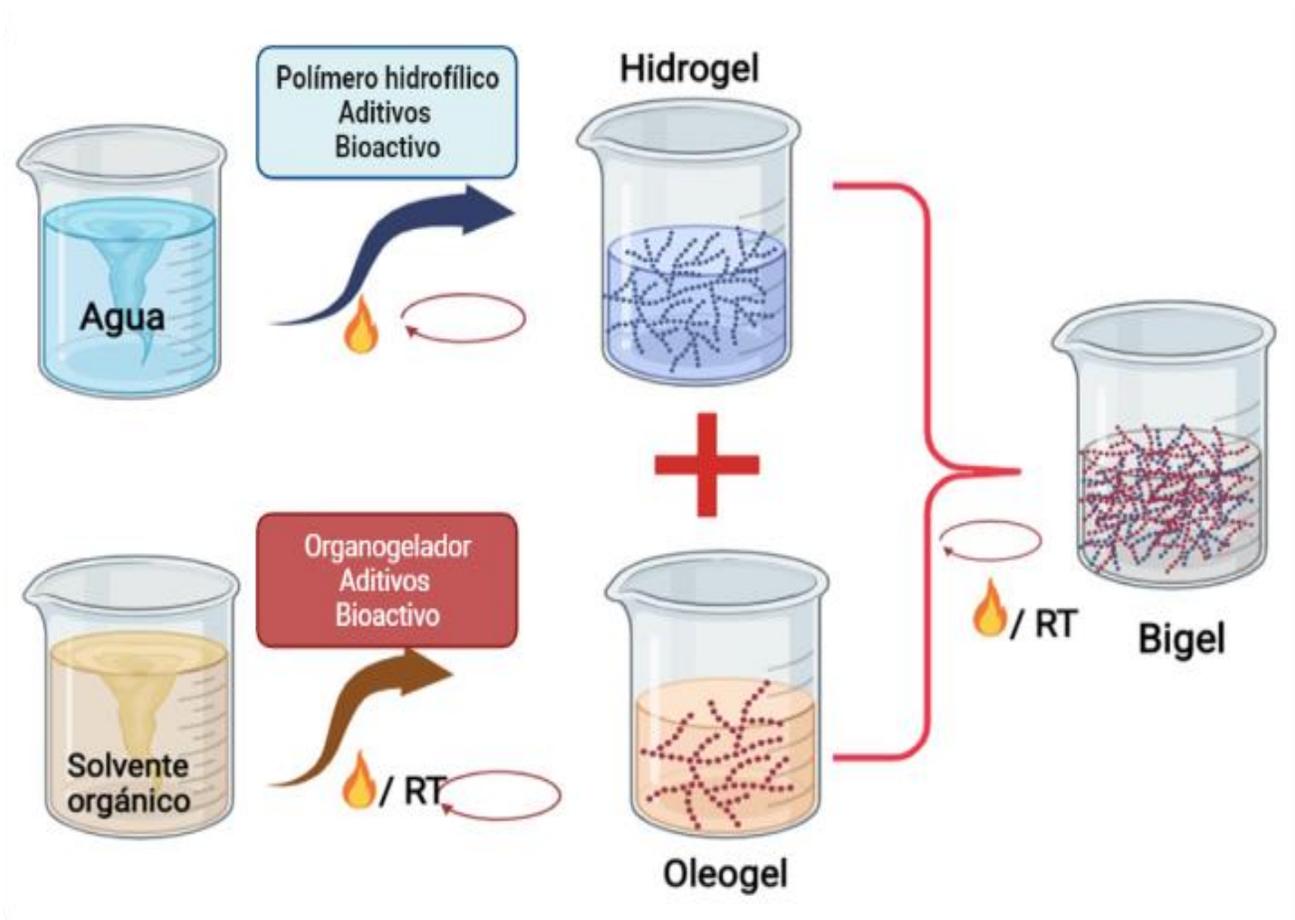


Figura 2.3. Diagrama de preparación de un bigel, la obtención del oleogel requiere calentamiento, mientras que el hidrogel y el bigel pueden prepararse con un calentamiento opcional (Martín-Illana, et al., 2022). Creado en BioRender.com

De acuerdo con Behera et al., (2014), el uso de polisacáridos como el alginato de sodio, carboximetilcelulosa, maltodextrina y almidón de papa, mostraron buenas propiedades gelificantes para soportar la formación de bigeles como vehículos de liberación de metronidazol y bacterias probióticas. Cabe mencionar que el uso de almidones en la formación de bigeles ha sido poco explorada, por lo que este trabajo propone emplear tres fuentes de almidón como agentes estructurantes.

### 2.3 Almidón

El almidón es un polisacárido abundante en la naturaleza, se encuentra principalmente en tubérculos, raíces, hojas, frutas y semillas de plantas (Cheng et al., 2021). Este polisacárido se encuentra en forma granular en los cloroplastos de hojas verdes y en los amiloplastos de tubérculos y granos (cereales como maíz, trigo, arroz, sorgo) (Aristizábal & Sánchez, 2007; Bashir & Aggarwal, 2019).

El almidón está formado por dos fracciones polisacáridas, amilosa y amilopectina (Figura 2.4). La amilosa es un polímero lineal formado por unidades de glucosa unidas por enlaces glicosídicos  $\alpha(1 \rightarrow 4)$ , mientras que la amilopectina es un polímero ramificado formado por cadenas lineales de glucosa conectadas por enlaces glicosídicos  $\alpha(1 \rightarrow 4)$ , los cuales se mantienen unidos por enlaces glicosídicos  $\alpha(1 \rightarrow 6)$  en los puntos de ramificación (Shalviri et al., 2010; Yang et al., 2022). Dependiendo de la proporción en la que estas fracciones se encuentren en el almidón en las distintas fuentes vegetales, confieren diversidad de propiedades fisicoquímicas y funcionales, dando lugar a diferentes aplicaciones como agentes gelificantes, estabilizantes, espesantes, agentes de retención de agua en los alimentos (Ismail et al., 2013; Liu & Xu, 2019; Šárka & Dvořáček, 2017; Moorthy, 2002).

Asimismo, la organización intramolecular entre amilosa y amilopectina conduce a la formación de zonas cristalinas (capas densas con un alto número de ramificaciones) y amorfas (capas menos organizadas ricas en puntos de enlaces  $\alpha$ -D-(1 $\rightarrow$ 6)), lo que le da al almidón una estructura semicristalina, con propiedades específicas como la presencia de un cruce en el gránulo ante una observación con luz polarizada y la difracción de los rayos X con tres tipos de espectro que permiten diferenciar los almidones de cereales, raíces y tubérculos (Ruß, 2016; Bashir & Aggarwal, 2019; Seung, 2020).

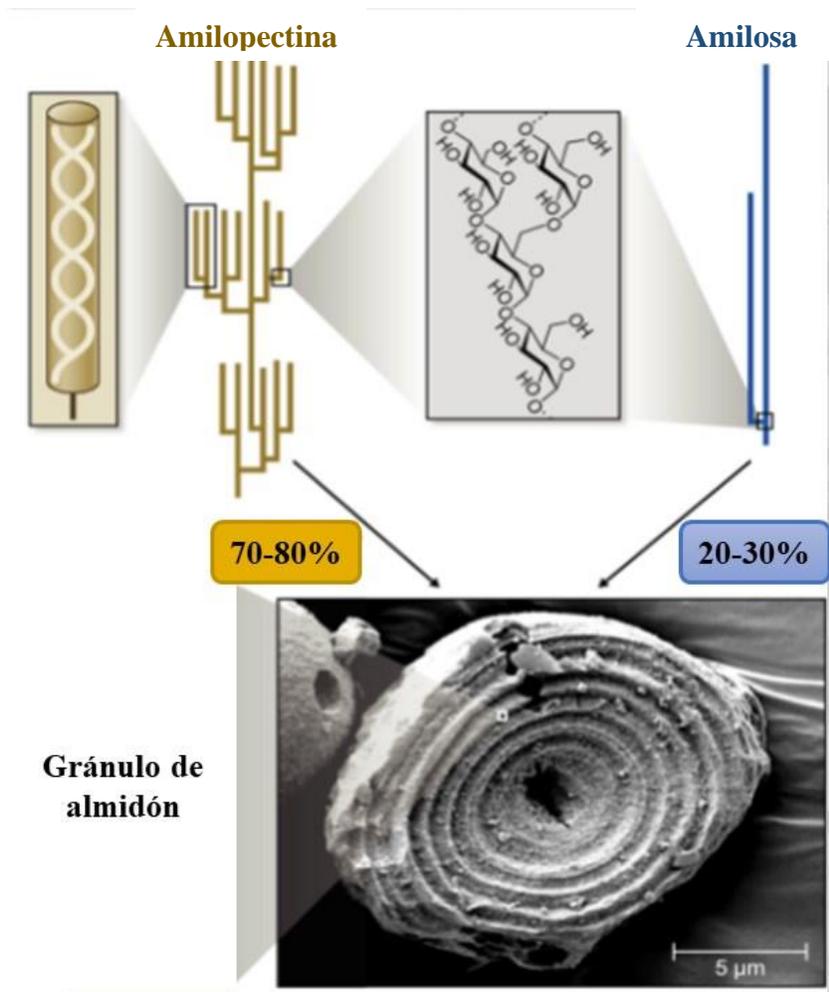


Figura 2.4. Estructura de los gránulos de almidón (Imagen tomada de [Seung, 2020](#)).

De acuerdo con los patrones de difracción de rayos X (XRD, por sus siglas en inglés), características nutricionales, y modificación estructural, los almidones pueden agruparse de acuerdo con las clasificaciones mostradas en la Figura 2.5.

## Clasificación de los almidones

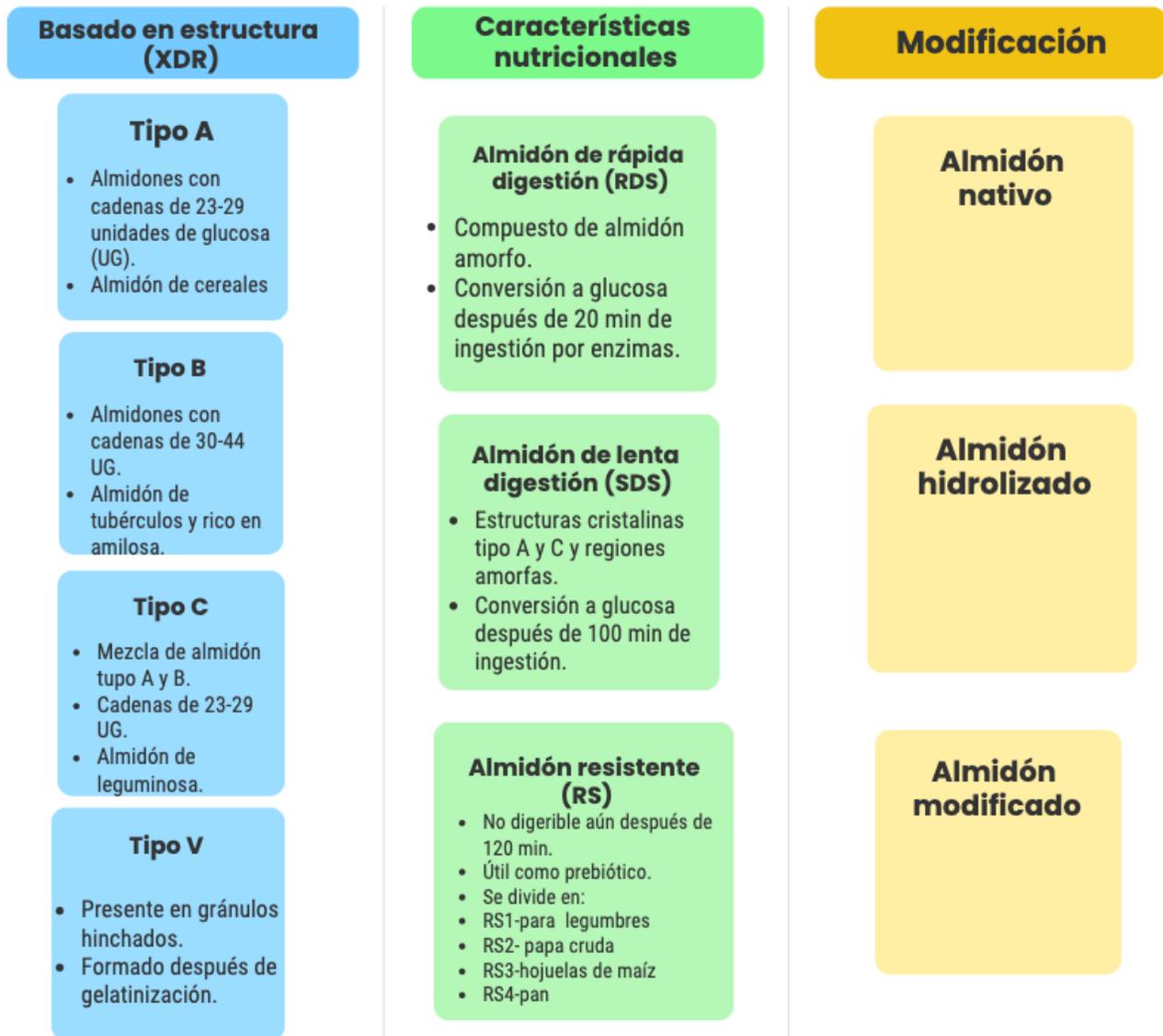


Figura 2.5. Clasificación de almidones y características estructurales.

### 2.4 Propiedades funcionales de los almidones

Las propiedades funcionales del almidón se han asociado con su poder de hinchamiento, hidratación a altas temperaturas, la capacidad de gelificación, emulsificación, la digestibilidad enzimática y el aumento de la viscosidad son de gran importancia en las distintas áreas industriales de aplicación (Aristizábal & Sánchez, 2007; Bashir & Aggarwal 2019; Ismail et al., 2013). De esta forma, los almidones (nativos o modificados) son

utilizados de forma extensiva en una gran variedad de productos en la industria alimentaria (Cornejo-Ramírez et al., 2018).

En este sentido, los almidones sufren modificaciones estructurales cuando se someten a procesos de calentamiento en agua por arriba de los 52 °C, pasando por el proceso de gelatinización, el cual es definido como un proceso endotérmico de dos etapas, la primera involucra el hinchamiento de los gránulos de almidón debido al rompimiento de los puentes de hidrógeno presentes en las zonas amorfas de su estructura, mientras que la segunda etapa involucra el efecto del agua como agente plastificante que conduce a la hidratación e hinchamiento de las regiones amorfas (Bashir & Aggarwal, 2019). Si el proceso de calentamiento se mantiene, la estructura cristalina de los almidones, conformada por la amilopectina, es modificada disminuyendo su ordenamiento y causando una mayor solubilización de los almidones, mayor hinchamiento y pérdida de birrefringencia, y desarrollando soluciones más viscosas por la expulsión de la amilosa al medio acuoso (Singh et al., 2011; Mahto & Das 2014).

Cabe mencionar que la temperatura de gelatinización de los almidones depende fuertemente de la fuente vegetal de donde se obtuvo el almidón, y condiciones del medio como el contenido de agua en la solución, pH, fuerza iónica, entre otras (Chung & Liu, 2009).

## 2.5 Fuentes de almidones

Como se ha mencionado anteriormente, los almidones pueden obtenerse a partir de distintas fuentes vegetales, la Figura 2.6 muestra algunas fuentes convencionales y no convencionales de almidón, de las cuales destacan los tubérculos y raíces. Este tipo de fuentes vegetales de almidón se reportan con contenidos de agua entre 70-80%, con 16-24% de almidón y trazas de proteínas y lípidos; algunos de ellos son cultivados con propósitos de consumo humano, como es el caso de la papa (*Solanum tuberosum*), el camote (*Ipomea batatas*), la mandioca o yuca (*Manihot esculenta*), las batatas (*Dioscorea sp.*), el arrurruz (*Maranta arundinacea*), el loto (*Nelumbo nucifera*), entre otras. Debido a que el estudio de

la estructura y propiedades fisicoquímicas de una gran cantidad de almidones presentes en tubérculos y raíces no ha sido estudiada de forma extensiva, este trabajo plantea aportar información sobre las propiedades funcionales de tres tipos de tubérculos: camote (*Ipomea batatas*), chayotextle o tubérculo del chayote (*Sechium edule*), y yuca (*Manihot esculenta*), como agentes formadores y estabilizadores de bigeles en la protección de betacaroteno como compuesto modelo, y aprovechar las propiedades tecnofuncionales de estos almidones.



Figura 2.6. Principales fuentes de almidón estudiadas (Basado en [Carvalho, 2008](#); [Lago Tagliaprieta et al., 2021](#))



### 3. Justificación

Las nuevas demandas de los consumidores en la industria alimentaria promueven la implementación de nuevos sistemas para mejorar las características de productos alimenticios haciéndolos más aceptables y seguros para los consumidores. Uno de los sistemas que está tomando auge en el área de los alimentos está basado en sistemas gelificados como los bigeles, ya que permiten mimetizar propiedades de textura en alimentos reduciendo el aporte calórico asociado al contenido de lípidos, y permitiendo funcionar como un vehículo de acarreo y protección de compuestos bioactivos.

Por otro lado, el uso de biopolímeros con diversas actividades funcionales ha mostrado una gran gama de beneficios para múltiples aplicaciones en la industria de los alimentos. El almidón es uno de los polisacáridos más utilizados, y en la actualidad existe la necesidad de buscar nuevas alternativas de fuentes botánicas para su obtención. Algunas de las opciones no convencionales para la extracción de almidón son los tubérculos, como la yuca, el camote y el chayotextle, debido a que estos almidones de tubérculos presentan propiedades funcionales como buena capacidad de gelificación, lo que puede aprovecharse para el diseño de bigeles.

Por todo lo anterior, el uso de almidón en sistemas bigeles para la protección de carotenoides permitirá generar nuevas utilidades de los tubérculos y mayor desarrollo económico para los productores mexicanos, contribuyendo al crecimiento económico y social de la gente productora de este tipo de tubérculos.



Casa abierta al tiempo

## 4. Hipótesis

La dispersión de un oleogel basado en aceite de canola y cera de abeja en un hidrogel de almidón extraídos de tubérculos como la yuca, el camote y chayotextle, permitirá desarrollar bigeles con morfología y estructura más compleja que permitirá brindar una mayor protección al betacaroteno encapsulado contra su degradación y obtener un sistema disperso con mayor estabilidad física.



Casa abierta al tiempo

## 5. Objetivos

### 5.1 Objetivo general

Establecer las condiciones de formación de bigeles tipo O/W estabilizados con almidón de yuca, camote y chayotextle en la fase hidrogel y cera de abeja en el oleogel para la protección de betacaroteno.

### 5.2 Objetivos particulares

- Establecer de las condiciones de formación de oleogeles (OG) e hidrogeles (HG) empleando cera de abeja para OG y almidones de yuca, camote y chayotextle para HG como agentes gelificantes y su caracterización fisicoquímica.
- Establecer de las condiciones de formación de los bigeles (OG/HG) conteniendo betacaroteno.
- Caracterizar fisicoquímica los bigeles (OG/HG).
- Evaluar de la estabilidad del betacaroteno contenido en los bigeles tipo O/W.



## 6. Metodología

### 6.1 Materiales

Los tubérculos de camote (*Ipomea batatas*), chayotextle o tubérculo del chayote (*Sechium edule*), y yuca (*Manihot esculenta*) fueron adquiridos en un mercado de la localidad de Ahuacatlán, Puebla, México (Latitud: N 17° 54' 46.26" Longitud: O 98° 43' 14.56"); la cera de abeja fue adquirida en la Farmacia Paris S.A. de C.V., CDMX; se utilizó aceite vegetal de canola adquirido en un supermercado local (Capullo®, ACH Food México S. de R.L. de C.V.); los colorantes rojo de nilo y azul de nilo fueron comprados a Sigma Aldrich Química (Toluca, México); como compuesto modelo para evaluar la protección de los bigeles se utilizó betacaroteno 30-OS marca Altecsa, S. A. de C. V. (CDMX). En todos los experimentos se utilizó agua destilada y desionizada.

### 6.2 Acondicionamiento de la materia prima

Los tubérculos de yuca (*M. esculenta*), camote (*I. batatas*) y chayotextle (*S. edule*) fueron lavados, escurridos y cortados en rodajas de aproximadamente 5 mm de espesor, posteriormente las rodajas fueron dispersadas de manera uniforme y secadas en un deshidratador doméstico Hamilton Beach a 50°C durante 24 h o hasta alcanzar peso constante. Las muestras deshidratadas fueron sometidas a un proceso de molienda en un molino de café y las harinas resultantes se tamizaron a través de una malla número 50, posteriormente se almacenaron en un lugar seco a temperatura ambiente (25°C) en frascos de vidrio color ámbar hasta su posterior uso.

