

## Desarrollo de un recubrimiento comestible a base de quinoa y quitosano reforzado con aceites esenciales de hierba limón y canela encapsulados en partículas de sílice mesoporosa

P.I. Bautista-Espinoza\*<sup>1</sup>, P. Di Pierro<sup>2</sup>, S.L. Amaya-Llano<sup>1</sup>, E. Mares-Mares<sup>3</sup>, B.E. García-Almendarez<sup>1</sup>, G. De la Cruz-Velázquez<sup>4</sup> y C. Regalado-González<sup>1</sup>

**1** Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de Química, Centro Universitario, Cerro de las Campanas s/n C.P. 76010, Santiago de Querétaro, Querétaro, México. **2** Università degli Studi di Napoli Federico II, Corso Umberto I, 40, 80138, Naples, Italy. **3** Tecnológico Nacional de México, Carretera Guanajuato-Puentecillas km 10.5, C.P 36242, Guanajuato, Guanajuato, México. **4** Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada, Unidad Querétaro, Cerro Blanco 141, Colinas del Cimatario, C.P. 76090, Santiago de Querétaro, Querétaro, México. \*[pbautista06@alumnos.uaq.mx](mailto:pbautista06@alumnos.uaq.mx).

### RESUMEN

La contaminación por hongos es común en la industria de la panificación y para prevenirla se han usado aditivos alimentarios, los cuales se ha cuestionado recientemente. Los agentes antifúngicos naturales podrían ser una alternativa para evitar el deterioro en el pan, cuando se aplican como parte de un recubrimiento para extender su vida de anaquel. El objetivo del presente trabajo fue diseñar y caracterizar un recubrimiento comestible a base de quitosano (QT), proteína de quinoa (QU) y mezcla de aceites esenciales de canela (CA) y hierba limón (HL) para evaluar su actividad en pan artesanal. Se usó un diseño factorial 2<sup>2</sup> usando la relación QT:QU (1:4 y 1:9 w/w) y los aceites esenciales (1:1 y 1:2 HL:CA v/v). Se determinaron las propiedades fisicoquímicas, mecánicas, estructurales y antifúngicas de los recubrimientos. El tratamiento con relación 1:4 (QT:QU) inhibió al 63% el crecimiento de *Rhizopus stolonifer*, con tamaño de partícula de 2.81±0.13 µm, índice de polidispersión de 0.77±1.4 y potencial ζ de 26.4±1.3 mV. Los tratamientos 1:4 y 1:9 (QT:QU) demostraron propiedades mecánicas similares, aunque el recubrimiento 1:4 demostró tener una estructura más homogénea. Se espera que el recubrimiento comestible diseñado otorgue un impacto positivo en la vida de anaquel del producto.

**Palabras clave:** Recubrimientos comestibles, canela, hierba limón, aceite esencial, quinoa, sílice mesoporosa.

### ABSTRACT

Fungi spoilage is common problem in the bakery industry, which may be prevented by using food additives, but their use has been questioned. Natural antifungal agents could be an alternative to avoid spoilage in bread, when applied as coating to extended its shelf life. The aim of this work was to design and characterize an edible coating based on chitosan (QT), quinoa protein (QU) and a mixture of cinnamon (CA) and lemongrass (HL) essential oils to evaluate its performance on sourdough bread. A 2<sup>2</sup> factorial design using QT:QU ratios of (1:4 and 1:9 w/w) and steam distilled essential oils (1:1 and 1:2 HL:CA, v/v). The physicochemical, mechanical, structural and antifungal properties of the films were evaluated. The treatment at 1:4 ratio (QT:QU) inhibited 63% of the radial growth of *Rhizopus stolonifer*, showed small particle size 2.81±0.13 µm, polydispersity index 0.77±1.4, and ζ potential of 26.4±1.3 mV. Treatments showed similar mechanical properties, the film using 1:4 weight ratio showed more homogeneous structure. It is expected that the designed edible coating provides a positive impact in the product's shelf life.

**Keywords:** Edible coating, cinnamon, lemongrass, essential oil, quinoa, mesoporous silica.

## INTRODUCCIÓN

El pan es un alimento de vital importancia a nivel mundial, consumido en la dieta de millones de personas, por lo cual se ha convertido en una fuente significativa de ingresos, siendo la industria de la panificación una de las más prolíferas (Vargas y Simsek, 2021). No obstante, puede sufrir deterioro principalmente por hongos de las familias *Rhizopus*, *Penicillium* y *Aspergillus* (García y Copetti, 2019), conduciendo a importante desperdicio. Para combatir el desperdicio, se utilizaron durante mucho tiempo conservantes como las sales benzoicas y propiónicas. Sin embargo, las nuevas tendencias de los consumidores apuntan a consumir alimentos cada vez con menos sustancias químicas sintéticas, por lo cual la industria ha iniciado estudios orientados al diseño de matrices de origen natural con propiedades antifúngicas y antimicrobianas para su aplicación en la protección de los alimentos. Los recubrimientos (RC) y películas comestibles (PC) se han presentado como una de las mejores alternativas para la protección de alimentos. Se trata de matrices delgadas, compuestas por polímeros, lípidos o carbohidratos (Galus *et al.*, 2020), las cuales, además de ofrecer protección como barrera a vapor de agua y gases, pueden actuar como vehículo de sustancias antimicrobianas o antifúngicas (Díaz-Montes y Castro-Muñoz, 2021). La principal diferencia entre un RC y una PC es que el primero se aplicará directamente en el alimento, mientras que la segunda es una matriz preformada.

El quitosano es un biopolímero producido por la desacetilación de la quitina, conformado por unidades de  $\beta$ -(1-4)-2-acetamido-D-glucosa y  $\beta$ -(1-4)-2-amino-D-glucosa. Es uno de los biopolímeros más utilizados en la formación de PC y RC, ya que además de otorgar una permeabilidad selectiva a gases ( $\text{CO}_2$  y  $\text{O}_2$ ), tiene buenas propiedades mecánicas y antimicrobianas (Adiletta *et al.*, 2021). No obstante, los RC resultantes de este biopolímero son altamente permeables al agua. La quinoa (*Chenopodium quinoa*) es una semilla nativa de Sudamérica, valorada especialmente por su amplio contenido de proteína y buen balance de aminoácidos. Diversos estudios han demostrado que las PC obtenidas de proteína de quinoa y quitosano demuestran un incremento en las propiedades mecánicas de los mismos.

Los aceites esenciales son un conjunto de sustancias volátiles provenientes de las plantas o semillas, generalmente compuestos de terpenos y compuestos fenólicos. La hierba limón (*Cymbopogon citratus*), también conocida como té, hierba o zacate de limón, es una planta perteneciente a la familia de las *Poaceae*. Su aceite esencial está principalmente compuesto por dos terpenos, geranial y neral (Balti *et al.*, 2018). Se ha intentado explicar las propiedades antifúngicas debido a la capacidad de estos terpenos de atravesar la membrana mitocondrial y provocar alteraciones en el interior de las células (Sattary *et al.*, 2020). Por otro lado, la canela (*Cinnamomum verum*) una especia perteneciente de la familia de las *Lauraceae*, del género *Cinnamomum*, presenta un potencial antimicrobiano y antiinflamatorio.

Las partículas de sílice mesoporosa están formadas por dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ), con un tamaño nanométrico, que contienen una estructura porosa, la cual les sirve para almacenar y liberar sustancias. En las PC, estos compuestos se agregan como vehículos acarreadores de sustancias y para reforzar la red polimérica (Cui *et al.*, 2021). El objetivo del presente trabajo fue diseñar una película comestible a base de quitosano y proteína de quinoa, reforzada con partículas de sílice mesoporosa y aceites esenciales de hierba limón y canela para evaluar su aplicación en un pan.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Materiales

#### Material biológico

*Rhizopus nigricans* (ATCC 6227b); la canela (*Cinnamomum zeylanicum*) (país de origen Sri Lanka) y la hierba limón (*Cymbopogon citratus*) (país de origen México) fueron obtenidas de la Central de Abastos de Irapuato, Guanajuato.