### **6.3 Aislamiento del almidón**

Las harinas de los tres tubérculos se colocaron en agua destilada en una relación 1:10 y se dejaron (10%) en remojo en agua durante 24 h. Después de este tiempo las muestras se filtraron usando papel filtro Whatman no. 1, el residuo se lavó con agua de 3 a 4 veces para obtener mejores resultados en la extracción de los almidones. Las muestras resultantes se centrifugaron durante 20 min a 6000 rpm. La fracción precipitada fue recuperada y etiquetada como la fracción rica en almidón, ésta fue transferida a cajas Petri previamente pesadas y se colocaron en una estufa a 40 °C por 24 h. Las muestras secas se pesaron, se trituraron en un mortero y se almacenaron a temperatura ambiente para su posterior análisis (Huanca-Rengel, 2013). El rendimiento de extracción fue calculado mediante la relación del peso de almidón extraído y el peso de la harina en base seca, y fue expresado como porcentaje.

### **6.4 Formación de los sistemas gelificados**

#### **6.4.1 Preparación del hidrogel (HG)**

Se prepararon dispersiones de cada uno de los almidones a una concentración de 10% (p/p). Las dispersiones fueron calentadas a 90 °C por 10 min en un baño de agua con homogeneización constante. Transcurrido el tiempo, la mezcla caliente se transfirió inmediatamente en un baño de agua helada para llevar la temperatura de las muestras hasta temperatura ambiente (25 °C). Los hidrogeles obtenidos fueron almacenados a 4 °C por 24 h para permitir su relajación y estructuración previo a la caracterización (Zheng et al., 2020).

#### **6.4.2 Preparación de oleogel (OG)**

Los oleogeles (OG) se prepararon utilizando cera de abeja como agente gelificante y aceite vegetal de canola como fase disolvente. Para ello, la cera de abeja se agregó en el aceite caliente (90 °C) para alcanzar concentraciones de 5, 10, 15 y 20% p/p, las soluciones se mantuvieron 10 min bajo agitación constante. El oleogel caliente se transfirió

inmediatamente a un baño de agua helada hasta que alcanzó la temperatura ambiente (25 °C) (Zheng et al., 2020). Los OG resultantes se almacenaron por 24 horas a 4 °C hasta su análisis y su uso posterior para la formación de los bigeles. Es importante mencionar que la temperatura juega un papel importante en la formación de los OG, por lo que las temperaturas de solubilización de la cera y enfriamiento de los OG se mantuvieron constantes, tratando de controlar que los tiempos requeridos para el calentamiento y enfriamiento fuera similares (Trujillo-Ramírez et al., 2019).

En el caso de los OG que contenían el betacaroteno, se seleccionó la concentración de cera de abeja que confirió mejores propiedades estructurales a los OG y a éste se adicionó el betacaroteno para alcanzar una concentración de 0.1% (p/p), disolviendo en la formulación caliente durante 2 min previos al enfriamiento.

#### **6.4.3 Preparación de bigeles**

Las muestras de HG y OG fueron preparados de acuerdo con los procedimientos descritos arriba y 24 h previo a su uso. Para la formación de los bigeles, tanto el OG como HG fueron llevados 90 °C, incorporando OG por goteo y mezclando mediante el uso de ultrasonido en un Ultrasonic Processor UP400S (Hielscher Ultrasonics GmbH, Alemania) con un sonotrodo de 7 mm de diámetro, con una frecuencia de ultrasonido de 24 kHz con 80% de amplitud durante ~2 min. Una vez concluida la incorporación de las fases, el sistema formador del bigel se mantuvo a 90 °C por 10 min y posteriormente las mezclas se transfirieron a un baño de agua helada para promover la gelificación de ambas fases y llevar a la formación del bigel (Zheng et al., 2020). Los bigeles preparados se almacenaron a 4 °C durante 24 h previo a su caracterización. Los bigeles formados se nombraron de acuerdo con el contenido de OG (30, 40 y 50% p/p) bajo la siguientes denominación: BG<sub>70-30</sub>, BG<sub>60-40</sub>, y BG<sub>50-50</sub>, respectivamente.

## 6.5 Caracterización fisicoquímica de los sistemas gelificados

### 6.5.1 Capacidad de retención de fase solvente (sinéresis)

La sinéresis en los sistemas gelificados fue determinada después de 24 h de su preparación, posteriormente, 10 g de muestra gelificada se colocó en un tubo de centrífuga previamente pesado, y sometido a centrifugación a 222×g durante 5 min a 20 °C. La fase sobrenadante fue decantada y el peso de ambas fases fue registrado. La capacidad de retención de fase solvente fue calculada de acuerdo con lo reportado por [García-Díaz et al., \(2016\)](#) y reportada como sinéresis (%) según la Ecuación 1.

$$\text{sinéresis}(\%) = \frac{\text{peso solvente extraído}}{\text{peso inicial sist.gelificado}} \times 100 \quad (1)$$

### 6.5.2 Espectroscopia de difracción de rayos X (XRD)

Los sistemas gelificados fueron caracterizados mediante espectroscopia de difracción de rayos X (XRD) en un difractómetro XRD Bruker D8 Advance con fuente de Cu y tubo de rayos X ( $\lambda=1.54056 \text{ \AA}$ ) a 40 Kv y 40 Ma. El escaneo angular se realizó en un intervalo de 4 a 50° ( $2\theta$ ) a una escala de tiempo de 0.4. Para la interpretación de resultados se utilizó EVA Software.

### 6.5.3 Espectroscopia de Infrarrojo con Transformada de Fourier (FT-IR)

Las muestras gelificadas fueron analizadas por espectroscopia de FT-IR en un espectro FT-IR Frontier (Perkin Elmer, E.U.A) acoplado a un accesorio ATR. El espectro se obtuvo de 400 hasta 4000  $\text{cm}^{-1}$  con una resolución de 4  $\text{cm}^{-1}$ . El "brazo de presión" del instrumento se utilizó para aplicar presión constante a las muestras colocadas en la parte superior del cristal de Zn-Se, para asegurar un buen contacto entre la muestra y el haz incidente ([Rawoath et al., 2020](#)).

#### 6.5.4 Morfología

Los sistemas gelificados fueron observados en un microscopio óptico OLYMPUS BX4S bajo un objetivo de 40X, acoplado a una cámara AxioCam (ERc5s) con la finalidad de observar la morfología de cada sistema: HG, OG, y bigeles. Para los bigeles se emplearon dos colorantes rojo Nilo en etanol (0.2% p/p) para teñir la fase hidrófoba (aceite) en el bigel y una solución al 0.2% de azul Nilo A para teñir la fase hidrofílica en el bigel. Para cada muestra se tomaron imágenes en los modos de campo brillante y contraste de fases para los OG y HG, y campo brillante para los bigeles. Las muestras se montaron en el portaobjetos siguiendo el procedimiento descrito por [Samui et al., \(2021\)](#).

#### 6.5.5 Propiedades reológicas

Los sistemas gelificados fueron caracterizados reológicamente a través de sus propiedades de flujo y oscilatorias. Se utilizó un reómetro MCR 300 (Physica Messtechnik, Stuttgart, Germany), con una geometría estriada con 50 mm de diámetro con un espacio de 1.0 mm a  $25^{\circ}\text{C} \pm 0.5^{\circ}\text{C}$  mediante un peltier TEK 150P. Las muestras gelificadas (HG, OG y bigel) fueron preparados y moldeados en charolas de aluminio de 50 mm de diámetro, y colocadas cuidadosamente en el plato inferior del equipo para evitar fracturar o romper la estructura de los geles.

Las pruebas dinámicas consistieron en determinar el perfil de flujo mediante la determinación de la viscosidad aparente ( $\eta_{ap}$ ) respecto a la velocidad de corte ( $\gamma$ ) en un intervalo de  $10^{-3}$  a  $10^3 \text{ s}^{-1}$  ([Jiménez-Hernández et al., 2007](#)). Los resultados obtenidos fueron ajustado al modelo ley de potencia de Ostwald-de Waele, los parámetros para el índice de consistencia (K) y el índice de flujo (n) fueron obtenidos de dicho ajuste.

Las propiedades viscoelásticas de las muestras gelificadas fueron determinadas mediante la evaluación de los módulos de almacenamiento ( $G'$ ) y de pérdida ( $G''$ ). Para ellos, ambos módulos fueron monitoreados dentro de la región viscoelástica lineal (RVL) en un intervalo de deformación de  $10^{-3}$  a  $10^4$  %, con una frecuencia constante de 1 Hz.

### 6.5.6 Propiedades texturales

Las propiedades mecánicas de los bigeles se determinaron a través del análisis de perfil de textura (APT) utilizando un Texturometro Brookfield CT3-4500 (AMETEK Brookfield, Middleborough, MA, USA). Las muestras se colocaron en vasos de precipitado (30 g, 40 mm de diámetro y 20 mm de altura), fueron almacenados durante 24 h en condiciones de refrigeración a 4°C antes del análisis. La prueba TPA imita el proceso de mordida y masticación mediante la aplicación de ciclos de compresión dobles, por lo que se aplicó una compresión de dos ciclos y las muestras se comprimieron al 50% de su altura inicial a una velocidad de 1 mm·s<sup>-1</sup> mediante una sonda cilíndrica de 12.7 mm de diámetro. Las propiedades mecánicas fueron obtenidas mediante el software del equipo (Trujillo-Ramírez et al., 2019).

### 6.6 Estabilidad de los bigeles

Los sistemas gelificados fueron monitoreados durante el almacenamiento a 4°C durante 15 días, con la finalidad de determinar las posibles modificaciones en las propiedades viscoelásticas, de acuerdo con la metodología descrita en la sección 6.5.5.

### 6.7 Evaluación de la protección de carotenoides en los bigeles

El efecto protector de los bigeles tipo O/W sobre el betacaroteno, molécula modelo, se determinó mediante los cambios en los parámetros de color. Para ello, se utilizó un colorímetro pre-calibrado (NH310, 3NH Technology), los parámetros de color se obtuvieron utilizando la escala de la Comisión Internacional de la Iluminación (CIE, por sus siglas en francés), y fueron reportados como L\*, a\*, b\* (L= oscuro/claro, a= rojo/verde, b= amarillo / azul), croma (C) y ángulo de tono (h). El índice de color (CI) y el índice amarillo (YI), y la total diferencia de color (TCD) se calcularon según Joaquín-Cruz et al., (2020) empleando las ecuaciones 2-4. El monitoreo se realizó durante 7 días de almacenamiento a dos temperaturas (4°C y 25 °C) y bajo incidencia de luz (oscuridad y exposición de luz directa).

$$CI = \frac{(180-h)}{(L-C)} \quad (2)$$

$$YI = (142.86 * b)/L \quad (3)$$

$$TCD = (\Delta a^2 + \Delta b^2 + \Delta L^2)^{1/2} \quad (4)$$

## 6.8 Análisis estadístico

Todos los experimentos se realizaron por triplicado. Se realizó un análisis de varianza de una vía (ANOVA) con un nivel de significancia  $P < 0.05$ . Se realizó una prueba de comparación de medias mediante la prueba de Tukey. El análisis estadístico se realizó empleando el software SPSS v.18 (IBM, E.U.A.).

## 7. Resultados

### 7.1 Rendimiento de extracción de almidones

La Figura 7.1 muestra algunas imágenes obtenidas durante el proceso de extracción de los almidones a partir de los tubérculos de yuca, camote y chayotextle. Los rendimientos de extracción de los almidones se muestran en la Tabla 7.1.



Figura 7.1. Tubérculos de yuca, camote y chayotextle (arriba), las rodajas de cada tubérculo (centro) y los almidones extraídos (abajo).

De acuerdo con diversos autores, la yuca se ha reportado con contenidos de almidón que oscilan entre un 25-29 % (Kundu et al., 2011; Kaur et al., 2016), mientras que para el camote

oscila entre 22-35% (Guízar-Miranda et al., 2008) y 49% para chayotextle (Hernández-Urbe, et al., 2011), como puede observarse, los rendimientos obtenidos son menores a los reportados en la literatura, lo cual puede atribuirse a las diferencias que existen en las condiciones de cultivo, región de producción, así como en el procedimiento empleado para la extracción de los almidones (Hernández-Medina et al, 2008; Hernández-Urbe, 2011; Senanayake et al., 2013; Cornejo-Ramírez et al, 2018).

Tabla 7.1 Rendimientos extracción de almidón a partir de tubérculos.

Fuente vegetal	Rendimiento (%)
Yuca	33.00 ± 1.41
Camote	16.67 ± 1.41
Chayotextle	18.67 ± 2.83

Las muestras de los almidones fueron observadas al microscopio, donde fue posible visualizar las morfologías de los gránulos de almidón de cada tubérculo utilizado (Figura 7.2). Bajo la observación tanto en luz directa (arriba) como con luz polarizada (abajo), la propiedad de birrefringencia (presencia de cruz de malta) fue clara en las muestras de almidón nativo, además también se observaron cambios en el tamaño del gránulo de almidón según el tipo de tubérculo, siendo menor para el almidón de yuca, seguido del almidón de camote y chayotextle respectivamente, coincidiendo con lo reportado en la literatura (Bao Ngoc et al., 2017; Guízar-Miranda et al., 2008; Jiménez-Hernández et al., 2007; Senanayake et al., 2013; Hernández-Urbe et al., 2011).

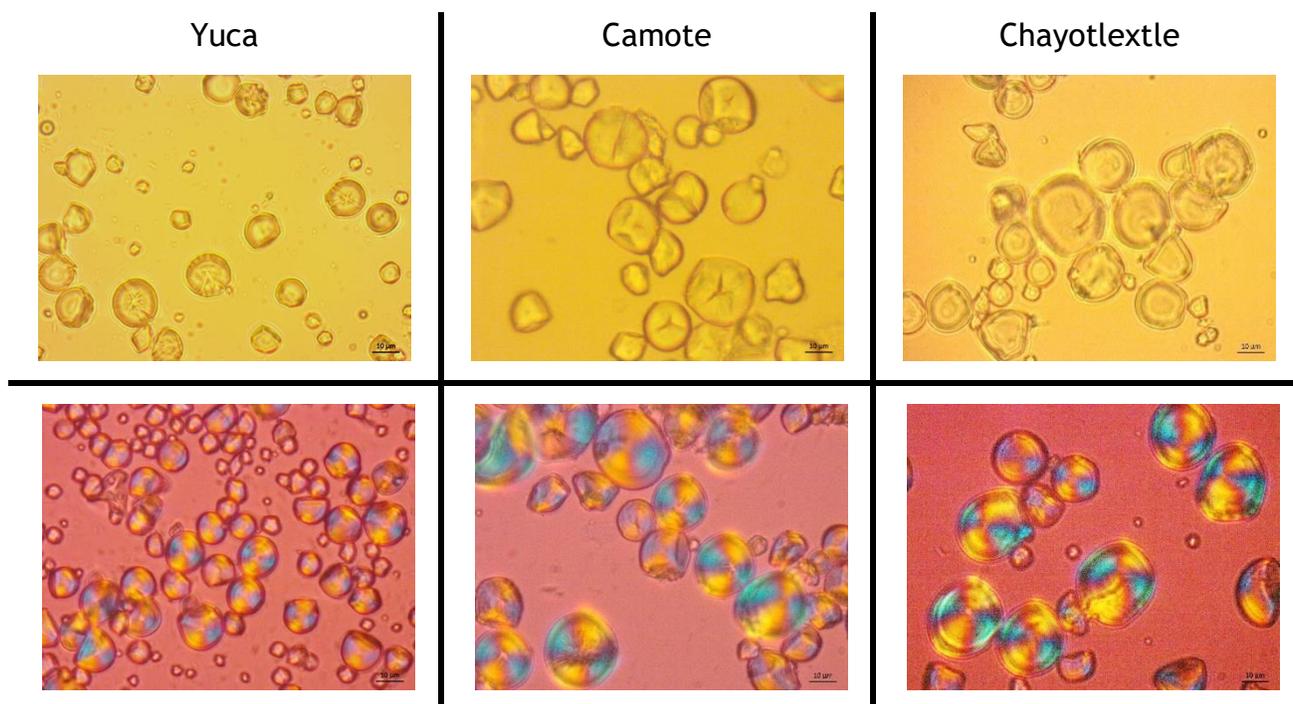


Figura 7.2. Micrografía de los gránulos de almidón obtenidos de tres tipos de tubérculos, utilizando luz directa (arriba) y luz polarizada (abajo).

La morfología de los gránulos presentó diferencias entre las fuentes utilizadas, observando gránulos redondos y truncados en el almidón de yuca, redondos, truncados y poligonales en el almidón de camote, y redondos, poligonales e irregulares con presencia de pequeñas aglomeraciones en chayotlextle, estas morfologías son congruentes con las reportadas en la literatura por [Abdullah et al., \(2018\)](#), [Sívoli et al., \(2009\)](#), y [Hernández-Medina et al., \(2008\)](#), para estas fuentes de almidón. La mayoría de los gránulos mostraron la cubierta externa lisa y suave, sin la presencia de poros, con la superficie externa casi intacta y de acuerdo a esto, es indicativo de que el proceso de extracción y purificación de los almidones fue adecuado ([Sívoli et al., 2009](#); [Jiménez-Hernández et al., 2007](#))

## 7.2 Formación y caracterización de HG y OG

Los hidrogeles formados con los almidones de los tres tubérculos (HG<sub>i</sub>) presentaron características propias de sistemas gelificados, como se observa en la Figura 7.3 para yuca (izquierda), camote (centro), y chayotlextle (derecha), respectivamente.

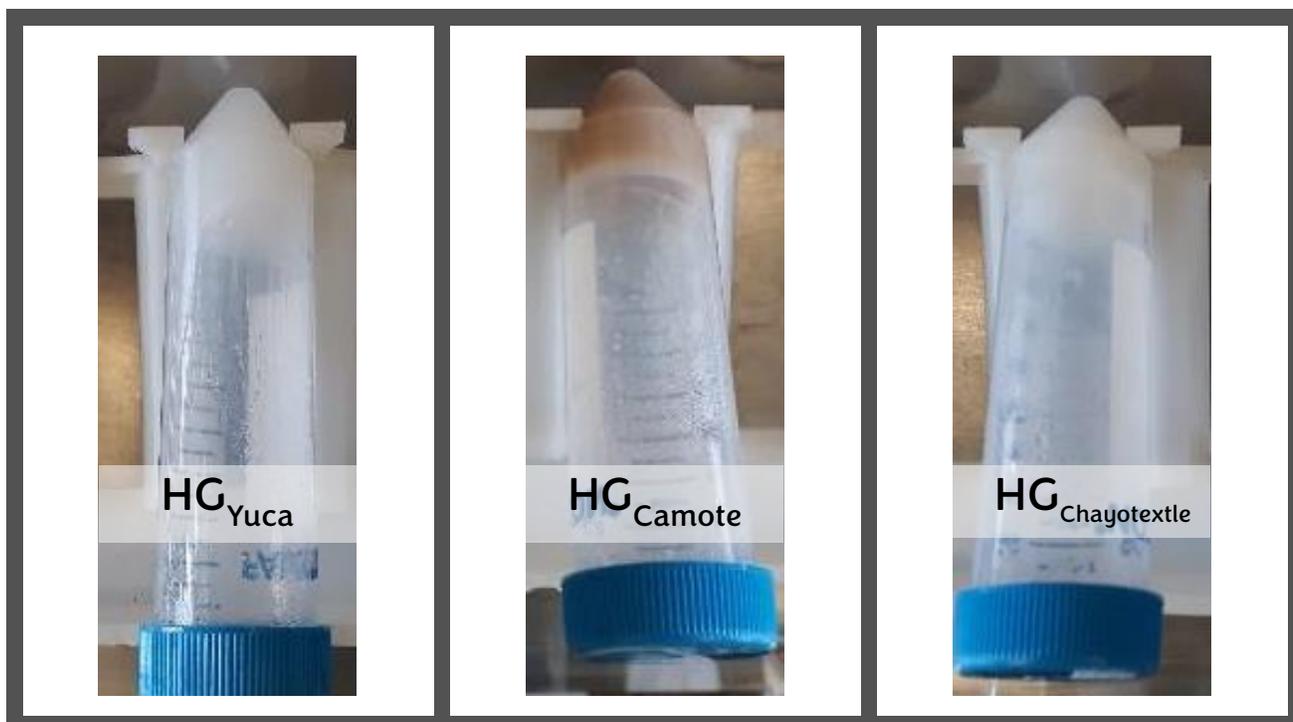


Figura 7.3. Imágenes de los hidrogeles formados con las tres fuentes de almidón (10% p/p).

Al evaluar la estabilidad contra la sinéresis, o pérdida de humedad del sistema gelificado, se encontró que el almidón de yuca presentó la mayor capacidad de retención de agua al no exhibir sinéresis. En el caso de los hidrogeles formados con almidón de camote y chayotextle, estos presentaron un  $6.00 \pm 0.10$  y  $14.00 \pm 0.08\%$  de liberación de agua de la matriz gelificada, respectivamente, indicando que, bajo las condiciones de formación de los hidrogeles, el almidón de yuca presentó mejor estabilidad.