#### Medios de cultivo

Agar bacteriológico, peptona bacteriológica, rosa bengala y caldo papa-dextrosa (CPD) (Bioxon, CDMX, México). El sulfato magnésico, fosfato de potasio, dextrosa, aminopropiltriectoxisilano, hidróxido de sodio, cloranfenicol y tetraetil ortosilicato se obtuvieron de Sigma (St- Louis, MO, EE.UU.). El sulfato de sodio anhidro se adquirió de Hach Company (Loveland, CO, EE.UU.). El bromuro de cetil trimetil amonio (CTAB) se obtuvo de Illinois Tool Works (IL, EE.UU.). El etanol absoluto se obtuvo de J.T. Baker (CDMX, México).

### Métodos

#### Extracción del aceite esencial de hierba limón

El aceite esencial de hierba limón (AEL) se obtuvo por medio de destilación agua vapor utilizando un hidrodestilador UAQ-001 (Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, México). Se usaron 300 g del material fresco en 5 L de agua destilada en un tiempo de 2 h. La capa oleosa del destilado obtenido se secó con sulfato de sodio anhidro. El AEL se esterilizó por filtración usando una unidad Swinnex con membrana de polifluoruro de vinilideno (PVDF) de tamaño de poro de 0.45  $\mu\text{m}$  (Millipore, Burlington, MA, EUA) y se almacenó en viales protegidos de la luz a 4 °C, para su posterior uso (Hernández-Hernández *et al.*, 2014). Para la extracción del aceite esencial de canela primero se sometió a un pretratamiento con un procesador ultrasónico VCX 500 (Sonics Materials, Newtown, CT, USA). Los parámetros del proceso fueron: 100 g de materia prima/L de agua destilada, 70% de amplitud, pulsos de 27:33 s (encendido:apagado) por 10 min. El agua usada en este proceso se usó para la posterior extracción del AE, con 300 g del material sonicado en 5 L de agua destilada, en un tiempo de 3 h, mediante un hidrodestilador (UAQ-001). La capa oleosa del destilado obtenido se secó con sulfato de sodio anhidro. El AEL se esterilizó por filtración usando la unidad Swinnex con membrana de polifluoruro de vinilideno (PVDF) de tamaño de poro de 0.45  $\mu\text{m}$  (Millipore), y se almacenó en viales protegidos de la luz a 4 °C.

#### Síntesis de partículas de sílice mesoporosa (SMP)

Se preparó una solución de 240 mL de agua destilada y 1.75 mL de NaOH 2 N y 0.5 g de CTAB como el agente generador de poros, para dispersar mediante un baño ultrasónico (Baño ultrasónico 8892, VelaQuin, CDMX, México) a temperatura ambiente, durante 5 min. La suspensión se calentó a 80°C en agitación constante (Thermo Fisher Scientific, Waltham, MA, USA) y después se adicionaron 2.5 mL de tetraetil ortosilicato (TeOS) gota a gota por medio de un embudo de separación durante 5 min, después se dejó en agitación continua durante 2 h. El resultante sólido se separó por medio de filtración y se lavó con etanol absoluto, dos veces, después se secó a temperatura ambiente. El polvo resultante se calcinó en una mufla (Thermolyne, Thermo Fisher Scientific, Waltham, MA,

USA) a 500 °C durante 5 h. Para la funcionalización de las partículas, 5.85 mL de 3-aminopropiltrietoxisilano (APTES) se añadieron a 6 mL de etanol absoluto (ETOH). A la solución se le agregaron 0.5 g de partículas y se dejó en agitación toda la noche. La solución después fue filtrada dos veces con etanol absoluto y las partículas recolectadas y secadas a temperatura ambiente (Fernandez-Bats *et al.*, 2018). Una vez sintetizadas y cargadas con aceite, las partículas fueron llevadas a análisis por medio de microscopía electrónica de barrido (SEM).

### **Incorporación de los aceites esenciales a las partículas de sílice mesoporosa (NSM)**

Se agregó una relación 1:1 (p/p) de partículas de sílice mesoporosa (NSM): AEC o NSM:AEL, según correspondiera. Se les agregaron 5 mL de EtOH y se dejaron en agitación en campana de flujo laminar por 12 h. Una vez pasado este tiempo, se recolectaron las partículas y se resguardaron a temperatura ambiente en frascos cerrados hasta su posterior uso (Fernandez-Bats *et al.*, 2018).

### **Obtención del extracto proteico de la harina de quinoa**

Se trituraron las semillas de quinoa con un molino de café Krups (CDMX, México), se colocaron en agua destilada (proporción 1:1 QU-Agua). La suspensión se ajustó a pH 11 en agitación durante una h para solubilizar las proteínas. Se llevó a centrifugación a 3200 rpm durante 20 min a 4°C en una centrífuga Avanti (Beckman, IN, USA). Se recuperó el sobrenadante y se ajustó a pH 4.5 para precipitar la proteína, dejándose en agitación por 30 min, para centrifugar nuevamente (3200 rpm, 20 min, 4°C). Se recuperó la pastilla y se colocó en un horno (Binder, Herrenberg, Alemania) a 50°C para su secado. Se obtuvieron los parámetros de proteína total, humedad y cenizas (AOAC, 1984).

### **Diseño experimental para la elaboración de la solución filmogénica**

Se aplicó un diseño factorial completo 2<sup>2</sup> con tres réplicas y tratamientos aleatorios. Los factores a evaluar fueron la relación QU:QT y de AEC:AEL. Cada factor se evaluó en dos niveles, proporción de QU:QT de 1:4 y 1:9 (p/p) y el efecto de las mezclas de AEL:AEC (1:1 y 2:1 v/v) (tabla 1) (Quiroz, 2021).

**Tabla 1.** Factores y niveles de la solución filmogénica.

Factor	Niveles	
Proteína de quinoa: quitosano	4:1	9:1
Aceite esencial de canela: aceite esencial de hierba limón	1:1	2:1

### **Preparación de las soluciones filmogénicas**

Las soluciones filmogénicas se realizaron en una proporción 4:1 y 9:1 QU:Qt respectivamente. La solución de QT se preparó al 1%, añadiendo ácido láctico al 0.5% (v/v) y agua destilada. La solución de QU se preparó con agua destilada, ajustando el pH a 11 durante una hora en agitación constante. Se incorporó el quitosano y se ajustó el pH a 4, dejando la solución en agitación por 30 min. Posteriormente se les añadió la emulsión de aceites esenciales o las partículas de sílice mesoporosa cargadas según fuera el tratamiento y se sellaron con glicerol como plastificante. Todas las soluciones fueron homogeneizadas durante 2 min a 9500 rpm y 1 min a 6500 rpm en un homogeneizador de alta velocidad IKA T25-ULTRA-TURRAX (Wilmington, DW, EE.UU.). Después de la homogenización,

se redujo el tamaño de partícula por medio de un sonicador de alta intensidad Sonics (CN, USA), con una sonda de 3 mm de diámetro Vibra-Cell VCX 500 (Newtown, CT, USA). Se sonicó durante dos periodos de 1.5 min a una amplitud de 70%, utilizando un baño de hielo para evitar el aumento de la temperatura. Para finalizar, se utilizó el método de vertido (casting) de las soluciones filmogénicas para la formación de las películas comestibles (Quiroz, 2021), en placas Petri y se secaron 12 h a 30°C.

### **Determinación de las propiedades de los recubrimientos**

#### **Espesor**

El espesor se midió con un micrómetro digital Mitutoyo (Kanagawa, Japón). Se realizaron 10 mediciones de manera aleatoria en cada película, se calculó el promedio de las mediciones para calcular el espesor de las películas (Giosafatto *et al.*, 2014).

#### **Solubilidad**

Las películas comestibles se llevaron a peso constante secando a 60°C por 24 h, luego se pesaron y se colocaron en tubos Falcon junto con 50 mL de agua destilada. Se colocaron en una incubadora con agitador orbital a 25°C durante 24 h. Después, fueron filtradas con papel filtro, secadas a 60°C por 24 h (Vahedikia *et al.*, 2019). La solubilidad fue calculada de la siguiente manera (ec 1):

$$\text{Solubilidad \%} = \frac{(\text{Peso seco inicial de la PC} - \text{Peso seco final de la PC})}{\text{Peso seco inicial de la PC}} \times 100 \quad (1)$$

#### **Potencial $\zeta$ , tamaño de partícula e índice de polidispersión**

El tamaño de partícula, índice de polidispersión y potencial  $\zeta$  de las soluciones filmogénicas fueron medidas con un Zetasizer Nano ZS (ZEN 3600 Malvern Instruments, Worcestershire, Reino Unido). Cada medición se realizó por triplicado en cada muestra (1 mL por muestra). Todas las mediciones se realizaron por triplicado, aplicando un voltaje de 200 mV. El potencial  $\zeta$  se calculó utilizando la ecuación de Henry y Smoluchowski (Duca *et al.*, 2019).