Los hidrogeles  $HG_i$  también fueron observados al microscopio bajo luz directa y luz polarizada (Figura 7.4), donde fue evidente que el tratamiento térmico aplicado a los almidones provocó la pérdida de la estructura de los gránulos debido al proceso de gelatinización, el cual promueve la mayor absorción de agua dentro del gránulo, incrementando la presencia de regiones amorfas sobre las regiones cristalinas en el almidón, conduciendo a la pérdida de la estructura granular (Biduski et al., 2018; Ismail et al., 2013; Šárka & Dvořáček, 2017).

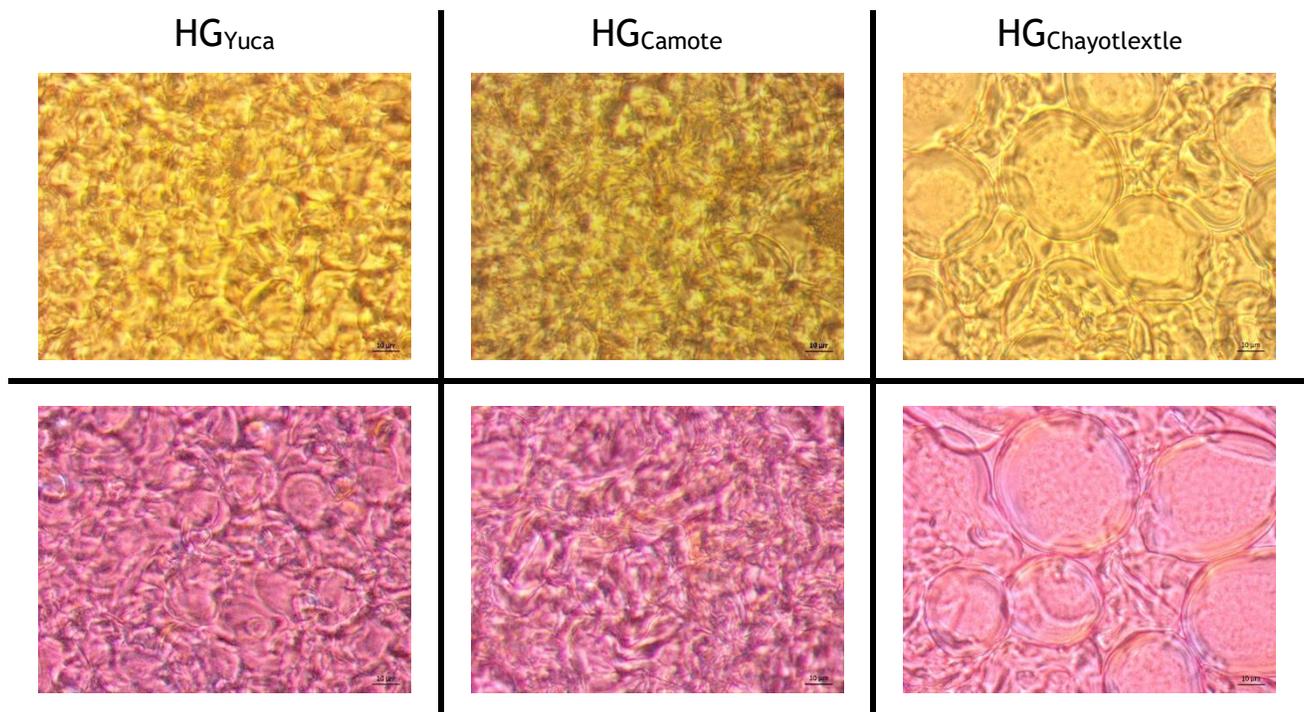


Figura 7.4. Micrografía de los hidrogeles obtenidos con almidón de tres tipos de tubérculos, utilizando luz directa (arriba) y luz polarizada (abajo).

A diferencia de los hidrogeles HG<sub>Yuca</sub> y HG<sub>Camote</sub>, los cuales presentaron estructuras poco definidas de los gránulos de almidón, el hidrogel HG<sub>Chayotextle</sub> conservó las estructuras esféricas de los gránulos de almidón, los cuales tuvieron tamaños más grandes a los observados en el almidón previo al tratamiento térmico, debido al hinchamiento y absorción de agua en la matriz del polisacárido. Lo anterior puede asociarse a que este almidón posee una temperatura de gelatinización mayor a la utilizada en la metodología para la formación de los hidrogeles, y concuerda con los resultados obtenidos para la sinéresis.

En el caso de los oleogeles (OG<sub>i</sub>), estos fueron denominados de acuerdo con el contenido de cera de abeja en la formulación, donde se pudo apreciar que la concentración del agente gelificante tuvo efecto sobre la estructuración de los OG. En la Figura 7.5 se muestran las micrografías obtenidas de la observación en el microscopio.

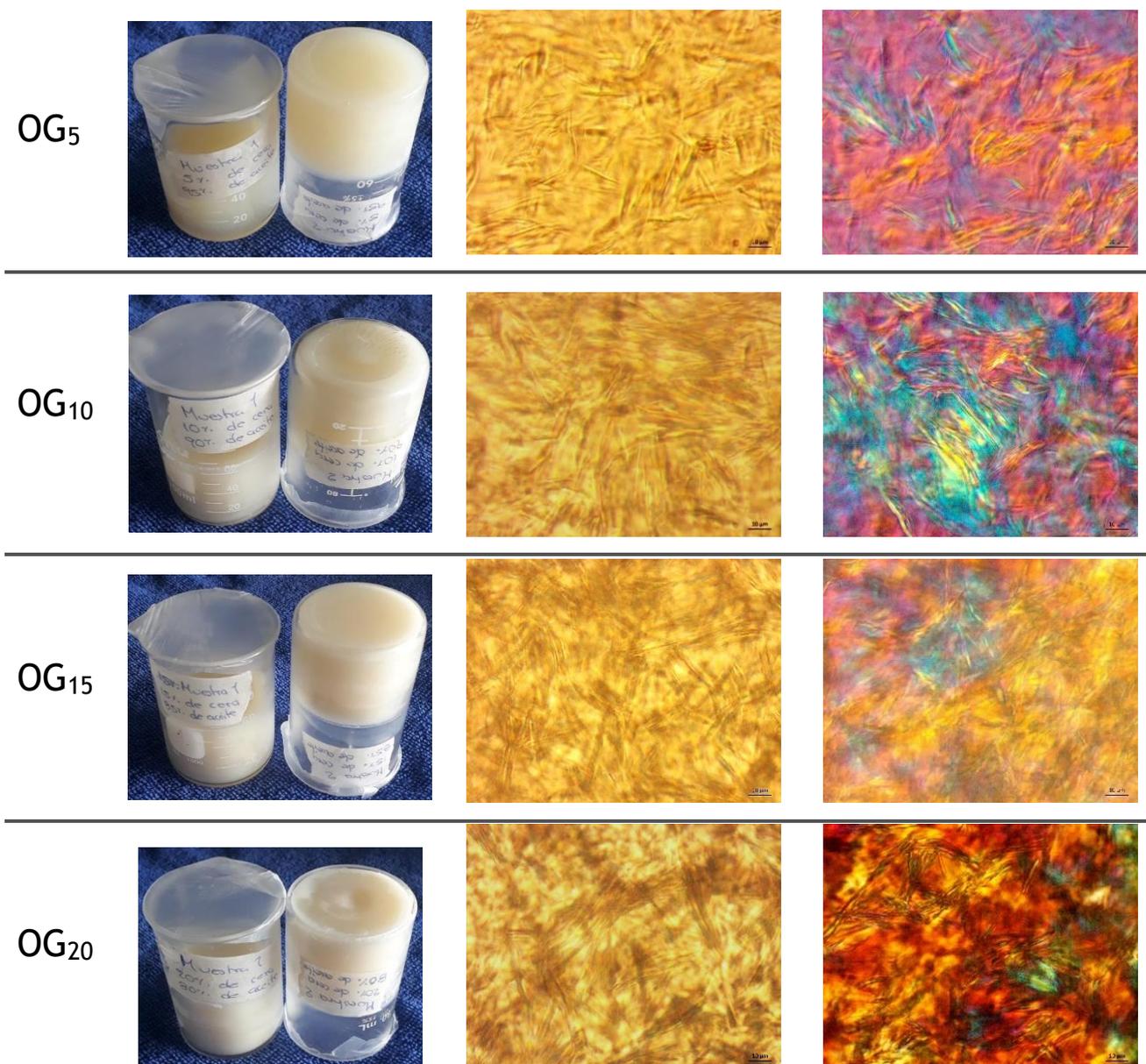


Figura 7.5. Oleogeles (OG) formados con aceite vegetal y cera de abeja a distintas concentraciones (izquierda) y sus micrografías bajo luz directa (centro) y luz polarizada (derecha).

Los oleogeles mostraron estructuras de cristales semejantes a agujas, lo que concuerda con lo reportado en la literatura por [Fayaz et al., \(2017\)](#) y [Winkler et al., \(2019\)](#), quienes mencionan que la formación de oleogeles conlleva a la presencia de estructuras en forma de agujas, tallo o plaquetas, deseables para obtener un sistema fuerte y estable ([Mandu et al., 2020](#)). El aumento en la concentración de cera de abeja en los oleogeles condujo al incremento de la cantidad de cristales presentes y a la disposición de dichos cristales en el

oleogel. Algunos autores mencionan que, el tamaño de los cristales en los oleogeles está relacionado con la firmeza y estructuración, donde tamaños más pequeños producen redes de gel más firmes (Blake et al., 2014; Fayaz et al., 2017; Mandu et al., 2020; Yilmaz & Ögütçü, 2014).

### 7.2.1 Espectroscopia de difracción de rayos X (XRD)

La cristalinidad es una propiedad importante en los alimentos, sobretodo si los productos contienen almidón y son sometidos a condiciones de almacenamiento, ya que durante este tiempo es posible que se presente el mecanismo de retrogradación en el almidón, llevando a la modificación de las propiedades texturales y nutricionales del producto final (Agama-Acevedo et al., 2005). En este sentido, los almidones de yuca y camote mostraron un patrón de tipo C con picos característicos alrededor de valores de  $2\theta$  igual a  $5^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $17^\circ$ ,  $20^\circ$  y  $23^\circ$ , mientras que con el almidón de chayotextle fue de tipo B, con valores  $2\theta$  de  $5^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $17^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $22^\circ$  y  $24^\circ$ , como se observa en la Figura 7.6a. Cabe mencionar que estos patrones son característicos de los almidones presentes en tubérculos y raíces (Aristizábal & Sánchez, 2007, Hernández-Uribe, 2011; Torres et al., 2018).

De acuerdo con la literatura, la cantidad de estructuras cristalinas o la cohesión dentro de estas estructuras en los almidones muestran patrones de difracción con picos definidos, los cuales se degradan durante el proceso de gelatinización, indicando una conversión del polisacárido a un estado menos cristalino y exhibiendo un pico amplio y sin rasgos (Figura 7.6b), típico para materiales más amorfos. Confirmando así la alteración y degradación significativa de la estructura cristalina y la morfología granular del almidón (Jiménez-Hernández, 2007; Ruß, 2016; Bao-Ngoc et al., 2017; Gómez-Luría et al., 2019).

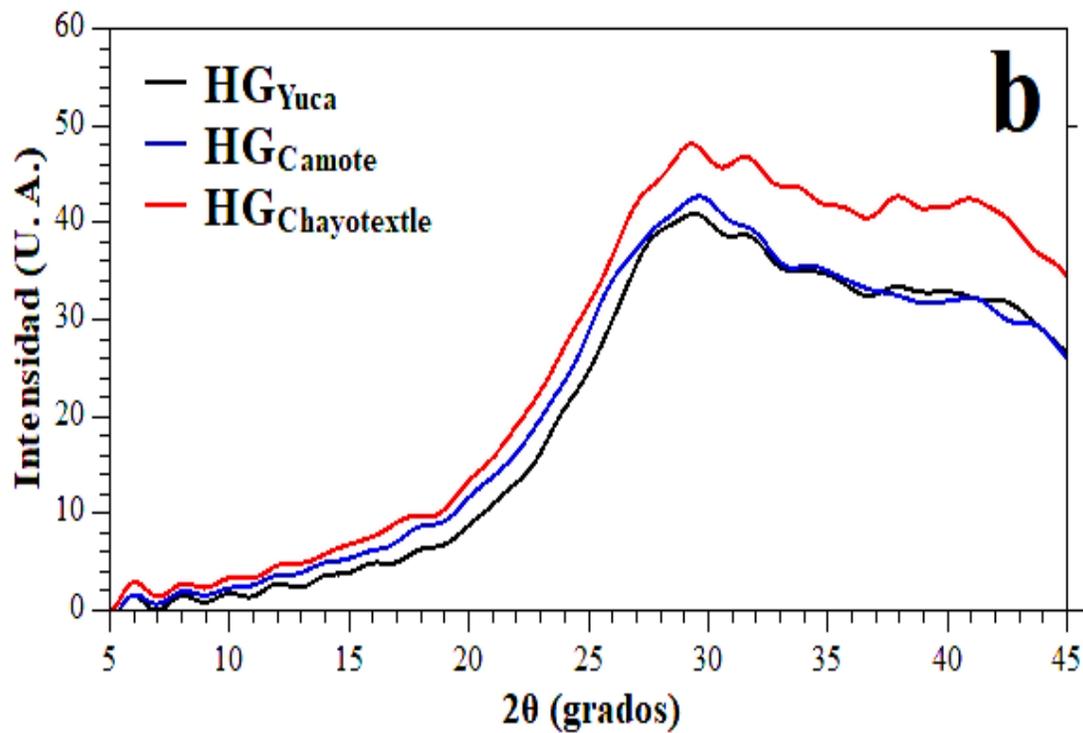
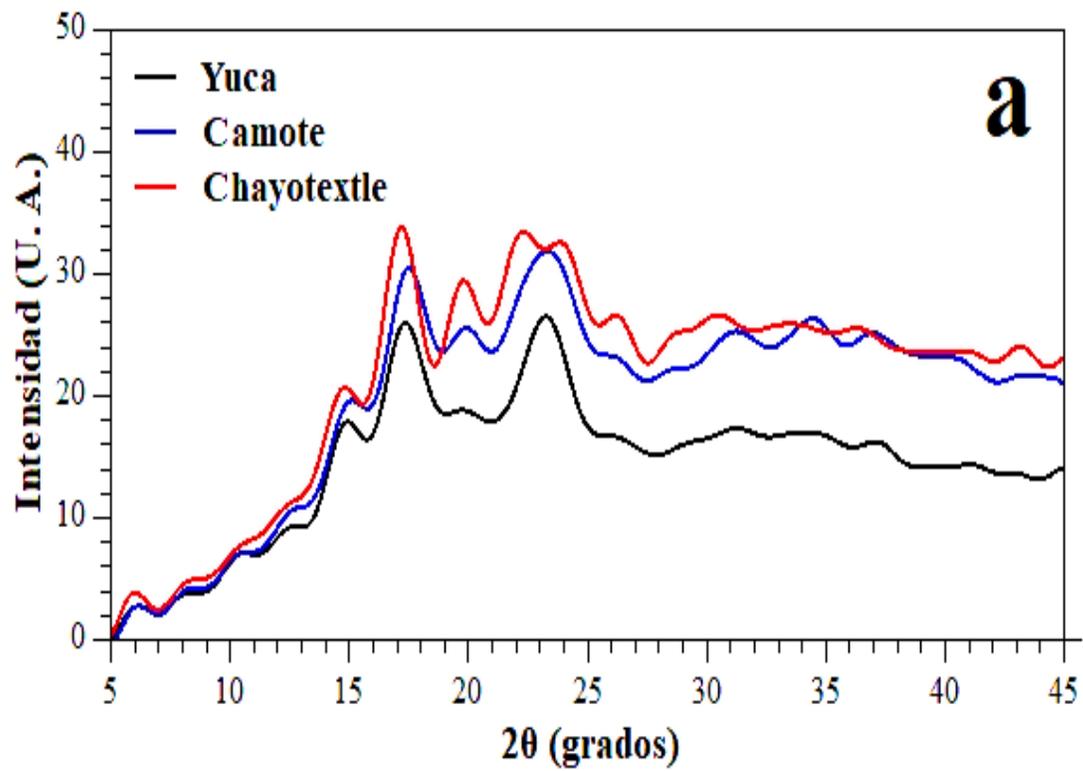


Figura 7.6. Patrones de difracción de rayos X para (a) almidones nativos y (b) hidrogeles de yuca, camote y chayotextle.

En el caso de los oleogeles (OG), los perfiles de XRD se muestran en la Figura 7.7. El OG<sub>5</sub> mostró picos de difracción en valores de 20.0° y 21.4° (2θ), correspondientes a las distancias interplanares (d) de 4.44, 4.15 y 3.75 Å, respectivamente. Mientras que las muestras OG<sub>10</sub>, OG<sub>15</sub> y OG<sub>20</sub> se observaron señales similares alrededor de 19.1° (4.64 Å), 20.5° (4.33 Å), 21.4° (4.15 Å), 22.6° (3.93 Å) y 23.7° (3.75 Å). Las señales más fuertes que corresponden a los valores de d= 4.15 Å y 3.75 Å, indicaron la presencia de cristales tipo α y β', confirmando que la estructura cristalina en los oleogeles se está asociada directamente con el contenido de la cera de abeja, estos resultados coinciden con los reportados en la literatura (Yilmaz & Ögütçü, 2014a; Fayaz et al., 2017; Pang et al., 2020; Zhang et al., 2021).

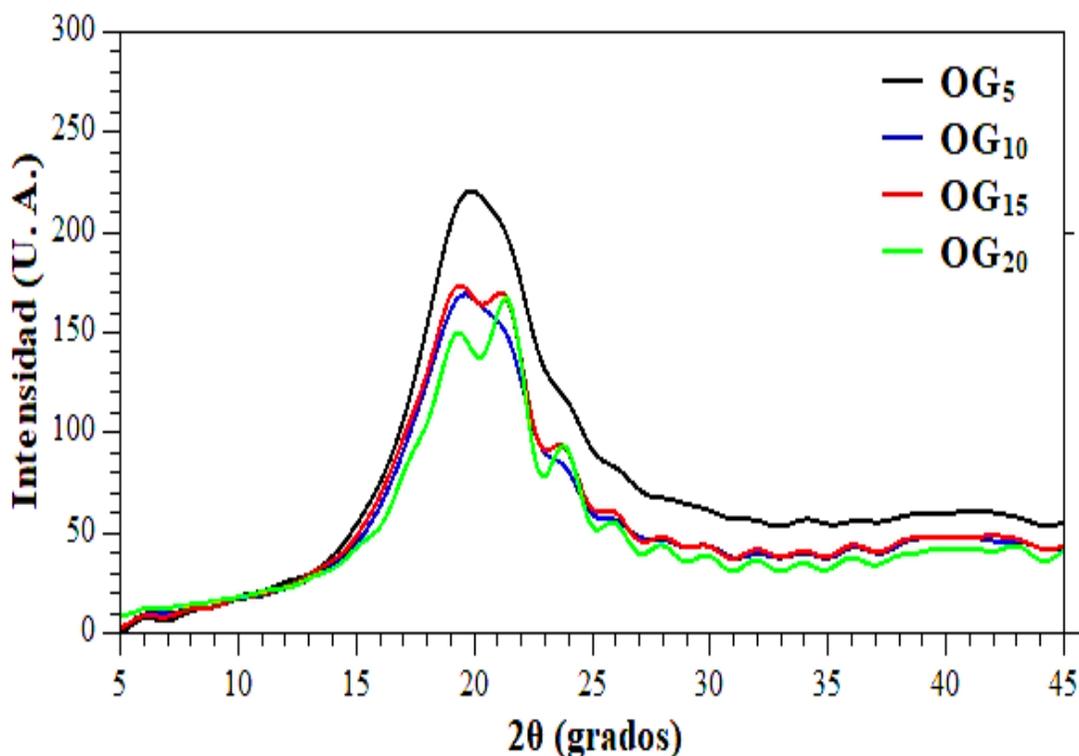


Figura 7.7. Patrones de difracción de rayos X para los oleogeles de cera de abeja.

### 7.2.2 Espectroscopia FT-IR

El análisis de espectroscopia por FT-IR para los sistemas gelificados se muestra en la Figura 7.8. Mediante esta técnica es posible realizar la evaluación de los grupos funcionales. En el caso de los hidrogeles se observa la presencia de señales entre los 3300-3600 cm<sup>-1</sup>, que se relacionan con el estiramiento de grupos O-H y la vibración de la asociación de unión de

hidrógeno,  $\sim 2900\text{ cm}^{-1}$  debido al estiramiento C-H,  $1150\text{ cm}^{-1}$  asociado con el estiramiento y vibración del grupo C-O-C. Asimismo, las señales en  $1022$ ,  $1080$  y  $1150\text{ cm}^{-1}$  se relacionan con las bandas de absorción de las regiones amorfas y cristalinas de los almidones y con la cantidad de estructuras ordenadas (Abdullah et al., 2018; Meng et al., 2020; Davidovich-Pinhas, 2018). En el caso de las señales ubicadas en las bandas entre  $950$ - $1200\text{ cm}^{-1}$  se han señalado como bandas características asociadas a la gelificación del almidón, mientras que la señal a  $\sim 1022\text{ cm}^{-1}$  explica las estructuras amorfas de los HG de almidón (Son-Trinh & Binh-Dang, 2019; Larrea-Wachtendorff et al., 2019).