#### **Color y opacidad**

Se usó un colorímetro portátil NR60CP (Shenzen, China). Los parámetros evaluados fueron la luminosidad ( $L^*$  blanco a negro), el espectro verde a rojo ( $a^*$ ) y el espectro amarillo a azul ( $b^*$ ). El equipo fue calibrado en fondo negro y blanco y se tomaron como mediciones 10 puntos de cada película (Quiroz, 2021). Para calcular el valor de opacidad, se hicieron mediciones del parámetro  $L^*$  en fondo negro y blanco. El valor de opacidad se calculó según la ec. (2) (Cecchini *et al.*, 2017):

$$\text{Opacidad} = \frac{L^*(\text{Fondo negro})}{L^*(\text{fondo blanco})} \times 100 \quad (2)$$

#### **Microscopía electrónica de barrido (SEM) de las PC**

Las películas fueron cubiertas con una capa fina de oro y se analizaron en un microscopio electrónico de barrido EVO-50 (Carl Zeiss UltraPlus, Alemania) para analizar su microestructura superficial (Arredondo *et al.*, 2016). Se tomaron microfotografías de diferentes secciones a 10,000, 5,000 y 2,500 aumentos.

### Actividad antifúngica de las películas contra *Rhizopus stolonifer*

Se determinó la actividad antifúngica de las películas comestibles por medio del cálculo del índice de inhibición antifúngica (Olicón-Hernández *et al.*, 2019). Se creció *Rhizopus stolonifer* en placas de agar PDA por 72 h. Después de este tiempo, círculos de aproximadamente 1 cm<sup>2</sup> de diámetro fueron cortadas de la placa con el hongo ya esporulado. Se colocaron las películas sobre nuevas placas de agar y se inocularon con los círculos de agar en el centro de la película. El índice antifúngico se calculó usando la ec. (3):

$$\text{Índice Antifúngico (\%)} = \left(1 - \frac{Da}{Db}\right) \times 100 \quad (3)$$

### Permeabilidad al vapor de agua

La permeabilidad al vapor de agua de las películas se determinó siguiendo el método estándar ASTM E96-00 conocido como el método de la copa. Las muestras fueron cortadas en forma circular con un diámetro de 41 mm. Para realizar el análisis, se llenó parcialmente con agua destilada la celda de permeabilidad, se colocó la muestra circular y la celda fue sellada utilizando su tapadera horadada colocando la película entre empaques de silicón. El área total para la transferencia de vapor de agua fue de 0.00090 m<sup>2</sup>. Posteriormente la celda conteniendo la película se introdujo en la cámara de permeabilidad con control de temperatura, la cual se mantuvo a 30 °C. Para mantener un gradiente de humedad relativa a través de la película, dentro de la cámara de permeabilidad se colocó sílica gel (previamente desecada). La pérdida de peso se determinó gravimétricamente durante un lapso de 12 h.

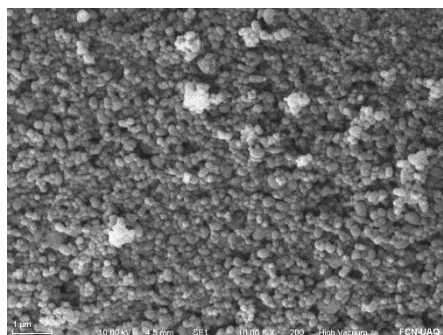
## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Extracción del aceite esencial de hierba limón y de canela

Para el aceite esencial de hierba limón, se obtuvo un rendimiento de 1.09% ± 0.10, un rendimiento menor al reportado por Kumoro *et al.*, (2021) que reportan rendimientos del 1.5%. Para el AEC, el rendimiento fue de 1.33% ± 0.01. Ambos valores corresponden a lo reportado por Xi *et al.*, (2020) quienes reportan que el rendimiento general de los aceites esenciales es menor al 5% del peso total de la materia prima.

### Síntesis de las partículas de sílice mesoporosa (PSM)

Con un rendimiento de 90.8%, las partículas de sílice mesoporosa se formaron, observándose como un polvo blanco. La micrografía de SEM (Fig 1) muestra que la morfología de las partículas es circular, con tamaños entre 120 y 180 nm.



**Figura 1.** Partículas de sílice mesoporosa encapsulada.

### **Incorporación de los aceites esenciales a las partículas de sílice mesoporosa**

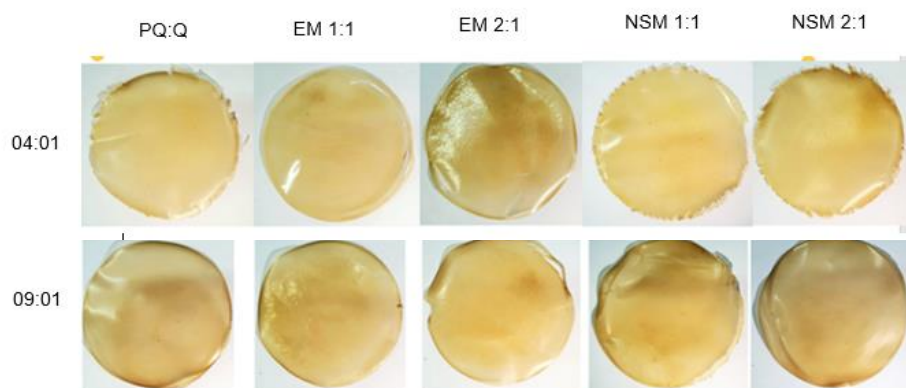
La incorporación de los aceites esenciales cambió el color de las partículas de blanco a amarillo oscuro (para canela) y amarillo pálido (para hierba limón) (Fig 2).



**Figura 2.** Partículas de sílice mesoporosa cargados con aceites esenciales.

### **Obtención de las soluciones filmogénicas**

Se obtuvieron 10 películas (Fig. 3), de color amarillo pálido, observándose que las películas con emulsión de AE y con nanopartículas presentan tonalidades un poco más oscuras que las películas que solo tienen QT y proteína de QU.



**Figura 3.** Películas comestibles obtenidas.

## Caracterización de las soluciones filmogénicas

### Espesor

Se observó una diferencia significativa en las películas que son adicionadas con partículas de sílice mesoporosa (grosor de 30 a 60  $\mu\text{m}$ ) comparadas con las que no tienen partículas (espesor de 100 a 180  $\mu\text{m}$ ). Los cambios en el espesor podrían deberse a una interacción entre los biopolímeros y las partículas (Ghiasi *et al.*, 2020).

### Solubilidad

Los valores de solubilidad obtenidos oscilan entre 50 y 80%, indicando que los tratamientos tienen una estabilidad intermedia en su matriz de polímeros. La solubilidad disminuyó a medida que se integraban los AE (Fig. 4), lo cual parece confirmar que las NSM refuerzan la red de polímeros disminuyendo su solubilidad en agua.

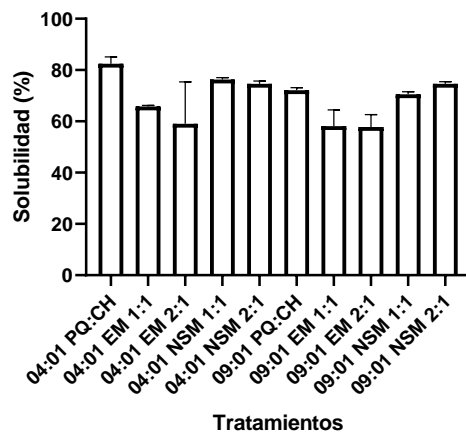


Figura 4. Solubilidad de los tratamientos.

### Color y opacidad

Los valores de los tratamientos 9:1 fueron ligeramente más altos en el caso de la luminosidad ( $L^*$ ), y más bajos en los valores  $a^*$  y  $b^*$ . La relación de luminosidad con el aumento de tonalidad podría deberse al incremento de sólidos totales en las PC. Todas demostraron valores de opacidad de menos del 50%. La diferencia encontrada entre tratamientos fue en las películas a las que les fueron añadidas las NSM, ya que aquellas con la formulación 4:1 mostraron valores de 36 y 43%, mientras que la formulación 9:1 tuvo valores de 27 a 29%.