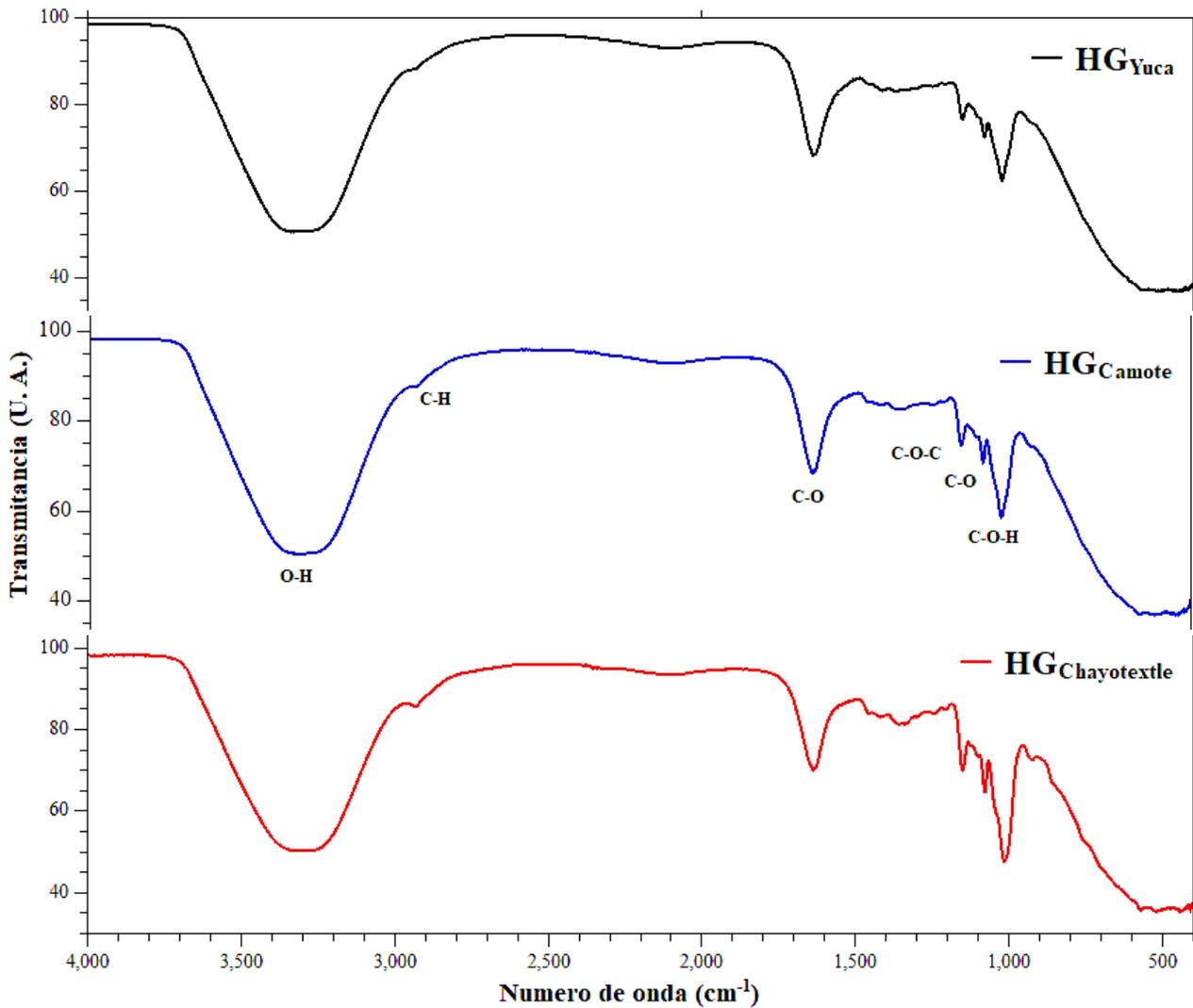


Figura 7.8. Perfiles de espectroscopia FT-IR de hidrogeles de almidón de yuca, camote y chayotextle.

Para los oleogeles, los perfiles de FTIR (Figura 7.9) mostraron señales entre  $2800$ - $3000\text{ cm}^{-1}$ , y de acuerdo con la literatura estas señales se relacionan con el estiramiento simétrico

y asimétrico de los grupos  $-CH_2$  de las cadenas alifáticas, las bandas que van de  $1700-1800\text{ cm}^{-1}$  se atribuyen a la vibración de estiramiento del grupo carbonilo de los triglicéridos, y por último las señales en  $1000\text{ a }1300\text{ cm}^{-1}$  se atribuye principalmente al estiramiento de C-O en el grupo éster de los triacilglicéridos (Fayaz et al., 2017; Pang et al., 2020; Yilmaz & Ögütçü, 2014b). La concentración de cera en los oleogel no tuvo un efecto sobre el perfil de FT-IR.

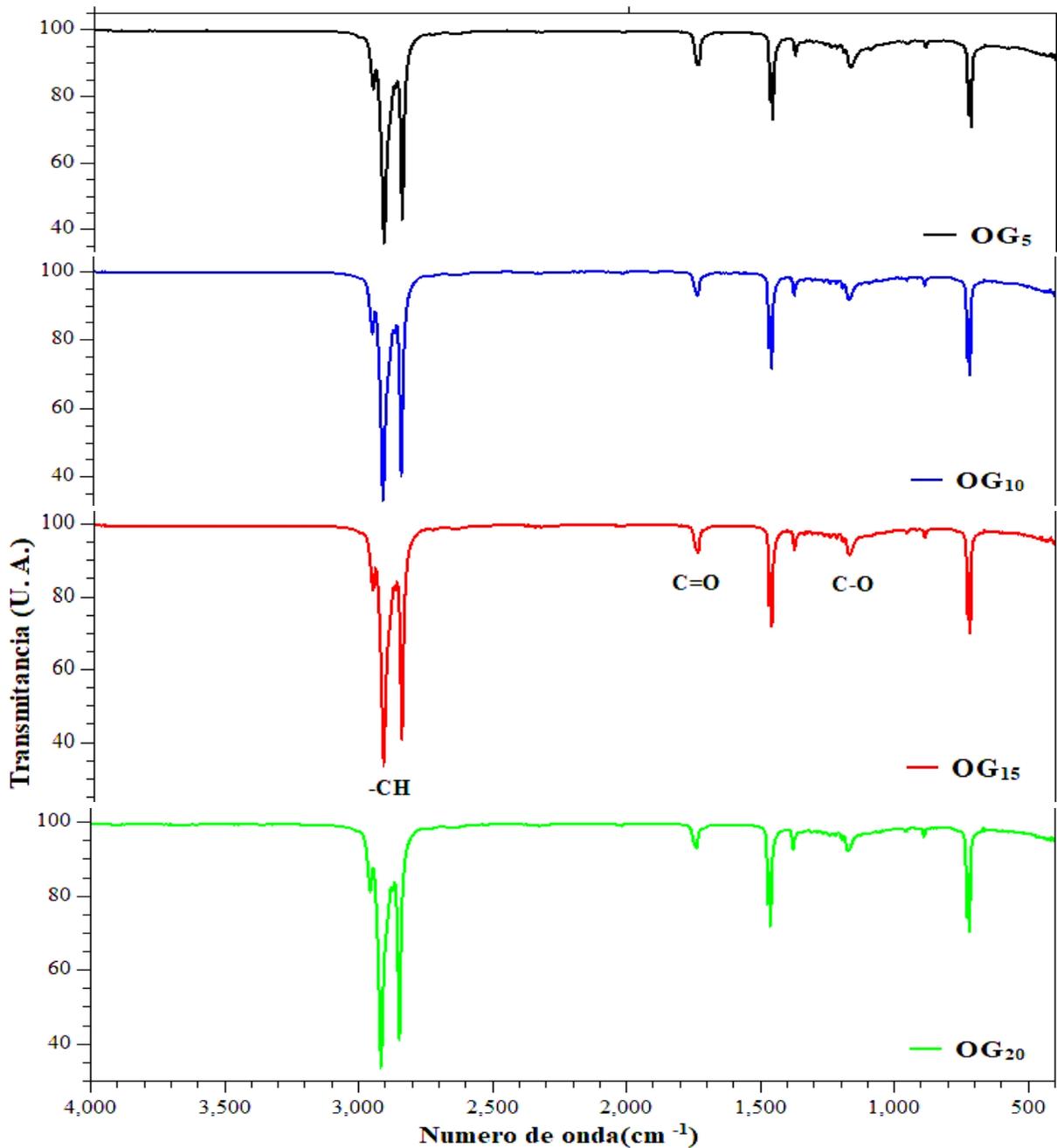


Figura 7.9. Perfiles de FT-IR para los oleogel formados con cera de abeja.

### 7.2.3 Propiedades reológicas

Las pruebas dinámicas para los hidrogeles de almidón mostraron que los hidrogeles presentan un comportamiento pseudoplástico, es decir, reducen su viscosidad a medida que incrementa la velocidad de corte, como se muestra en la Figura 7.10. Este comportamiento es similar al reportado para hidrogeles de almidón de papa (Rebaza Cabrera, 2019), maíz y papa (Jiménez-Hernández et al., 2007).

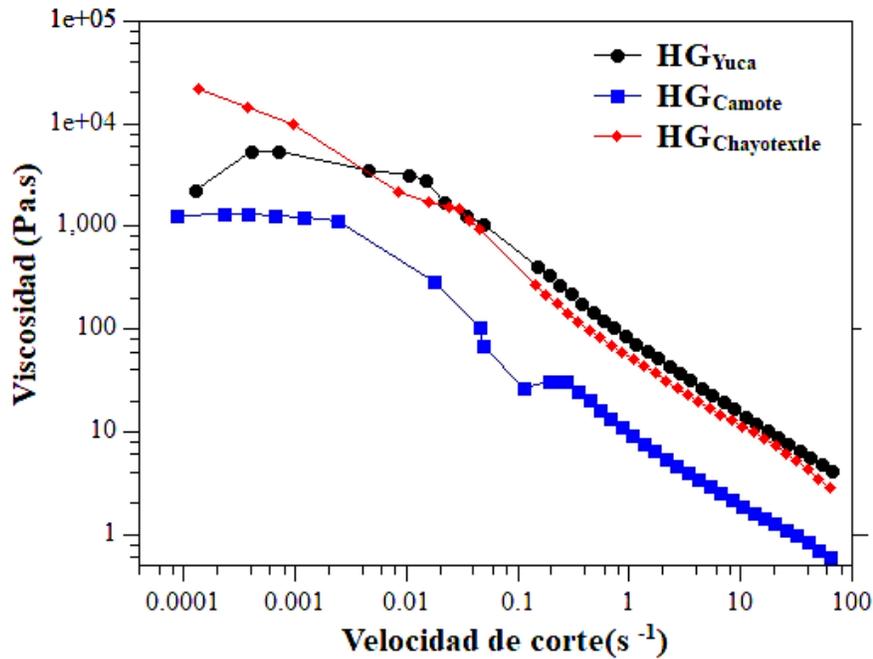


Figura 7.10. Perfiles de curvas de flujo de HG para los hidrogeles de almidón.

De acuerdo con Ruß (2016), el comportamiento pseudoplástico de este tipo de materiales se relaciona con la red de amilosa en la matriz del hidrogel, y conforme se eleva la tasa de corte las moléculas de amilosa se reorientan en la misma dirección de cizallamiento, desenredándose parcialmente y minimizando la resistencia al flujo. De acuerdo con los perfiles de flujo, el hidrogel formado con almidón de camote mostró la menor viscosidad, mientras que los hidrogeles de yuca y chayotextle presentaron un comportamiento muy semejante. Los parámetros reológicos basados en el ajuste de los datos al modelo de Oswald de Waele se muestran en la Tabla 7.2, donde el índice de flujo ( $n$ ) para todos los hidrogeles fue menor a 1, en concordancia con el perfil reoadelgazante, mientras que el índice de consistencia ( $K$ ) fue mayor para HG<sub>Yuca</sub>, seguido de HG<sub>Chayotextle</sub> y HG<sub>Camote</sub>, respectivamente. Este comportamiento puede relacionarse con una mayor organización interna de los polisacáridos en la matriz gelificada.

Tabla 7.2. Parámetros reológicos para los hidrogeles de almidón.

Tratamiento	n	K (Pa.s <sup>n</sup> )	R <sup>2</sup>
HG <sub>Yuca</sub>	0.23	89.98	0.99
HG <sub>Camote</sub>	0.25	10.96	0.99
HG <sub>Chayotextle</sub>	0.23	63.48	0.98

En el caso de las propiedades viscoelásticas, los hidrogeles mostraron un carácter predominantemente elástico ( $G' > G''$ ) a bajas deformaciones, presentando un cambio de comportamiento hacia sistemas con carácter más viscoso a deformaciones mayores al 10% (Figura 7.11). Los hidrogeles formados con almidón de chayotextle mostraron un punto de cruce entre los módulos a menores deformaciones, seguido del almidón de yuca y camote. Este último mostró un punto de cruce en deformaciones por arriba del 100%, denominado como punto de intersección (Lugo Espinosa, 2014), indicando que la estructura sólida de los sistemas gelificados es alterada, generando la desintegración de las redes 3D de los hidrogeles (Ruß, 2016).

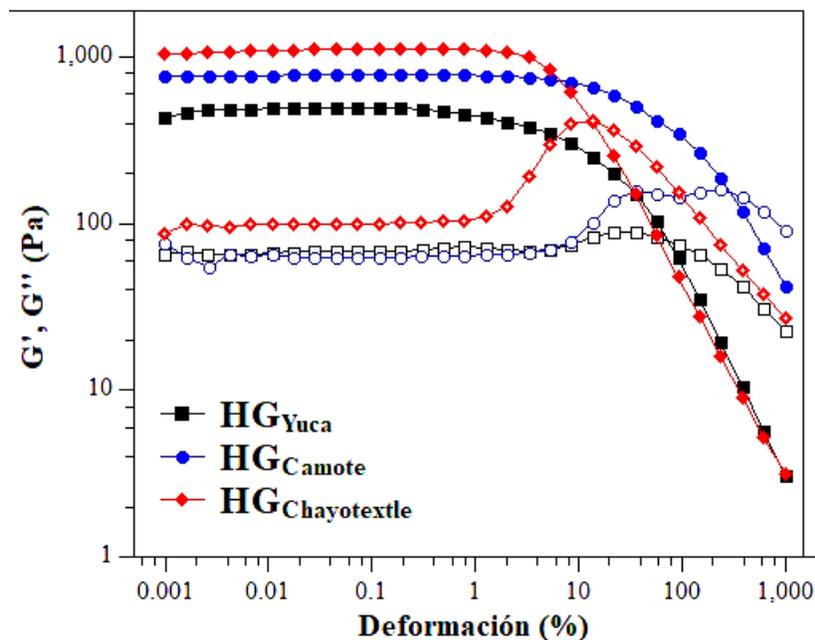


Figura 7.11. Perfil viscoelástico de los hidrogeles formados con almidones.

En el caso de los oleogeles los perfiles de flujo mostraron que estos sistemas se comportan como fluidos pseudoplástico (Figura 7.12a). El aumento de la concentración de la cera de

abeja, dio como resultado valores mayores de viscosidad, así como, ligeras variaciones y posteriormente una disminución drástica de la viscosidad indicando el rompimiento de las estructuras cristalinas presentes. La cantidad de cristales presentes por la concentración del gelificante pudo influir en este comportamiento, que concuerda con los resultados obtenidos en las pruebas de textura cuyas muestras presentaron mayor dureza (Gao & Wu, 2020; Kwon & Hyuk-Chang, 2022). Para las propiedades viscoelásticas de los oleogeles (Figura 7.12b), la concentración de cera tuvo un efecto sobre la ubicación del punto de transición, reduciendo la estabilidad y rigidez del oleogel conforme se incrementa el contenido de cera de abeja. Este comportamiento puede asociarse con la presencia de mayor cantidad de cristales en los oleogeles con mayor concentración de cera de abeja, este comportamiento es semejante a lo reportado por Koev et al. (2020).

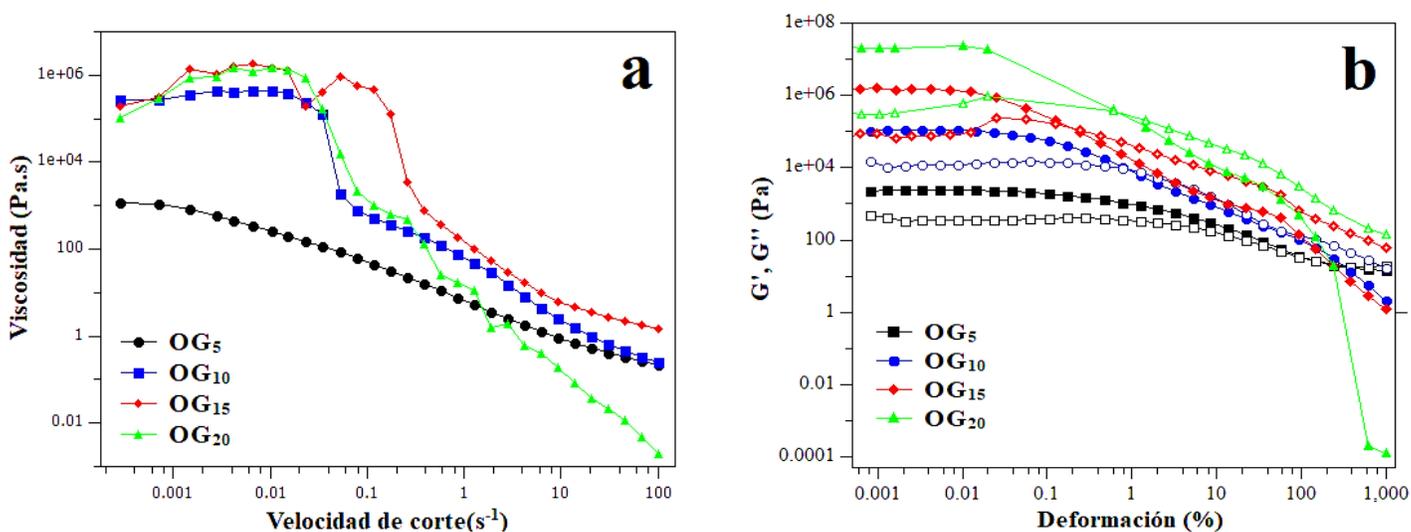


Figura 7.12. Perfiles reológicos: a) curvas de flujo y b) módulos de almacenamiento (G') y de pérdida (G'') para los oleogeles.

### 7.3 Obtención de bigeles

De acuerdo con los resultados anteriores, para la formación de los bigeles se decidió trabajar con el oleogel OG<sub>5</sub>, ya que éste presentaba las mejores características y manejabilidad para su incorporación en los bigeles. En la Figura 7.13 se muestran las imágenes de los bigeles formados con los diferentes almidones y conteniendo betacaroteno.

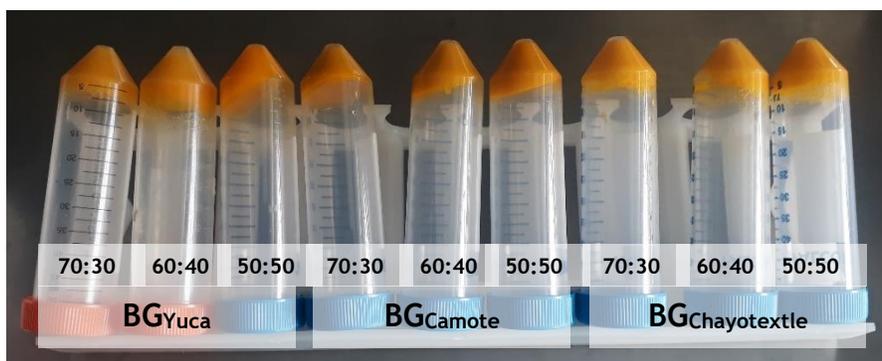


Figura 7.13. Bigeles tipo O/W formados con HG de almidón y OG5.