### Potencial $\zeta$ , índice de polidispersión y tamaño de partícula

En las soluciones filmogénicas, todos los tratamientos exhibieron valores cercanos a 1, indicando que todas las soluciones son muy polidispersas. Las soluciones filmogénicas que reportaron mayores tamaños de partícula fueron aquellas que estaban adicionadas con emulsiones. Para el potencial  $\zeta$  las soluciones filmogénicas tuvieron todos valores arriba de 10 mV, salvo los tratamientos 9:1 EM 2:1 (QU:QT; AEL:AEC) y 09:01 NSM 1:1 (Tabla 1).



**Tabla 1.** Potencial  $\zeta$ , índice de polidispersión y tamaño de partícula de los tratamientos.

Tratamiento	Tamaño de partícula (d.nm)	Índice de polidispersión (PI)	Potencial $\zeta$ (mV)
04:01 PQ:CH	2810.67 ± 139.15 <sup>a</sup>	0.790 ± 0.07 <sup>a</sup>	41.20 ± 6.51 <sup>a</sup>
04:01 EM 1:1	3889.00 ± 319.01 <sup>a</sup>	0.774 ± 0.11 <sup>a</sup>	39.93 ± 4.37 <sup>a</sup>
04:01 EM 2:1	4992328.67 ± 8632256.59 <sup>b</sup>	0.875 ± 0.21 <sup>a</sup>	23.75 ± 3.44 <sup>b</sup>
04:01 NSM 1:1	2103.67 ± 443.04 <sup>a</sup>	0.772 ± 0.28 <sup>a</sup>	31.30 ± 3.14 <sup>ab</sup>
04:01 NSM 2:1	1626.67 ± 108.42 <sup>c</sup>	0.991 ± 0.01 <sup>a</sup>	26.37 ± 1.28 <sup>b</sup>
09:01 PQ:CH	1920.67 ± 406.74 <sup>ac</sup>	0.840 ± 0.13 <sup>a</sup>	27.17 ± 1.20 <sup>ab</sup>
09:01 EM 1:1	2755.33 ± 126.06 <sup>a</sup>	1.000 ± 0.00 <sup>a</sup>	22.13 ± 4.60 <sup>b</sup>
09:01 EM 2:1	22353333.33 ± 5582296.42 <sup>d</sup>	0.736 ± 0.22 <sup>a</sup>	3.83 ± 1.54 <sup>c</sup>
09:01 NSM 1:1	7751.67 ± 2031.78 <sup>c</sup>	1.000 ± 0.00 <sup>a</sup>	8.61 ± 1.04 <sup>c</sup>
09:01 NSM 2:1	1937.67 ± 82.00 <sup>ac</sup>	1.000 ± 0.00 <sup>a</sup>	21.47 ± 3.00 <sup>ab</sup>

### Propiedades mecánicas

Los valores de resistencia a la tensión variaron entre 4 y 28 MPa. Se ha reportado que las NSM refuerzan la estructura de la red de polímeros, aumentando así las propiedades mecánicas. Los valores de porcentaje de elongación dieron como resultado valores de 15 y 24%. El módulo de Young dio valores altos, lo cual indica una alta flexibilidad las muestras (Tabla 2).

**Tabla 2.** Propiedades mecánicas de los recubrimientos.

Tratamiento	Resistencia a la tensión (Mpa)	Elongación (%E)	Módulo de Young (Mpa)
04:01 PQ:CH	5.833 ± 0.487 <sup>a</sup>	2.257 ± 0.436 <sup>a</sup>	400.752 ± 0.552 <sup>a</sup>
04:01 EM 1:1	8.072 ± 0.079 <sup>b</sup>	24.671 ± 0.090 <sup>b</sup>	141.770 ± 0.351 <sup>b</sup>
04:01 EM 2:1	6.627 ± 0.065 <sup>c</sup>	15.794 ± 0.242 <sup>c</sup>	214.963 ± 0.496 <sup>c</sup>
04:01 NSM 1:1	9.746 ± 0.285 <sup>d</sup>	10.105 ± 0.078 <sup>d</sup>	332.603 ± 0.084 <sup>d</sup>
04:01 NSM 2:1	28.76 ± 0.070 <sup>e</sup>	15.918 ± 0.135 <sup>c</sup>	722.482 ± 0.076 <sup>e</sup>
09:01 PQ:CH	4.871 ± 0.060 <sup>a</sup>	21.089 ± 0.020 <sup>e</sup>	134.555 ± 0.136 <sup>f</sup>