Los bigeles fueron observados en el microscopio y mediante el uso de colorantes para teñir las fases HG y OG fue posible visualizar la distribución de cada una de estas en el sistema compuesto, como se muestra en la Figura 7.14. Los resultados demostraron la formación de un sistema de tipo O/W, donde el oleogel estaba disperso en el hidrogel, con morfologías semejantes a las reportadas previamente ([Mokhtar-Ibrahim et al., 2013](#); [Singh et al., 2014](#); [Behera et al., 2015](#); [Lupi et al., 2015](#); [Martins et al., 2019](#); [Bollom et al., 2020](#)). Esta distribución de fases permite evaluar el potencial de los tres tipos de almidones para la protección de carotenoides en sistemas gelificados. Cabe mencionar que los bigeles mostraron cierta polidispersidad en su distribución de fases, es decir, fue posible observar la presencia de zonas con estructuras homogéneas y bien definidas. Respecto a la fuente de almidón empleada para los hidrogeles, los bigeles de yuca presentaron mejor distribución de las fases (Figura 7.14) y en el caso de la proporción de HG:OG para esta fuente de almidón, el BG<sub>60:40</sub> fue el que mejor distribución y homogeneidad presentó en las fases. En el caso de los bigeles formados con almidones de camote y chayotextle, estos presentaron mayor heterogeneidad y aglomeraciones en la distribución de fases, lo cual puede estar asociado a que estos sistemas presentaron mayor dificultad para realizar la dispersión y homogeneización de las fases (Figura 7.15 y 7.16). De acuerdo con [Lupi et al., \(2015\)](#) y [Shakeel et al., \(2019\)](#), las características finales de los bigeles van a estar influenciadas por la distribución estructural de las dos fases y tamaño de gota de la fase dispersa.

Los sistemas bigeles formados con almidón de yuca presentaron morfologías más homogéneas y menor polidispersidad promoviendo una mayor estabilidad del sistema, estos

resultados concuerdan con los datos reportados anteriormente de que el hidrogel a base de almidón de yuca no presentó sinéresis, obteniéndose una mayor capacidad de retención de agua (Sección 7.2).

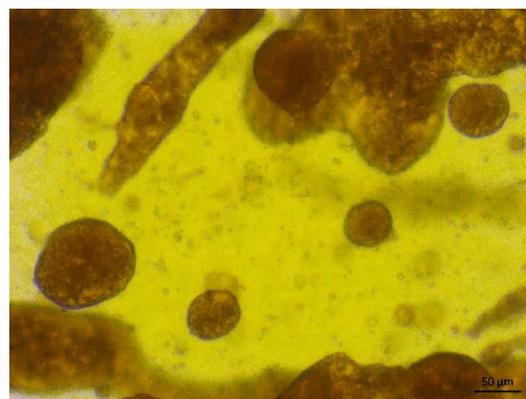
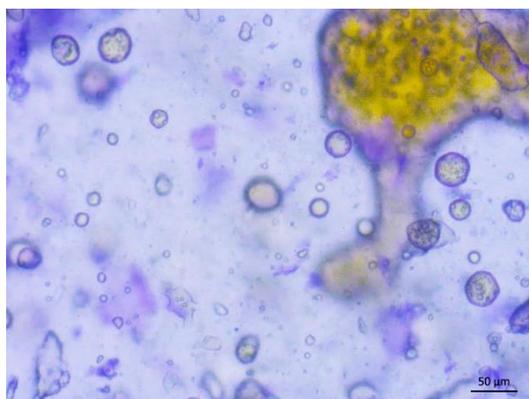
#### 7.4 Caracterización de los bigeles

Los bigeles fueron caracterizados por XRD, las muestras de los bigeles con los tres tipos de almidón mostraron picos similares a  $\sim 20^\circ$ , vinculadas a la presencia de los triacilglicéridos presentes en OG<sub>5</sub> (Figura 7.17 a-c). Al realizar la comparación de los perfiles en los bigeles, estos también presentaron señales de difracción a  $\sim 29^\circ$ , similares a las observadas para los hidrogeles, lo cual indica que a pesar de que las fases gelificadas se encuentran conformando una estructura más compleja, las características de cada fase individual se mantiene. Este comportamiento también fue observado por [Zheng et al., \(2020\)](#) para un bigel formado con  $\kappa$ -carrageenan y monoglucero como portadores de betacaroteno.

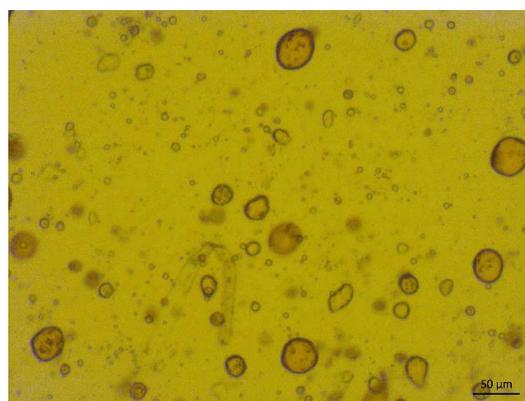
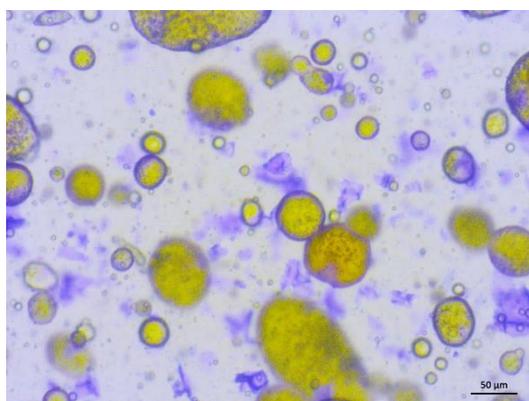
Respecto a la caracterización por FTIR (Figura 7.17d-f), los resultados mostraron que los bigeles mantienen inamovibles las señales presentadas en los sistemas puros de HG y OG descritos en la sección 7.2.2. En la muestra BG<sub>70:30</sub> para almidón de yuca (Figura 7.17d) se observa un cambio en las intensidades de las señales en comparación con las otras dos proporciones de OG utilizadas, mientras que los perfiles de los bigeles con almidón de camote y chayotextle no se presentan cambios significativos en las bandas características ni en la intensidad de las señales de absorción. Los perfiles de los bigeles mostraron señales entre 900 a 1200  $\text{cm}^{-1}$  y de 3300 -3600  $\text{cm}^{-1}$ , los cuales están relacionados con los perfiles de la fase hidrofílica del bigel, mismos que son característicos de almidones gelificados ([Abdullah et al., 2018](#); [Meng et al., 2020](#); [Pal & Banerjee, 2018](#); [Son-Trinh & Binh-Dang, 2019](#); [Larrea-Wachtendorff et al., 2019](#)). Por otro lado, se obtuvieron señales de la fase lipofílica en los rangos 1400 a 1500  $\text{cm}^{-1}$ , 1700 a 1800  $\text{cm}^{-1}$  y 2800 a 3000  $\text{cm}^{-1}$  ([Fayaz et al., 2017](#); [Pang et al., 2020](#); [Yilmaz & Öğütçü, 2014b](#)).

# BG<sub>Yuca</sub>

70:30



60:40



50:50

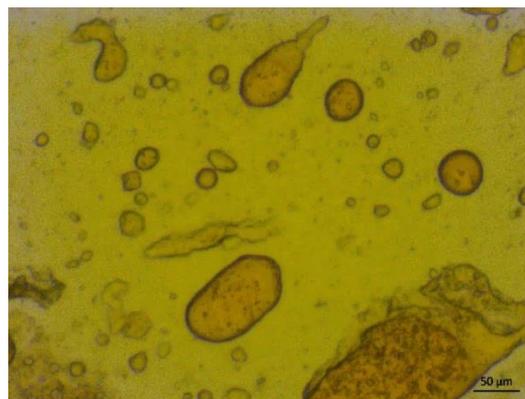
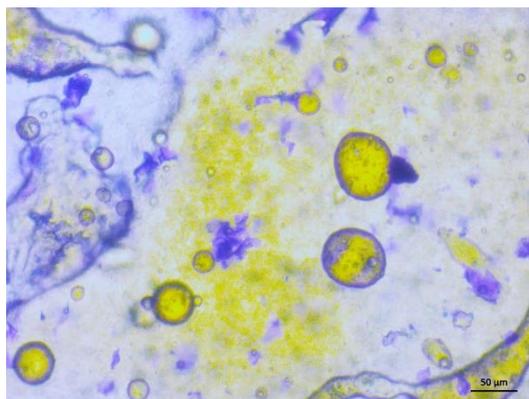


Figura 7.14. Morfología de bigeles O/W formados con almidón de yuca con tinción de la fase HG con Azul Nilo (izquierdo) y fase OG<sub>5</sub> con Rojo Nilo (derecho).

# BG<sub>Camote</sub>

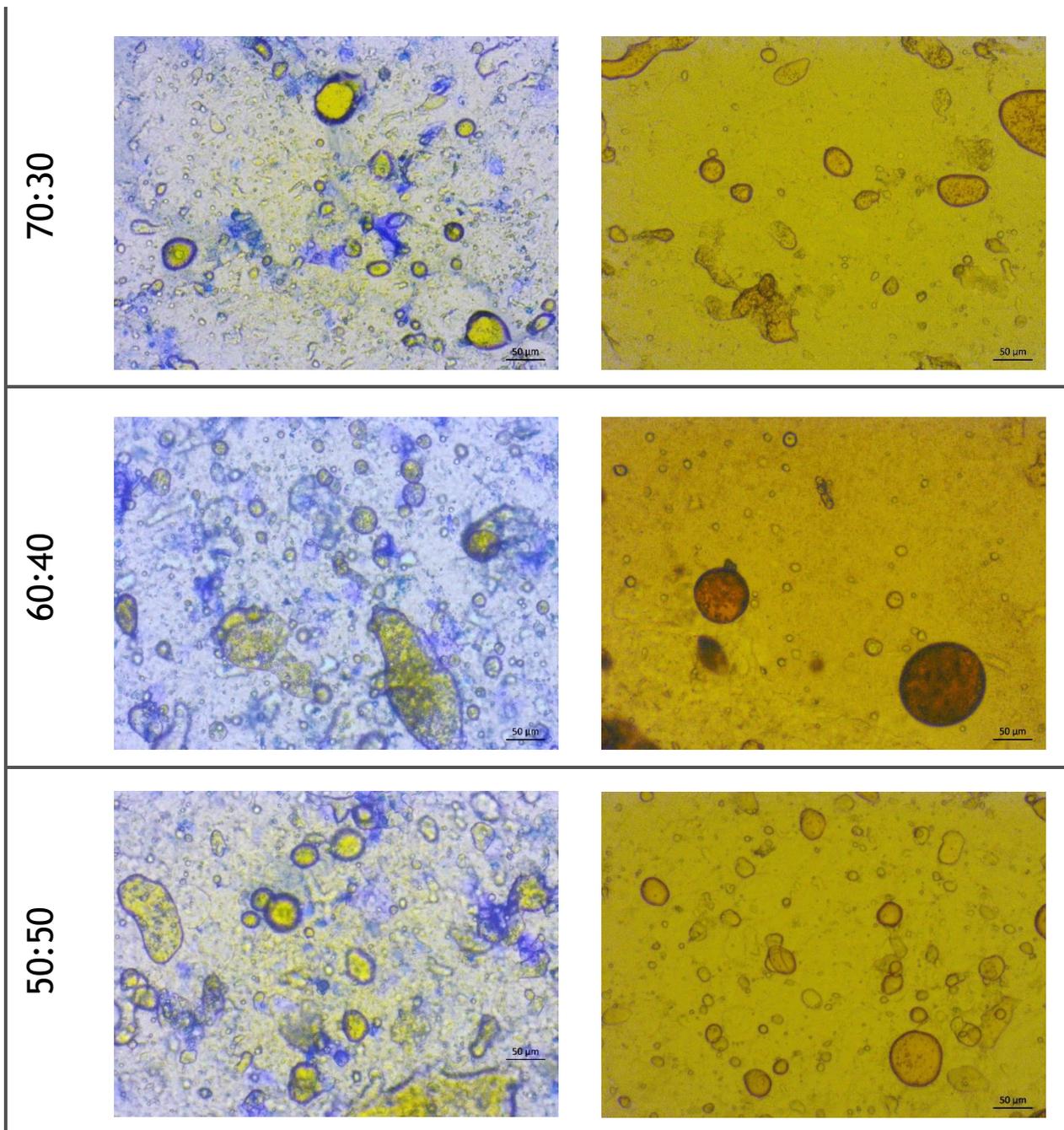


Figura 7.15. Morfología de bigeles O/W formados con almidón de camote con tinción de la fase HG con Azul Nilo (izquierdo) y fase OG<sub>5</sub> con Rojo Nilo (derecho).

**BG<sub>Chatotextle</sub>**

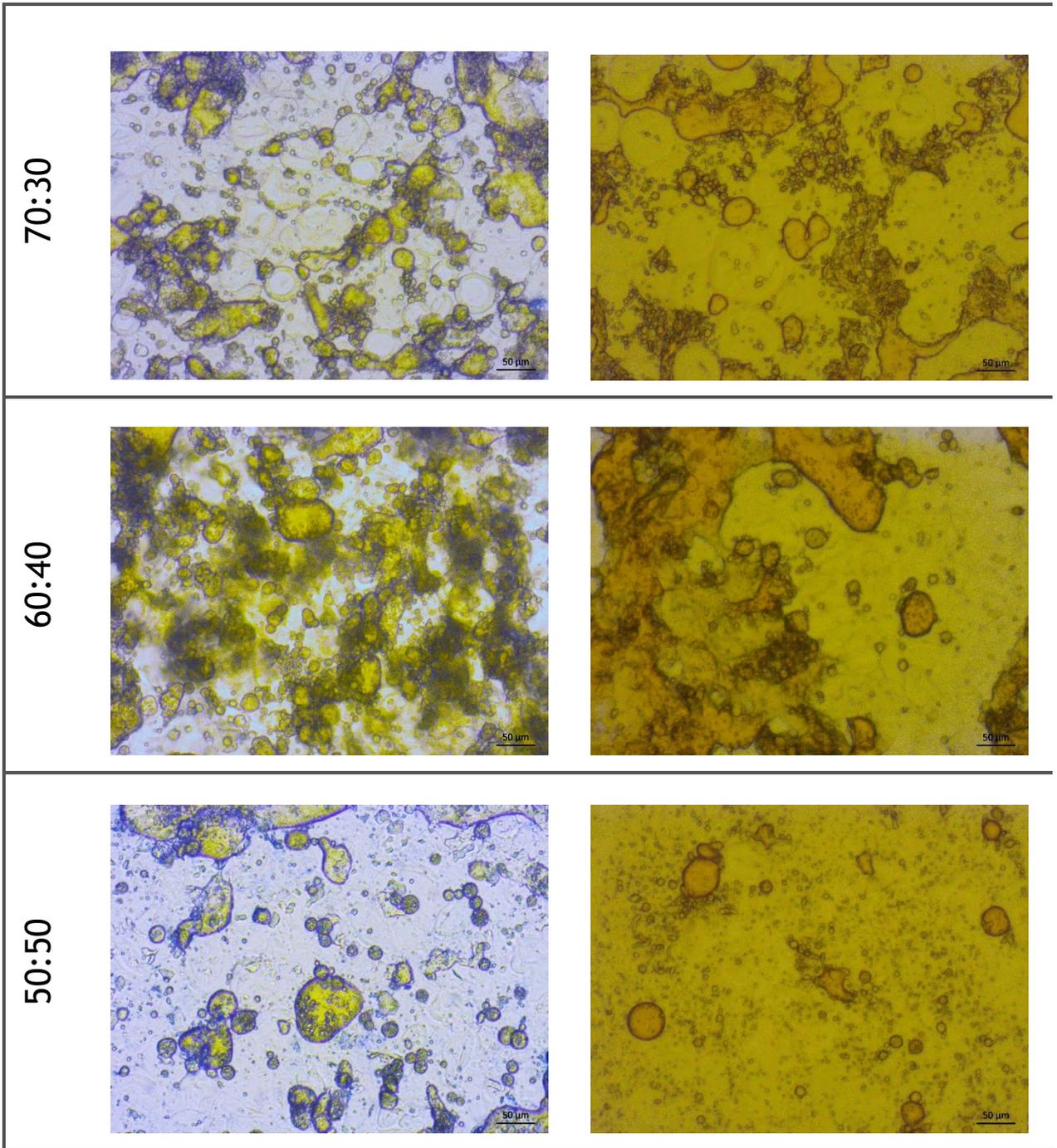
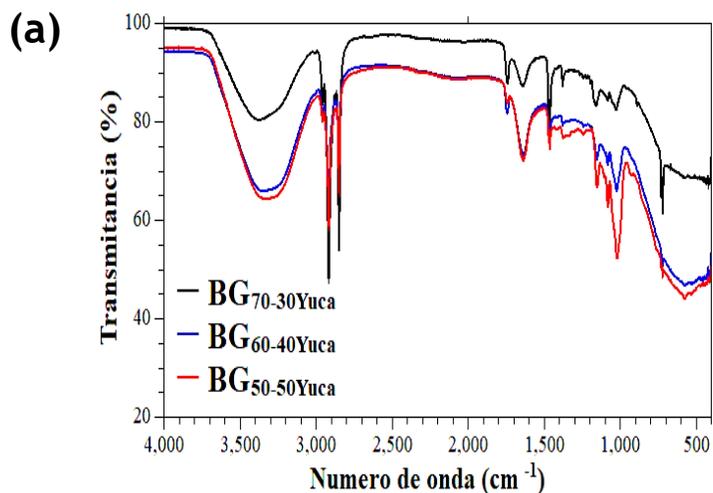
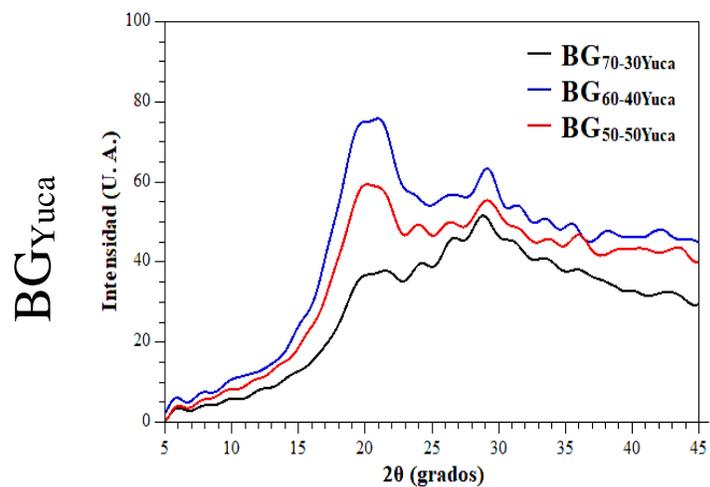
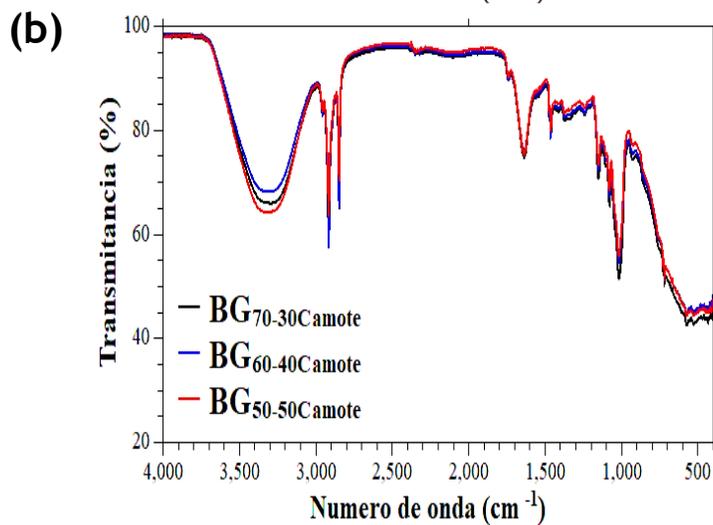
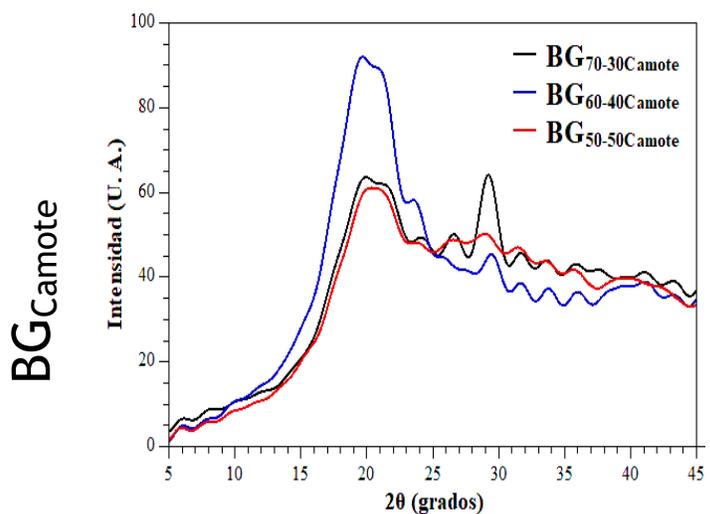


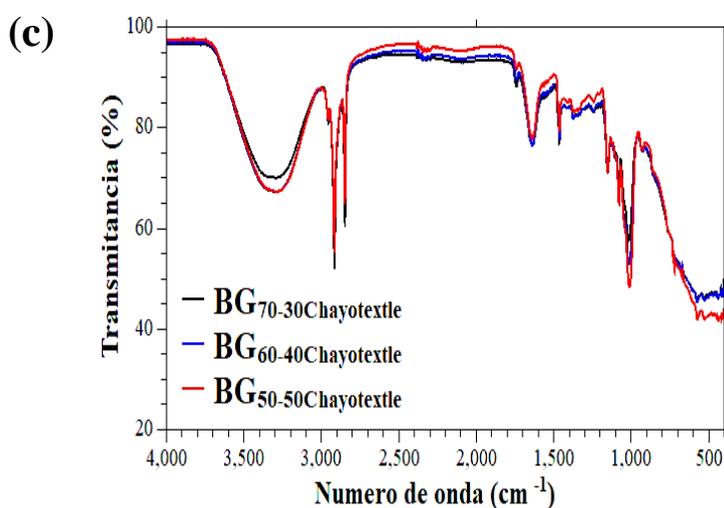
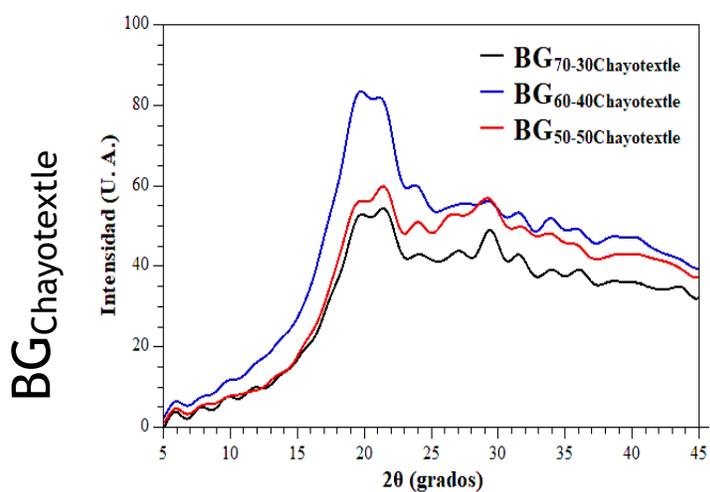
Figura 7.16. Morfología de bigeles O/W formados con almidón de chayotextle con tinción de la fase HG con Azul Nilo (izquierdo) y fase OG<sub>5</sub> con Rojo Nilo (derecho).



**(d)**



**(e)**



**(f)**

Figura 7.17. Perfiles de XRD y FTIR para los bigeles formados con almidones de yuca (a y d), camote (b y e) y chayotextle (c y f).

Estos resultados mostraron que los bigeles se formaron solo por interacciones físicas. Se obtuvieron las mismas señales de los sistemas hidrogeles y oleogeles puros, sin la presencia de nuevos picos o cambios significativos, es decir, que no hubo nuevos enlaces químicos en la interacción entre las dos fases (Fasolin et al., 2021).

#### 7.4.1 Propiedades reológicas

Los perfiles de flujo de los bigeles mostraron que el contenido OG en el sistema no tuvo efecto significativo sobre la viscosidad de los sistemas gelificados, como puede observarse en la Figura 7.18 (lado izquierdo). Sin embargo, el comportamiento de las propiedades viscoelásticas presentó ligeros cambios en los perfiles de los módulos viscoelásticos para el caso de los bigeles formados con hidrogeles de yuca y camote, sin efecto aparente por el contenido de oleogel. En el caso del bigel formado con el almidón de chayotextle, la fracción de OG<sub>5</sub> sí tuvo efecto sobre el comportamiento viscoelástico. Respecto al punto de transición de los módulos, el tratamiento BG<sub>70:30</sub> con HG<sub>Yuca</sub> y OG<sub>5</sub>, mostró un mayor intervalo de deformación para llegar al punto de cruce, comparado con las otras dos concentraciones de OG<sub>5</sub> e incluso con el observado para el hidrogel puro, lo que puede interpretarse como una estructuración del sistema y una mayor estabilidad contra la deformación (Figura 7.18 lado derecho). Zheng et al., (2020), reportaron en un bigel, el módulo G' fue mayor cuando la fracción del oleogel era más alta, similar a lo exhibido por los bigeles con almidón de yuca. Esta diferencia en el comportamiento de los bigeles puede estar relacionado con el tipo de almidón y sus componentes internos. Por lo tanto, la concentración de cada uno de los sistemas HG y OG, tuvo un efecto sobre el comportamiento viscoelástico de los sistemas bigeles (Lupi et al., 2015; Martins et al., 2019; Bollom et al., 2020; Fasolin et al., 2021).

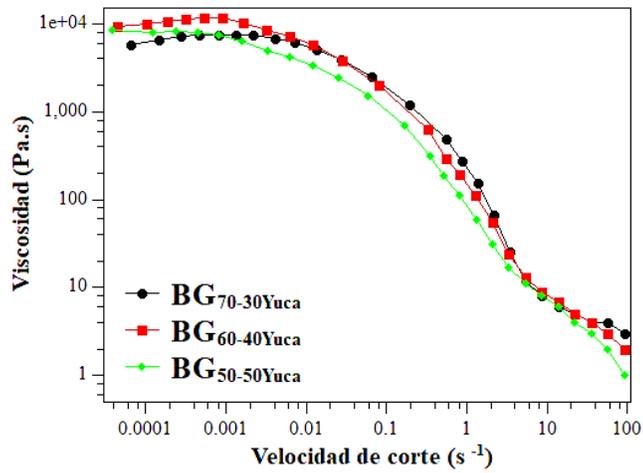
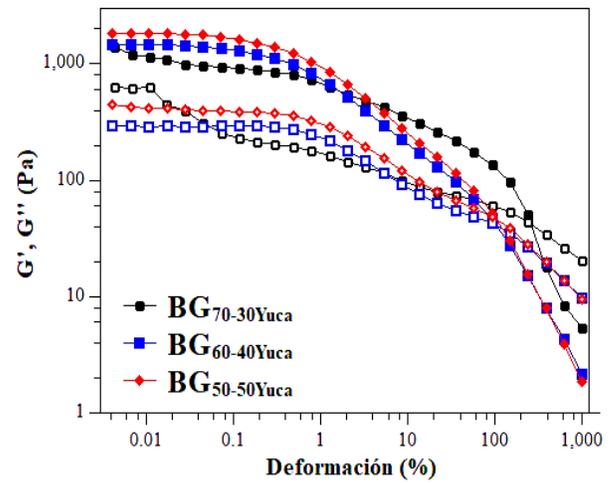
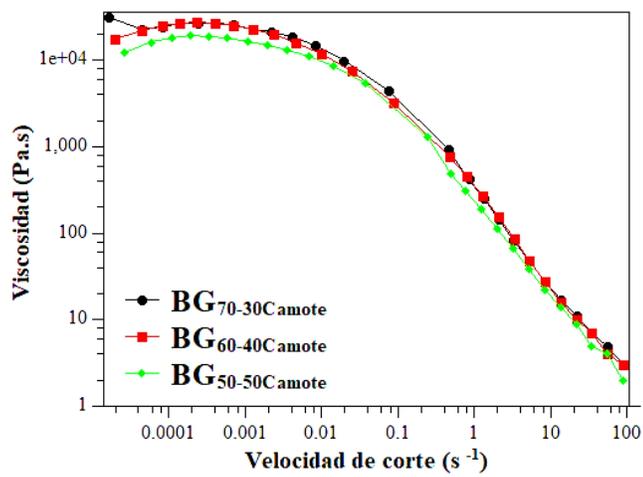
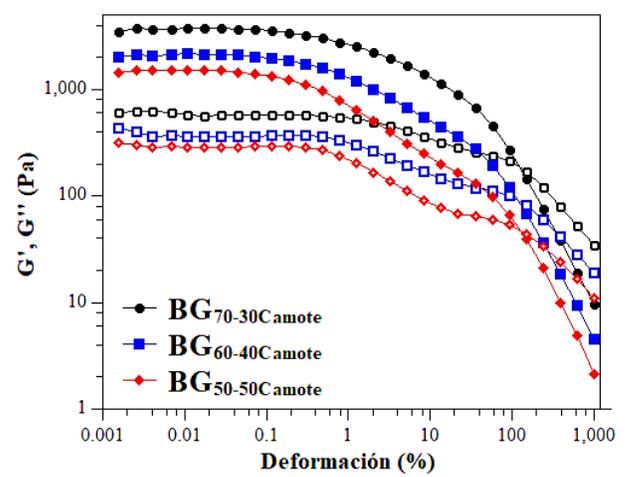
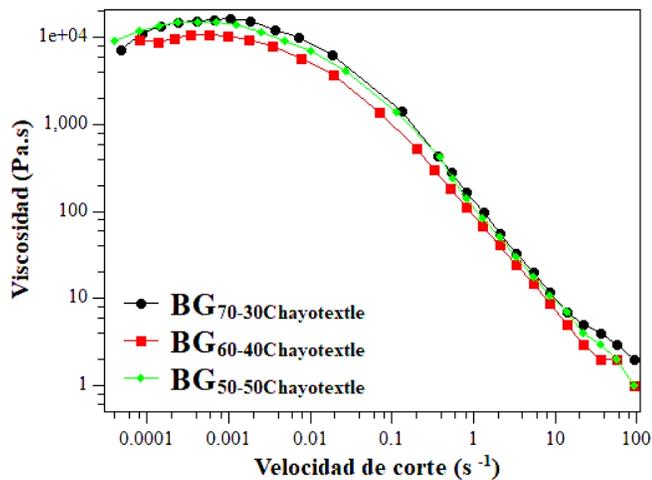
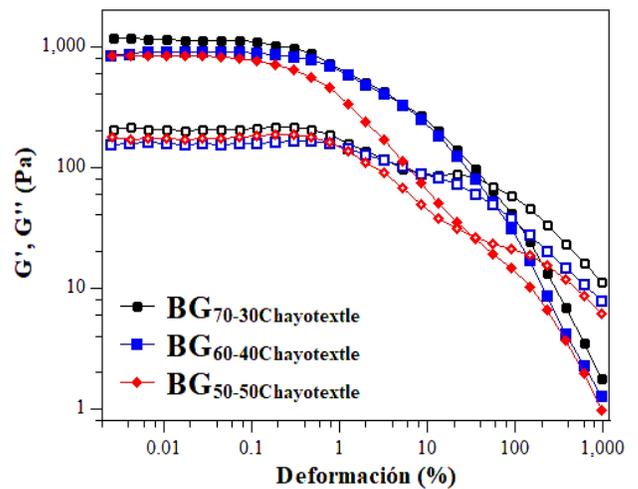
**BG<sub>Yuca</sub>****(a)****(d)****BG<sub>Camote</sub>****(b)****(e)****BG<sub>Chayotextle</sub>****(c)****(f)**

Figura 7.18. Perfiles de flujo (izq.) y propiedades viscoelásticas (der.) para los bigeles formados con almidones de yuca (a y d), camote (b y e) y chayotextle (c y f).

## 7.4.2 Propiedades de textura

Las pruebas texturales para los HG y OG mediante la prueba APT, permite simular la masticación en la boca humana, permitiendo obtener las características texturales de los geles, (Zhang et al., 2021). Dependiendo del tipo de almidón, los hidrogeles mostraron valores diferentes en cada uno de los parámetros texturales (Tabla 7.3). En el caso de HG<sub>Chayotextle</sub> se obtuvieron valores más altos en las características de dureza y masticabilidad, mientras que para HG<sub>Yuca</sub> los valores de adhesión similares con los HG<sub>Chayotextle</sub>. Respecto al HG<sub>Camote</sub>, éste presentó la mayor elasticidad. Mientras que la gomosidad no se observaron cambios significativos. De esta forma se demuestra que el tipo de almidón utilizado para la formación de hidrogeles tiene efecto sobre la estructuración del sistema gelificado, así como de sus características internas. Se ha reportado que uno de los principales factores que contribuyen a desarrollar este comportamiento en las propiedades de textura es el contenido de amilosa, ya que este polisacárido actúa como inhibidor del poder de hinchamiento del almidón, contrario a la amilopectina. Por lo que, a mayor contenido de amilosa en el almidón, se forman geles con mayor dureza y menor poder de hinchamiento, mientras que un menor contenido de amilosa resulta en geles más débiles con mayor hinchamiento. Este comportamiento sobre la dureza de los hidrogeles concuerda con las observaciones en el microscopio. Respecto a la cohesión, esta propiedad indica la fuerza de las interacciones dentro de los hidrogeles para resistir los dos ciclos de compresión, por lo que valores bajos pueden indicar una mala interacción entre las cadenas (Hernández-Medina et al., 2008; Linares García, 2015; Biduski et al., 2018; Torres et al., 2018) y en el caso de los hidrogeles obtenidos, sólo hubo diferencia significativa entre los hidrogeles de yuca y chayotextle con el hidrogel de camote.

Respecto a los oleogeles se observó un aumento en las propiedades al incrementar la concentración de la cera de abeja como agente gelificante (Tabla 7.3), excepto la dureza para OG<sub>20</sub>, el cual mostró valores inferiores al OG<sub>15</sub>. La cohesividad de los oleogeles mostró un comportamiento totalmente diferente, a medida que la concentración de la cera de abeja incrementaba, los valores de cohesión disminuían. Este comportamiento puede relacionarse con la cantidad de cristales o partículas sólidas presentes en el sistema, es decir, una alta concentración del agente gelificante en el OG<sub>20</sub> produjo una mayor cantidad

de cristales en el sistema, dando como resultado un gel con menor dureza y menor resistencia. De la misma forma, a medida que incrementa la cantidad de cristales, la resistencia de los oleogeles en la compresión va disminuyendo, indicando que existe una mayor asociación entre cadenas a bajas concentraciones ([Yilmaz & Öğütçü, 2014a](#); [Fayaz et al., 2017](#); [Trujillo-Ramírez et al., 2019](#); [Zhang et al., 2021](#)). Estos resultados concuerdan con lo observado en las pruebas morfológicas y reológicas de los oleogeles en secciones anteriores.

Finalmente, en el caso de los bigeles, los resultados mostraron que la dureza del bigel aumentó casi al doble en los sistemas formados con almidón de yuca respecto a la dureza obtenida con el hidrogel solo, un comportamiento semejante fue obtenido para la elasticidad. Lo anterior demuestra una relación positiva entre la concentración en la que se encuentra cada fase gelificada individual, OG:HG. Por otra parte, los bigeles a base de almidón de camote también mostraron valores altos en la dureza, adhesividad, elasticidad, masticabilidad y gomosidad comparado al hidrogel puro; en el caso del bigel con almidón de chayotextle, la dureza y la adhesividad incrementaron conforme incrementó la fracción de OG5 en el sistema, aunque sin cambios significativos. La capacidad de adhesión de los geles indica la respuesta del gel y su resistencia a separarse, este parámetro puede indicar la influencia de las fracciones HG y OG en los bigeles, en este caso a mayor concentración de OG revela una respuesta textural más adhesiva ([Martins et al., 2019](#)). Se ha reportado, que las propiedades texturales dependen en gran medida de la composición de los sistemas gelificadas ([Fasolin et al., 2021](#); [Samui et al., 2021](#)).

Tabla 7.3. Parámetros de textura para los sistemas gelificados HG, OG5, y BG empleando distintos almidones.

Tratamiento	Parámetros						
	Dureza (N)	Adhesividad (mJ)	Cohesividad	Elasticidad (mm)	Masticabilidad (mJ)	Gomosidad (N)	
<b>Hidrogel</b>							
HG <sub>Yuca</sub>	0.35±0.05a	1.13±0.07b	0.79±0.06b	2.52±0.04a	0.70±0.08a	0.28±0.04a	
HG <sub>Camote</sub>	0.48±0.08a,b	0.64±0.11a	0.44±0.06a	5.04±0.13c	1.05±0.10a	0.21±0.09a	
HG <sub>Chayotextle</sub>	0.63±0.06b	1.21±0.03b	0.61±0.08a,b	3.81±0.07b	1.46±0.08b	0.38±0.04a	
<b>Oleogel</b>							
OG <sub>5</sub>	1.89±0.15A	3.45±0.13A	0.22±0.05B	5.34±0.16A	2.23±0.12A	0.42±0.11A	
OG <sub>10</sub>	16.36±0.17B	10.16±0.19B	0.08±0.06A,B	8.52±0.08C	10.94±0.16C	1.28±0.11B	
OG <sub>15</sub>	42.65±0.08D	10.63±0.15C	0.05±0.03A,B	9.53±0.11D	18.90±0.09D	1.98±0.10C	
OG <sub>20</sub>	33.46±0.15C	18.09±0.13D	0.04±0.01A	7.40±0.16B	9.94±0.09B	1.34±0.08B	
<b>Bigeles</b>							
BG <sub>Yuca</sub>	70:30	0.64±0.19a,b	0.77±0.02a	0.52±0.06b,c	7.06±0.23a,b	2.25±0.49a,b	0.32±0.06a,b,c
	60:40	0.71±0.08a,b,c	1.23±0.36a	0.46±0.04a,b,c	7.36±1.01b	2.39±0.30a,b	0.33±0.01a,b,c
	50:50	0.72±0.11a,b,c	1.34±0.06a	0.41±0.03a,b	7.59±0.46b	2.25±0.62a,b	0.30±0.06a,b,c
BG <sub>Camote</sub>	70:30	1.24±0.27c	0.92±0.25a	0.41±0.03a,b	7.14±0.08a,b	3.59±0.47b	0.50±0.07c
	60:40	0.77±0.03a,b,c	1.20±0.57a	0.40±0.01a,b	7.19±0.04a,b	2.20±0.01a,b	0.31±0.02a,b,c
	50:50	1.20±0.51b,c	1.42±0.28a	0.37±0.04a,b	7.25±0.47b	3.16±1.29a,b	0.44±0.16b,c
BG <sub>Chayotextle</sub>	70:30	0.37±0.06a	1.26±0.02a	0.59±0.01c	5.62±0.24a	1.24±0.26a	0.22±0.04a
	60:40	0.49±0.16a	1.48±0.08a	0.51±0.05b,c	6.19±0.21a,b	1.50±0.38a,b	0.24±0.06a,b
	50:50	0.66±0.16a,b,c	1.78±0.52a	0.31±0.04a	6.05±0.06a,b	1.20±0.10a	0.20±0.01a

Letras diferentes en misma columna y para el mismo sistema gelificado (HG, OG, o BG) representan diferencia significativa (P<0.05).

## 7.5 Protección de carotenoides en bigeles tipo O/W

Debido a que el objetivo no sólo es evaluar la estabilidad física de los sistemas gelificados, sino también su potencial como sistemas portadores y protectores de compuestos bioactivos como el betacaroteno, esta propiedad se determinó mediante la evaluación del cambio de color en los bigeles. Los resultados se presentan en la Tabla 7.4. mostraron valores similares de luminosidad ( $L^*$ , 0 negro y 100 blanco) en todos los bigeles, con un rango de valores de 7.44 a 7.96, además no se observaron cambios significativos durante en tiempo de almacenamiento. Los parámetros de  $a^*$  (de negativo a positivo corresponden de verde a

rojo, respectivamente) y  $b^*$  (de negativo a positivo corresponden de azul a amarillo, respectivamente) por lo tanto al ser valores positivos indicaron que estaban entre los colores rojos y amarillos para todos los sistemas (Xia et al., 2020.). La intensidad o pureza de color ( $C^*$ ) cambió con el tiempo de almacenamiento en la mayoría de los bigeles (Figura 7.19), la muestra BG<sub>50:50</sub> para almidón de camote fue el que obtuvo el valor más alto en el día cero, siendo el bigel BG<sub>50:50</sub> para almidón de chayotextle el que mostró una mayor diferencia al final del almacenamiento. Por último,  $h$  que es un parámetro para medir los tonos donde  $0^\circ$  es morado,  $45^\circ$  es rojo y  $90^\circ$  es amarillo, los bigeles se encontraron en un tono intermedio entre los colores morado y rojo, aunque hubo una ligera inclinación al tono morado transcurrido el tiempo de almacenamiento.

El índice de color (CI) se encontró en valores negativos que se relaciona los colores que van del verde profundo al verde amarillento (Vignoni et al., 2006), los valores disminuyeron durante en tiempo de almacenamiento y lo mismo sucedió con el índice de amarillo (YI). TCD por su parte mostró valores similares, sin cambios significativos, según el tipo de almidón y la concentración de las fases. TCD se considera una buena herramienta para establecer la percepción visual del color, valores mayores conllevan a una mayor percepción de diferentes colores entre las muestras según Ordóñez-Santos et al., (2017). Mientras que la disminución de YI puede estar relacionado al betacaroteno.

Tabla 7.4. Parámetros de color de los bigeles O/W estabilizadas con los tres almidones al cabo de 7 días de almacenamiento bajo exposición directa a luz (25°C).