09:01 EM 1:1	6.148 ± 0.012 <sup>c</sup>	16.581 ± 0.090 <sup>c</sup>	195.909 ± 0.078 <sup>g</sup>
09:01 EM 2:1	5.114 ± 0.064 <sup>a</sup>	14.387 ± 0.299 <sup>c</sup>	165.321 ± 2.343 <sup>h</sup>
09:01 NSM 1:1	7.834 ± 0.154 <sup>b</sup>	6.264 ± 0.054 <sup>a</sup>	393.975 ± 4.922 <sup>i</sup>
09:01 NSM 2:1	6.895 ± 0.100 <sup>c</sup>	14.548 ± 0.009 <sup>c</sup>	187.156 ± 0.665 <sup>j</sup>

### Actividad antifúngica de las películas diseñadas contra *Rhizopus stolonifer*

Se mostraron diferencias estadísticamente significativas entre ambos tratamientos. Los tratamientos con relación 4:1 (QU:QT) fueron los que demostraron mayores índices antifúngicos (de 18 a 98%), mientras que los tratamientos de relación 9:1 mostraron valores del 0 al 60%. En ambos tratamientos se observa un aumento en la actividad cuando se integran los aceites esenciales, lo cual parece indicar que la mezcla de aceites esenciales ofrece protección contra el hongo en conjunto con el QT y la proteína QU. Las películas con mayor actividad reportada fueron aquellas donde se agregó el aceite esencial emulsificado. Por otro lado, el aceite encapsulado en partículas de sílice mesoporosa demostró valores menores comparados con el aceite emulsificado, sin embargo, esto podría deberse a que las NSM liberan su carga de una manera más lenta.

### CONCLUSIÓN

Se realizó con éxito la formulación de los recubrimientos comestibles. Se eligió la formulación 4:1 QU:QT adicionadas de aceites esenciales encapsuladas en NSM, por sus altas capacidades antifúngicas así como por las propiedades mecánicas y de solubilidad que demostró. Se espera que este recubrimiento tenga un impacto positivo en la vida de anaquel de un producto de panificación.

### BIBLIOGRAFÍA

- Adiletta, G., Di Matteo, M., & Petriccione, M. (2021). Multifunctional role of chitosan edible coatings on antioxidant systems in fruit crops: a review. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(5), 2633.
- Balti, M. A., Hadrich, B., Kriaa, K., & Kechaou, N. (2018). Lab-scale extraction of essential oils from Tunisian lemongrass (*Cymbopogon flexuosus*). *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, 124, 164-173.
- Dhumal, C. V., & Sarkar, P. (2018). Composite edible films and coatings from food-grade biopolymers. *Journal of Food Science and Technology*, 55(11), 4369-4383.
- Díaz-Montes, E., & Castro-Muñoz, R. (2021). Edible films and coatings as food-quality preservers: An overview. *Foods*, 10(2), 249.
- El Sawi, S. A., Ibrahim, M. E., El-Rokiek, K. G., & El-Din, S. A. S. (2019). Allelopathic potential of essential oils isolated from peels of three citrus species. *Annals of Agricultural Sciences*, 64(1), 89-94.
- Escamilla-García, M., Delgado-Sánchez, L. F., Ríos-Romo, R. A., García-Almendárez, B. E., Calderón-Domínguez, G., Méndez-Méndez, J. V., & Regalado-González, C. (2019). Effect of transglutaminase cross-linking in protein isolates from a mixture of two quinoa varieties with chitosan on the physicochemical properties of edible films. *Coatings*, 9(11), 736.

- Galus, S., Arik Kibar, E. A., Gniewosz, M., & Kraśniewska, K. (2020). Novel materials in the preparation of edible films and coatings—A review. *Coatings*, *10*(7), 674.
- Garcia, M. V., & Copetti, M. V. (2019). Alternative methods for mould spoilage control in bread and bakery products. *International Food Research Journal*, *26*(3), 737-749.