Muestra	L*	a*	b*	C	h	CI	YI	TCD	
<b>t = 0 d</b>									
<b>BG<sub>Yuca</sub></b>	70:30	7.82±0.11a	24.39±3.20a,b	8.92±0.86a	25.97±3.30a,b	20.10±0.61a,b	-8.94±1.54a	162.97±13.56a	-
	60:40	7.91±0.02a	28.85±0.61a,b	9.38±0.61a	30.46±0.57a,b	18.73±0.45a,b	-7.15±0.15a	169.53±11.44a	-
	50:50	7.80±0.03a	30.78±5.25a,b	12.05±3.76a	32.76±5.81a,b	18.71±0.58a,b	-6.64±1.53a	220.83±69.70a	-
<b>BG<sub>Camote</sub></b>	70:30	7.57±0.45a	34.27±4.81a,b	13.35±4.32a	36.48±5.57a,b	18.71±0.40a,b	-5.70±1.20a	254.74±96.76a	-
	60:40	7.89±0.06a	29.26±0.11a,b	9.97±0.35a	30.90±0.21a,b	18.81±0.54a,b	-7.01±0.07a	180.41±4.98a	-
	50:50	7.44±0.21a	41.35±1.83b	13.41±0.37a	43.46±1.85b	17.98±0.29a	-4.50±0.20a	257.67±0.04a	-
<b>BG<sub>Chayotextle</sub></b>	70:30	7.78±0.04a	29.57±5.11a,b	10.16±1.24a	31.27±5.23a,b	19.04±0.91a,b	-7.03±1.54a	186.54±23.74a	-
	60:40	7.77±0.12a	22.19±5.35a	8.64±1.77a	23.81±5.63a	21.34±0.71b	-10.50±3.56a	158.63±30.20a	-
	50:50	7.81±0.12a	25.49±7.16a,b	8.76±1.85a	26.96±7.38a,b	19.15±1.27a,b	-9.04±3.36a	160.10±31.44a	-
<b>t = 7 d</b>									
<b>BG<sub>Yuca</sub></b>	70:30	7.80±0.10A	16.64±0.51A	5.14±0.18A	17.41±1.01A	17.18±0.30E	-17.03±1.65A	94.17±4.56A	8.62±2.87A
	60:40	7.94±0.03A	24.27±0.90B,C	6.25±0.02B	25.06±0.87B,C,D	14.44±0.45A,B,C	-9.68±0.45B	112.36±0.02B	5.56±0.59A
	50:50	7.89±0.11A	22.95±1.40B,C	5.98±0.20B	23.71±0.74B,C	14.61±0.65A,B,C,D	-10.46±0.37B	108.26±2.03B	9.91±5.24A
<b>BG<sub>Camote</sub></b>	70:30	7.96±0.02A	27.15±0.40C	6.58±0.01B	27.94±0.37D	13.62±0.20A	-8.33±0.14B,C	118.08±0.44B	9.84±6.75A
	60:40	7.93±0.06A	25.49±0.74B,C	6.31±0.27B	26.26±1.23C,D	13.91±0.51A,B	-9.08±0.67B,C	113.66±4.03B	5.28±0.02A
	50:50	7.90±0.11A	38.32±2.18D	9.95±0.06C	39.59±0.68E	14.56±0.59A,B,C,D	-5.22±0.07C	179.96±3.60C	4.64±0.08A
<b>BG<sub>Chayotextle</sub></b>	70:30	7.86±0.14A	21.68±0.33B	6.05±0.11B	22.51±1.05B	15.59±0.25B,C,D,E	-11.25±0.68B	110.00±4.04B	8.93±4.85A
	60:40	7.72±0.03A	15.99±1.37A	4.64±0.27A	16.65±0.96A	16.16±0.65C,D,E	-18.44±1.85A	85.87±5.29A	7.38±4.44A
	50:50	7.79±0.18A	16.89±0.25A	4.97±0.07A	17.6±0.83A	16.41±0.40D,E	-16.71±1.07A	91.19±3.45A	9.43±7.07A

Letras diferentes en misma columna y para el mismo tiempo de almacenamiento (t0 y t7) representan diferencia significativa (P<0.05).

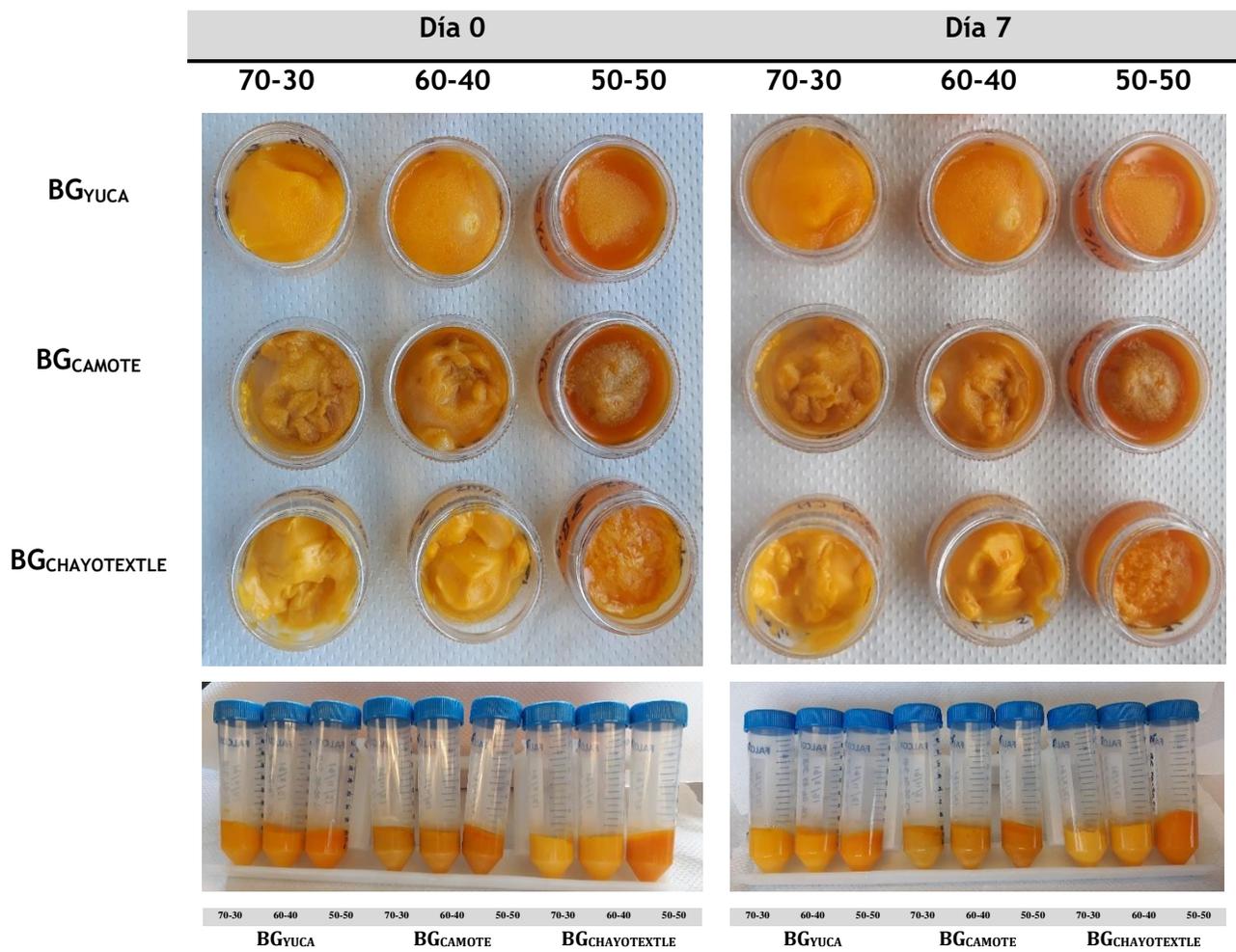


Figura 7.19. Bigeles a base de almidón de yuca, camote y chayotextle incorporado el carotenoide durante el tiempo de almacenamiento (t0 y t7).

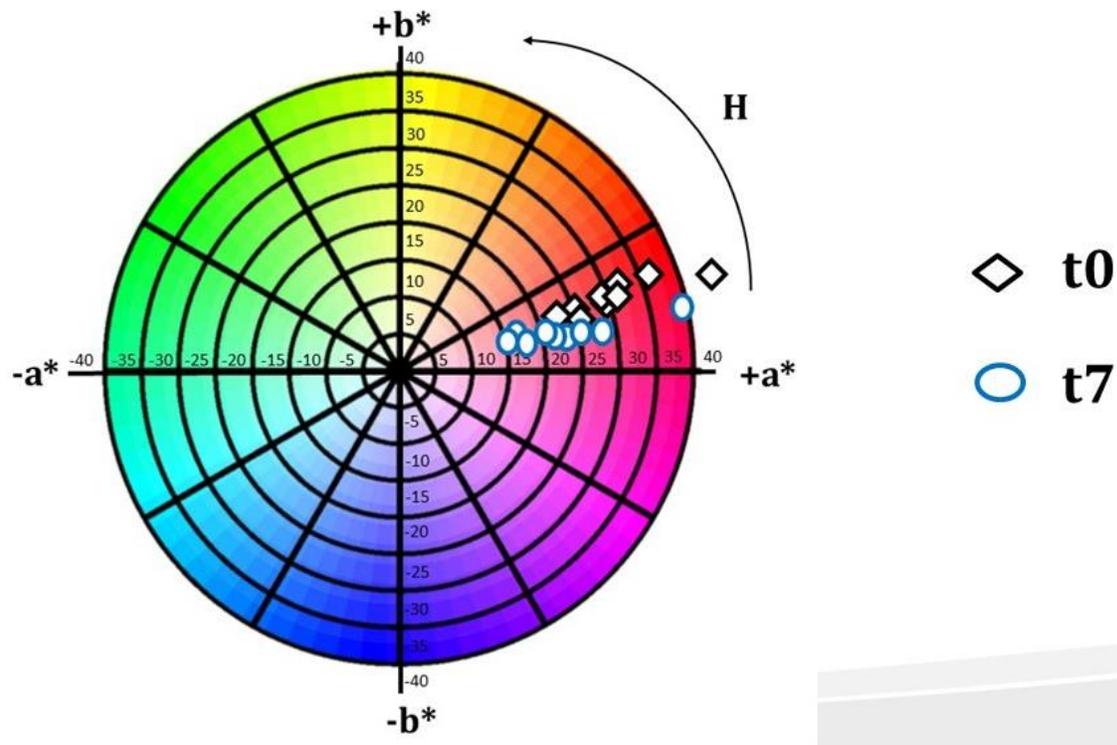


Figura 7.20. Gráfica de espacio de color durante el tiempo de almacenamiento (t0 y t7) de los bigeles con las coordenadas  $a^*$ ,  $b^*$  y el tono.

La Figura 7.20 muestra el comportamiento de los bigeles durante el almacenamiento, t0 y t7 (días), demostrando los valores descritos en la tabla 7.4. los valores de las coordenadas  $a^*$ ,  $b^*$  y  $h$  son las que se compararon, observando cambios en los valores de cada parámetro al inicio y al final del tiempo de almacenamiento. Aunque cabe señalar que en condiciones de oscuridad a  $4^{\circ}\text{C}$  no se observaron cambios significativos en los bigeles por lo que no fue reportados en este escrito.

El betacaroteno al ser uno de los colorantes naturales más empleados en la industria de los alimentos se ha buscado diversas metodologías para su protección a la degradación, siendo principalmente los oleogeles, los sistemas con mayor estudio al ser un compuesto lipofílico. Cui et al., (2019), incorporaron betacaroteno a oleogeles a base de aceite de maíz y monoglicérido (GMS), obteniendo una mayor estabilidad del compuesto con concentraciones más altas de GMS. Mientras que, Qi et al., (2020), trabajaron con emulsiones Pickering (O/W) y emulsiones Pickering de oleogel en agua para mejorar la estabilidad química y biodisponibilidad del betacaroteno. Estos fueron algunos de los

ejemplos relacionados con este compuesto bioactivo, aunque cabe mencionar que los estudios de geles y sus aplicaciones en los alimentos va en constante crecimiento.



## 8. Conclusiones

Los resultados obtenidos sugieren que los almidones de yuca, camote y chayotextle presentaron la capacidad para la formación de geles, siendo el almidón de yuca la que presentó una mayor viscosidad y capacidad de retención de agua. La formulación de oleogeles a base de cera de abeja demostró que a una concentración de 5% se observaron las mejores características viscoelásticas (punto de transición al flujo a mayor deformación) y cohesivas, siendo esta concentración la que permitió una mejor incorporación en la formación de los bigeles. Los bigeles, hidrogeles y oleogeles mostraron un carácter elástico ( $G'$ ) predominante sobre el carácter viscoso ( $G''$ ), un comportamiento típico de un gel. Así como, un comportamiento no newtoniano de tipo pseudoplástico. También se observaron señales características de los grupos funcionales y estructuras cristalinas de los tres sistemas, además los resultados demostraron que los sistemas se formaron por interacciones físicas. Por último, los bigeles formados con los tres tipos de almidón mostraron una mejor estabilidad y firmeza comparadas con los hidrogeles y oleogeles puros, lo que dio como resultado bigeles con una buena capacidad para la protección de carotenoides. El presente trabajo proporcionó información de tres almidones: yuca, camote y chayotextle, como alternativas prometedoras para su aislamiento, así como, la presencia de propiedades funcionales adecuadas para su uso como agentes encapsulantes de compuestos bioactivos de interés alimentario. Aún queda mucho camino por recorrer para la comprensión completa de estos sistemas, los cuales dan pauta a nuevas investigaciones con el fin de mejorar la calidad final de los productos alimenticios.

## 9. Referencias

- Abdallah, D.J., Weiss, R. G. (2000). n-Alkanes Gel n-Alkanes (and Many Other Organic Liquids). *Langmuir*, 16, 352-355. <https://doi.org/10.1021/LA990795R>
- Abdullah, A.H.D., Chalimah, S., Primadona, I., Hanantyo, M. H. G. (2018). Physical and chemical properties of corn, cassava, and potato starches. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 160, 012003. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/160/1/012003>
- Agama-Acevedo, E., Ottenhof, M.A, Farhat, I. Z., Paredes-López, O., Ortíz-Cereceres, J., Bello-Pérez, L. A. (2005). Aislamiento y caracterización del almidón de maíces pigmentados. *Agrociencia*, 39, 419-429.
- Ahmed, E.M. (2015). Hydrogel:preparation, characterization, and applications: a review. *Journal of Advanced Research*, 6, 105-121. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2013.07.006>
- Ajazudin, A.A., Khichariya, A., Gupta, S., Patel, R.J., Giri, T.K.Tripathi, D.K. (2013). Recent expansions in an emergent nodel drug delivery technology: Emulgel. *Journal of Controlled Release*, 171(2), 122-132. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2013.06.030>
- Almeida, I. F, Fernandes, A.R, Fernandes, L., Pena-Ferreira, M.R., Costa, P.C., Bahia, M.F. (2008). Moisturizing effect of oleogel/hydrogel mixtures. *Pharmaceutical Development and Technology*, 13, 487-494. <https://doi.org/10.1080/10837450802282447>
- Andonova, V., Peneva, P., Georgiev, G.S., Toncheva, V.T., Apostolova, E., Peychev, Z., Dimitrova, S., Katsarova, M., Petrova, N., Kassarova, M. (2017). Ketoprofen-loaded polymer carriers in bigel formulation: An approach to enhancing drug photostability in topical application forms. *International Journal of Nanomedicine*, 12, 6221-6238. <https://doi.org/10.2147/IJN.S140934>
- Aristizábal, J. & Sánchez T. (2007). Guía técnica para producción y análisis de almidón de yuca. En: Boletín de servicios agrícolas de la FAO, No. 163. Danilo Mejía Lorío (Coordinador Técnico). Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma. Pp.33-36.
- Babu, S.S, Praveen, V.K, Ajayaghosh, A. (2014). Functional  $\pi$ -Gelators and Their Applications. *Chemical Reviews*, 114(4), 1973-2129. <https://doi.org/10.1021/cr400195e>

- Bao-Ngoc, L.B., Bao-Trung, P.T., Ngoc-Hoa, P., Van-Hung, P. (2017). Physicochemical properties and resistant starch contents of sweet potato starches from different varieties grown in Vietnam. *International Journal of Food Science and Nutrition*, 2, 53-57.
- Bashir, K. & Aggarwal, M. (2019). Physicochemical, structural and functional properties of native and irradiated starch: a review. *Journal of Food Science and Technology*, 56, 513-523. <https://doi.org/10.1017/s13197-018-3530-2>
- Behera, B., Sagiri, S.S., Pal, K., Pramanik, K., Rana, U.A., Shakir, I., Anis, A. (2015). Sunflower oil and protein-based novel bigels as matrices for drug delivery applications— Characterization and in vitro antimicrobial efficiency. *Polymer - Plastics Technology and Engineering*, 54(8), 837-850. <https://doi.org/10.1080/03602559.2014.974268>
- Behera, B., Sagiri, S.S., Singh, V.K., Pal, K., Anis, A. (2014). Mechanical properties and delivery of drug/probiotics from starch and non-starch based novel bigels: A comparative study. *Starch*, 66, 865-879. <https://doi.org/10.1002/star.201400045>
- Biduski, B., Ferreria, W.M., Colussi, A., de Mello, S. L., Lim, L.T., Guerra, A.R., da Rosa, E. (2018). Starch hydrogels: The influence of the amylose content and gelatinization method. *International Journal of Biological Macromolecules*, 113, 443-449. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.02.144>
- Blake, A. I., Co, E. D., Marangoni, A. G. (2014). Structure and Physical Properties of Plant Wax Crystal Networks and Their Relationship to Oil Binding Capacity. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 91, 885-903. <https://doi.org/10.1007/s11746-014-2435-0>
- Bollom, M., Clark, S., Acevedo, N. (2020). Development and characterization of a novel soy lecithin-stearic acid and whey protein concentrate bigel system for potential edible applications. *Food Hydrocolloids*, 101, 105570. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105570>
- Buerkle, L.E. & Rowan, S.J. (2012). Supramolecular gels formed from multi-component low molecular weight species. *Chemical Society Reviews*, 41, 6089-6102. <https://doi.org/10.1039/C2CS35106D>

- Carvalho, A.J. (2008). Starch: Major sources, properties and applications as thermoplastic materials. En: Monomers, polymers and composites from renewable sources. Mohamed Naceur Belgacem y Alessandro Gandini (Eds.), Elsevier, Amsterdam, Países Bajos. Pp. 321-342.
- Cheng, H., Chen, L., McClements, D. J., Yang, T., Zhang, Z., Ren, F., Miao, M., Tian, Y., Jin, Z. (2021). Starch-based biodegradable packaging materials: A review of their preparation, characterization and diverse applications in the food industry. *Trends in Food Science & Technology*, 114, 70-82. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.05.017>
- Chung, H.J. & Liu, Q. (2009) Effect of gamma irradiation on molecular structure and physicochemical properties of corn starch. *Journal of Food Science*, 74, 353-361. <https://doi.org/10.1111/j.1750-3841.2009.01159.x>
- Cornejo-Ramírez, Y.I., Martínez-Cruz, O., Del Toro-Sánchez, C.L., Wong-Corral, F.J., Borboa-Flores, J., Cinco-Moroyoqui, F.J. (2018). The structural characteristics of starches and their functional properties. *CyTA - Journal of Food*, 16, 1003-1017. <https://doi.org/10.1080/19476337.2018.1518343>
- Cui, M., Mao, L., Lu, Y., Yuan, F., Gao, Y. (2019). Effect of monoglyceride content on the solubility and chemical stability of  $\beta$ -carotene in organogels Mengnan. *LWT - Food Science and Technology*, 106, 83-91. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.02.042>
- Cui, H., Tang, C., Wu, S., McClements, D.J., Liu, S., Li, B., Li, Y. (2022). Fabrication of chitosan-cinnamaldehyde-glycerol monolaurate bigels with dual gelling effects and applications as cream analog. *Food Chemistry*, 384, 132589. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132589>
- Davidovich-Pinhas, M. (2018). Oleogels. In *Polymeric Gels. Characterization, Properties and Biomedical Applications*, Kunal Pal & Indranil Banerjee (Eds.), Woodhead Publishing Series in Biomaterials, Elsevier Ltd., Cambridge, MA., USA. Pp. 231-249. <https://doi.org/10.1016/b978-0-08-102179-8.0008-9>
- Deng, G., Ma, Q., Yu, H., Zhang, Y., Yan, Z., Liu, F., Chen, Y. (2015). Macroscopic organohydrogel hybrid from rapid adhesion between dynamic covalent hydrogel and organogel. *ACS Macro Letters*, 4(4), 467-471. <https://doi.org/10.1021/acsmacrolett.5b00096>

- Fasolin, L. H., Martins, A. J., Cerqueira, M. A., Vicente, A. A. (2021). Modulating process parameters to change physical properties of bigels for food applications. *Food Structure*, 28, 100173. <https://doi.org/10.1016/j.foostr.2020.100173>
- Fayaz, G., Hossein, S. A., Kadivar, M., Valoppi, F., Barba, L., Balducci, C., Conte, L., Calligaris, S., Nicoli, M. C. (2017). Pomegranate seed oil organogels structured by propolis wax, beeswax, and their mixture. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 119, 1700032. <https://doi.org/10.102/ejlt.201700032>
- Gao, Y. & Wu, S. (2020). Development and evaluation of a novel oleogel system based on starch-water-wax-oil. *Food & Function*, 11, 7727-7735. <https://doi.org/10.1039/D0FO01785J>
- García-Díaz, S., Hernandez-Jaimes, C., Escalona-Buendia, H., Bello-Pérez, L.A., Vernon-Carter, E.J., Alvarez-Ramirez, J. (2016). Effects of CaCO<sub>3</sub> treatment on the morphology, crystallinity, rheology and hydrolysis of gelatinized maize starch dispersions. *Food Chemistry*, 207, 139-147. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.03.095>
- Gómez-Luría, D., Vernon-Carter, E.J., Alvarez-Ramirez, J., Cruz-Sosa, F. (2019). Insights of the ability of gelatinized fractions from non-chemical modified corn, rice, wheat, and waxy corn starches to stabilize O/W emulsions. *Food Hydrocolloids*, 89, 726-734. <https://doi.org/10.1016/foodhyd.2018.11.045>
- Guízar-Miranda, A., Montañéz-Soto, J. L., García-Ruiz, I. (2008). Parcial caracterización de nuevos almidones obtenidos del tubérculo de camote del cerro (*Dioscorea* spp). *Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*, 9(1), 81-88.
- Hernández-Medina, M., Torruco-Uco, J.G, Chel-Guerrero, L., Betancur-Ancona, D. (2008). Caracterización fisicoquímica de almidones de tubérculos cultivados en Yucatán, México. *Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 28(3), 718-726.
- Hernández-Uribe, J.P., Agama-Acevedo, E., González-Soto, R.A., Bello-Pérez, L.A., Vargas-Torres, A. (2011). Isolation and characterization of Mexican chayote tuber (*Sechium edule* Sw.) starch. *Starch/Stärke*, 63, 32-41. <https://doi.org/10.1002/star.201000078>
- Huanca-Rengel, F. C. (2013). Caracterización fisicoquímica de almidones aislados de quinua orgánica roja, blanca y negra (*Chenopodium quinoa* Wild) procesado por Andean Valley

S.A. Tesis para la obtención de grado de Licenciatura en Ciencias Químicas. Universidad Mayor de San Andrés, Perú.

- Ismail, H., Irani, M., Ahmad, Z. (2013). Starch-Based Hydrogels: Present Status and Applications. *International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials*, 62, 411-420. <https://doi.org/10.1080/00914037.2012.719141>
- Jane, J. (2006). Starch Properties, Modifications, and Applications. *Journal of Macromolecular Science*, 32. Pp. 751-757. <https://doi.org/10.1080/10601329508010286>
- Jiménez-Hernández, J., Salazar-Montoya, J.A., Ramos-Ramírez, E.G. (2007). Physical, chemical and microscopic characterization of a new starch from chayote (*Sechium edule*) tuber and its comparison with potato and maize starches. *Carbohydrate Polymers*, 68, 679-686. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2006.07.035>
- Joaquín-Cruz, E., Hernández-Rodríguez, L., Jiménez-Alvarado, R., Alonso-Carrillo, N., Cruz-Sosa, F., Román-Guerrero, A. (2020). Water-in-oil nanoemulsions loaded with *Ardisia compressa* K. bioactive compounds: evaluation of their physicochemical stability and functional activities. *Journal of Dispersion Science and Technology*. [https://doi: 10.1080/01932691.2020.1848573](https://doi:10.1080/01932691.2020.1848573)
- Kaur, A., Shevkani, K., Katyal, M., Singh, N., Kumar Ahlawat, A., Mahendru Singh, A. (2016). Physicochemical and rheological properties of starch and flour from different durum wheat varieties and their relationships with noodle quality. *Journal of Food Science and Technology*, 53, 2127-2138. <https://doi.org/10.1007/s13197-016-2202-3>
- Koev, T. T., Muñoz-García, J. C., Iuga, D., Khimiyak, Y. Z., Warren, F. J. (2020). Structural heterogeneities in starch hydrogels. *Carbohydrate Polymers*, 249, 116834.
- Kwon, U. & Hyuk-Chang, Y. (2022). Rheological and Physicochemical Properties of Oleogel with Esterified Rice Flour and Its Suitability as a Fat Replacer. *Foods*, 11, 242. <https://doi.org/10.3390/foods11020242>
- Kundu, S., Muslim, T., Rahman, M.A., Faisal, A.-A. (2011). Extraction of starch from different sources: Their modification and evaluation of properties as pharmaceutical excipients. *Dhaka University Journal of Science*, 59(2), 263-266.

- Lago Tagliaprieta, B., Ferrari Felisberto, M.H., Aparecido Sanches, E., Campelo, P.H., Pedrosa Silva Clerici, M.T. (2021). Non-conventional starch sources. *Current Opinion in Food Science*, 39, 93-102. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2020.11.011>
- Larrea-Wachtendorff, D., Tabilo-Munizaga, G., Ferrari, G. (2019). Potato Starch Hydrogels Produced by High Hydrostatic Pressure (HHP): A First Approach. *Polymers*, 11, 1673. <https://doi.org/10.3390/polym1110673>
- Li, J., & Mooney, D.J. (2016). Designing hydrogels for controlled drug delivery. *Nature Review Materials*, 1, 160771. <https://doi.org/10.1038/natrevmats.2016.71>
- Linares García, J.A. (2015). Estudio de las Propiedades Físicas y Texturales de Geles de Pectinas de Alto y Bajo Metoxilo Obtenidas de *Crataegus pubescens* (Tejocote). Tesis de Disertación Doctorado. *Centro de Investigacion y de Estudios Avanzados del Instituto Politecnico Nacional*.
- Lugo Espinosa, A.K. (2014). Caracterización reológica de geles de liberación modificada y su cuantificación en suero. Tesis para el titulo de Químico Farmacéutico Biólogo. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Lui, J., Xu, B. (2019). A comparative study on texture, gelatinisation, retrogradation and potential food application of binary gels made from selected starches and edible gums. *Food Chemistry*, 296, 100-108. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.05.193>
- Lupi, F., Gentile, L., Gabriele, D., Mazzulla, S., Baldino, N., de Cindio, B. (2015). Olive oil and hyperthermal water bigels for cosmetic uses. *Journal of Colloid and Interface Science*, 459, 70-78. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2015.08.013>
- Mandu, C. C., Barrera-Arellano, D., Santana, M. H. A., Fernandes, G.D. (2020). Waxes used as structuring agents for food organogels: A Review. *Grasas y Aceites*, 71, e344. <https://doi.org/10.1039/gya.1169182>
- Martins, A. J., Silva, P., Maciel, F., Pastrana, L. M., Lopes, R., Cerqueira, M. A., Vicente, A. A. (2019). Hybrid gels: Influence of oleogel/hydrogel ratio on rheological and textural properties. *Food Research International*, 116, 1298-1305. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.10.019>

- Martin-Illiana, A., Notario-Pérez, F., Cazorla-Luna, R., Ruiz-Caro, R., Bonferoni, M.C., Tamayo, A., Veiga, M.D. (2022). Bigels as drug delivery systems: From their components to their applications. *Drug Discovery Today*, 27(4), 1008-1026. <https://doi.org/10.1016/j.drudis.2021.12.011>
- Meng, R., Wu, Z., Xie, H.Q, Xu, G. X., Cheng, J. S., Zhang, B. (2020). Preparation, characterization, and encapsulation capability of the hydrogel cross-linked by esterified tapioca starch. *International Journal of Biological Macromolecules*, 155(15), 1-5. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.03.141>
- Moorthy, S.N. (2002). Physicochemical and functional properties of tropical tuber starches: A review. *Starch*, 54(12), 559-592. [https://doi.org/10.1002/1521-379X\(200212\)54:12<559::AID-STAR2222559>3.0.CO;2-F](https://doi.org/10.1002/1521-379X(200212)54:12<559::AID-STAR2222559>3.0.CO;2-F)
- Mokhtar-Ibrahim, M., Hafez, S. A., Mahdy, M. M. (2013). Organogels, hydrogels and bigels as transdermal delivery systems for diltiazem hydrochloride. *Asian Journal of Pharmaceutical Sciences*, 8, 48-57. <https://doi.org/10.1016/j.ajps.2013.07.006>
- Ordóñez-Santos, L. E., Martínez-Girón, J., Arias-Jaramillo, M. E. (2017). Effect of Ultrasound Treatment on Visual Color, Vitamin C, Total Phenols, and Carotenoids Content in Cape Gooseberry Juice. *Food Chemistry*, 233, 96-100. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.04.114>
- Pal, K. & Banerjee, I. (2018). Polymeric Gels: Characterization, Properties and Biomedical Applications. *Editorial Matthew Deans*. Pp. 1-570.
- Pang, M., Shi, Z., Lei, Z., Ge, Y., Jiang, S., Cao, L. (2020). Structure and thermal properties of beeswax-based oleogels with different types of vegetable oil. *Grasas y Aceites*, 71(4), e380. <https://doi.org/10.3989/gya.0806192>
- Patel, A.R. (2017). A colloidal gel perspective for understanding oleogelation. *Current Opinion in Food Science*, 15, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2017.02.013>
- Patel-Kodela, S., Madhuri-Pandey, P., Nayak, S.K., Uvanesh, K., Anis, A., Pal, K. (2017). Novel agar-stearyl alcohol oleogel-based bigels as structured delivery vehicles. *International Journal Of Polymeric Materials And Polymeric Biomaterial*, 66 (13), 669-678. <http://dx.doi.org/10.1080/00914037.2016.1252362>

- Pedrosa, M., Schmiele, M. (2019). Starches for food application. Chemical, Technological and Health Properties. *Elsevier*, 460, 71-102.
- Peppas, N.A., Bures, P., Leobandung, W., & Ichikawa, H. (2000). Hydrogels in pharmaceutical formulations. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics* 50, 27-46. [https://doi.org/10.1016/S0939-6411\(00\)00090-4](https://doi.org/10.1016/S0939-6411(00)00090-4)
- Qi, W., Zhang, Z., Wu, T. (2020). Encapsulation of B-carotene in oleogel-in-water Pickering emulsion with improved stability and bioaccessibility. *International Journal of Biological Macromolecules*, 164, 1432-1442. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.07.227>
- Rathod, H. & Mehta, D. (2015). A review on pharmaceutical gel. *Acta Scientifica International Journal of Pharmaceutical Science*, 1, 33-47.
- Rawooh, M., Qureshi, D., Hoque, M., Prasad, G., Mohanty, B., Asif-Alam, M., Anis, A., Sarkar, P., Pal, K. (2020). Synthesis and characterization of novel tamarind gum and rice bran oil-based emulgels for the ocular delivery of antibiotics. *International Journal of Biological Macromolecules*, 164, 1608-1620. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.07.231>
- Rebaza Cabrera, M.G. (2019). Propiedades reológicas y texturales de geles de almidón de papa (*Solanum tuberosum* L.) entrecruzados, variedad Bretaña. Tesis para obtener el título de Ingeniero Agroindustrial. *Universidad Nacional de Trujillo. Facultad de Ciencias Agropecuarias*.
- Rehman, K., Mohd-Amin, M., Zulfakar, M. (2014). Development and physical characterization of polymer-fish oil bigel (Hydrogel/Oleogel) system as a transdermal drug delivery vehicle. *Journal of Oleo Science*, 63, 961-970. <https://doi.org/10.5650/jos.ess14101>
- Rehman, K. & Hanif-Zulfakar, M. (2014). Recent advances in gel technologies for topical and transdermal drug delivery. *Drug Development and Industrial Pharmacy*, 40, 433-440. <https://doi.org/10.3109/03639045.2013.828219>
- Ruß, N. (2016). Rheology and thermodynamics of starch-based hydrogel-mixtures. Tesis de Disertación Doctorado. Johannes Gutenberg Universität Mainz.
- Rubinstein, M., & Colby, R.H. (2003). *Polymer Physics*. Oxford University Press. Oxford, R.U.

- Sagiri, S.S., Singh, V.K., Kulanthaivel, S., Banerjee, I., Basak, P., Battarchrya, M.K., Pal, K. (2015). Stearate organogel-gelatin hydrogel based bigels: Physicochemical, thermal, mechanical characterizations and *in vitro* drug delivery applications. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 43, 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2014.11.026>
- Samui, T., Goldenisky, D., Rosen-Kligvasser, J., Davidovich-Pinhas, M. (2021). The development and characterization of novel in-situ bigel formulation. *Food Hydrocolloids* 113, 106416. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106416>
- Šárka, E., Dvořáček, V. (2017). New processing and applications of waxy starch (a review). *Journal of Food Engineering*, 206. Pp. 77-87. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.03.006>
- Senanayake, S.A., Ranaweera, K.K.D.S., Gunaratne, A., Bamunuarachchi, A. (2013). Comparative analysis of nutritional quality of five different cultivars of sweet potatoes (*Ipomea batatas* (L) Lam) in Sri Lanka. *Food Science & Nutrition*, 1(4), 284-291. <https://doi.org/10.1002/fsn3.38>
- Seung, D. (2020). Amylose in starch: towards an understanding of biosynthesis, structure and function. *New Phytologist*, 228, 1490-1504. <https://doi.org/10.1111/nph.16858>
- Shakeel, A., Lupi, F.R, Gabriele, D., Baldino, N., de Cindio, B. (2018). Bigels: A unique class of materials for drug delivery applications. *Soft Materials*, 16(2), 77-96. <https://doi.org/10.1080/1539445X.2018.1424638>
- Shakeel, A., Farooq U., Iqbal, T., Yasin, S., Lupi, F., Gabriele, D. (2019). Key characteristics and modelling of bigels systems: A review. *Materials Science and Engineering C.*, 97, 932-953. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2018.12.075>.
- Shakeel, A., Farooq, U., Gabriele, D., Marangoni, A.G., Lupi, F.R. (2021). Bigels and multi-component organogels: An overview from rheological perspective. *Food Hydrocolloids*, 111, 106190. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106190>
- Shalviri, A., Qiang, L., Abdekhodaie, M. J., & Xiao, Y. W. (2010). Novel modified starch-xanthan gum hydrogels for controlled drug delivery: Synthesis and characterization.

*Carbohydrate Polymers*, 79(4), 898-907.  
<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2009.10.016>

Singh, V. K., Banerjee, I., Agarwal, T., Pramanik, K., Bhattacharya, M. K., Pal, K. (2014). Guar gum and sesame oil based novel bigels for controlled drug delivery. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 123, 582-592. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2014.09.056>

Singh, S, Singh, N., Ezekiel, .R, Kaur, A. (2011). Effects of gamma-irradiation on the morphological, structural, thermal and rheological properties of potato starches. *Carbohydrate Polymers*, 83(4), 1521-1528.  
<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2010.09.063>

Sívoli, L., Pérez, E., Rodríguez, P., Raymúndez, M. B., Ayesta, C. (2009). Técnicas microscópicas y de dispersión de luz empleadas en la evaluación de la estructura del almidón nativo de yuca (*Manihot esculenta* C). *Acta Microscópica*, 18(3), 2009, 195-203.

Skilling, K.J., Citossi, F., Bradshaw, T.D., Ashford, M., Kellam, B., Marlow, M. (2014). Insights into low molecular mass organic gelators: a focus on delivery and tissue engineering applications. *Soft Matter*, 10(2), 237-256. <https://doi.org/10.1039/C3SM52244J>

Son-Trinh, K., Binh-Dang, T. (2019). Structural, Physicochemical, and Functional Properties of Electrolyzed Cassava Starch. *Hindawi, International Journal of Food Science*, 2019, 9290627. <https://doi.org/10.1155/2019/9290627>.

Suzuki, M., Hanabusa, K. (2010). Polymer organogelators that make supramolecular organogels through physical cross-linking and self-assembly. *Chemical Society Reviews* 39 (2), 455-463. <https://doi.org/10.1039/B910604A>

Torres, M.D., Chenlo, F., Moreira, R. (2018). Viscoelastic and Textural Characteristics of Gels Obtained from Potato Starch Roasted under Several Temperature-Time Conditions. *International Journal of Polymer Science*, 2018, 7606359. <https://doi.org/10.1155/2018/7606359>

Trujillo-Ramírez, D., Lobato-Calleros, C., Vernon-Carter, E.J., Alvarez-Ramirez, J. (2019). Cooling rate, sorbitan and glyceryl monostearate gelators elicit different microstructural, viscoelastic and textural properties in chia seed oleogels. *Food Research International*, 119, 829-838. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.10.066>

- Vintiloiu, A., Leroux, J.C. (2008). Organogels and their use in drug delivery- A review. *Journal of Controlled Release*, 125, 179-192. <https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2007.09.014>
- Vignoni, L. A., Césari, R. M., Forte, M., Mirábile, M. L. (2006). Determinación de Índice de Color en Ajo Picado. *Información tecnológica*, 17 (6), 63-67. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642006000600011>
- Winkler, J. K., Anderson, J., Felker, F. C., Hwang, H. S., (2019). Physical Properties of Beeswax, Sunflower Wax, and Candelilla Wax Mixtures and Oleogels. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 96, 1125-1142. <https://doi.org/10.1002/aocs.12280>
- Xia, H., Wang, X., Su, W., Jiang, L., Lin, L., Deng, Q., Wang, J., Deng, H., Hu, R., Liao, M., Lv, X., Liang, D. (2020). Changes in the carotenoids profile of two yellow-fleshed kiwifruit cultivars during storage. *Postharvest Biology and Technology*, 164, 111162. <http://doi:10.1016/j.postharvbio.2020.11>
- Yang, Z., McClements, D.J., Xu, Z., Meng, M., Li, C., Chen, L., Qiu, C., Jin, Z. (2022). Carbohydrate-based functional ingredients derived from starch: Current status and future prospects. *Food Hydrocolloids* 131, 107729. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2022.107729>
- Yilmaz, E., Öğütçü, M. (2014a). Comparative Analysis of Olive Oil Organogels Containing Beeswax and Sunflower Wax with Breakfast Margarine. *Journal of Food Science*, 79(9). <https://doi.org/10.1111/1750-3841.12561>
- Yilmaz, E., Öğütçü, M. (2014b). Properties and Stability of Hazelnut Oil Organogels with Beeswax and Monoglyceride. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 91(6), 1007-1017. <https://doi.org/10.1007/s11746-014-2434-1>
- Zhang, R., Zhang, T., Hu, M., Xue, Y, Xue, C. (2021). Effects of oleogels prepared with fish oil and beeswax on the gelation behaviors of protein recovered from Alaska Pollock. *LWT*, 137, 110423. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110423>
- Zheng, H., Mao, L., Cui, M., Liu, J., Gao, Y. (2020). Development of food-grade bigels based on  $\kappa$ -carrageenan hydrogel and monoglyceride oleogels as carriers for  $\beta$ -carotene: Roles of oleogel fraction. *Food Hydrocolloids*, 105, 105855. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.105855>

10. Anexos



Casa abierta al tiempo  
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

ACTA DE EXAMEN DE GRADO

No. 00295  
Matrícula: 2202800504

Formación de bigeles basados en hidrogel de almidón (yuca, camote y chayotextle) y oleogel de cera de abeja para la protección de carotenoides.

En la Ciudad de México, se presentaron a las 10:00 horas del día 7 del mes de julio del año 2022 en la Unidad Iztapalapa de la Universidad Autónoma Metropolitana, los suscritos miembros del jurado:

- DR. EDUARDO JAIME VERNON CARTER
- DRA. MARIA EVA RODRIGUEZ HUEZO
- DRA. NANCY ALONSO CARRILLO
- DR. FRANCISCO CRUZ SOSA



JULIA DE LOS SANTOS TRINIDAD  
ALUMNA

Bajo la Presidencia del primero y con carácter de Secretario el último, se reunieron para proceder al Examen de Grado cuya denominación aparece al margen, para la obtención del grado de:

MAESTRA EN BIOTECNOLOGIA

DE: JULIA DE LOS SANTOS TRINIDAD

y de acuerdo con el artículo 78 fracción III del Reglamento de Estudios Superiores de la Universidad Autónoma Metropolitana, los miembros del jurado resolvieron:

*Aprobar*

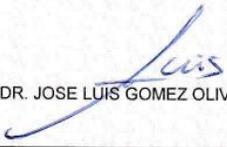
REVISÓ



MTRA. ROSALÍA SERRANO DE LA PAZ  
DIRECTORA DE SISTEMAS ESCOLARES

Acto continuo, el presidente del jurado comunicó a la interesada el resultado de la evaluación y, en caso aprobatorio, le fue tomada la protesta.

DIRECTOR DE LA DIVISIÓN DE CBS



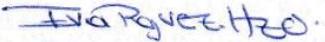
DR. JOSE LUIS GOMEZ OLIVARES

PRESIDENTE



DR. EDUARDO JAIME VERNON CARTER

VOCAL



DRA. MARIA EVA RODRIGUEZ HUEZO

VOCAL



DRA. NANCY ALONSO CARRILLO

SECRETARIO



DR. FRANCISCO CRUZ SOSA