

CLASE 1. Introducción al curso

Propiedades físicas de los alimentos

10/03/2025 – Mariana Rodríguez – marianarod@fing.edu.uy

Agenda

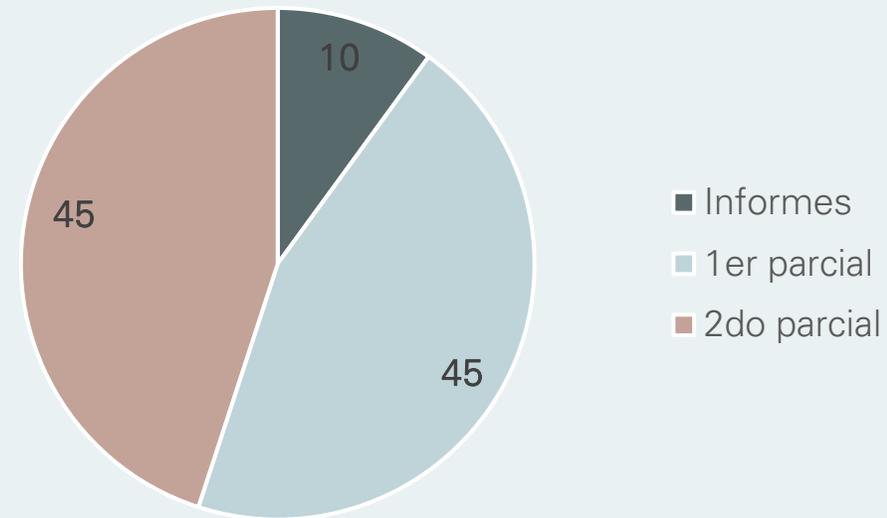
- Descripción del curso
- Información práctica
- Presentación
- Introducción a las propiedades físicas de los alimentos
- Propiedades de superficie: repaso.

Curso: Propiedades físicas de los alimentos

- Dirigido a:
 - Estudiantes de ingeniería en alimentos (grado).
 - Estudiantes de posgrado en alimentos, ingeniería de procesos y/o química (posgrado).
 - Profesionales de la industria alimentaria o de procesos (educación permanente).
- Docentes del curso:
 - Responsable del curso: Dra. Mariana Rodríguez (FIng-Udelar).
 - Dra. Eliana Budelli (FIng-Udelar).
 - Dr. Germán Ayala-Valencia (EQA-UFSC).
- Créditos: 5, 36 horas presenciales.
- Horarios y modalidad:
 - Teóricos: lunes de 18 a 20 hs por zoom.
 - Prácticos: **2 días a definir** de 18 a 20 hs en el Laboratorio del Instituto de Ingeniería Química – Facultad de Ingeniería.

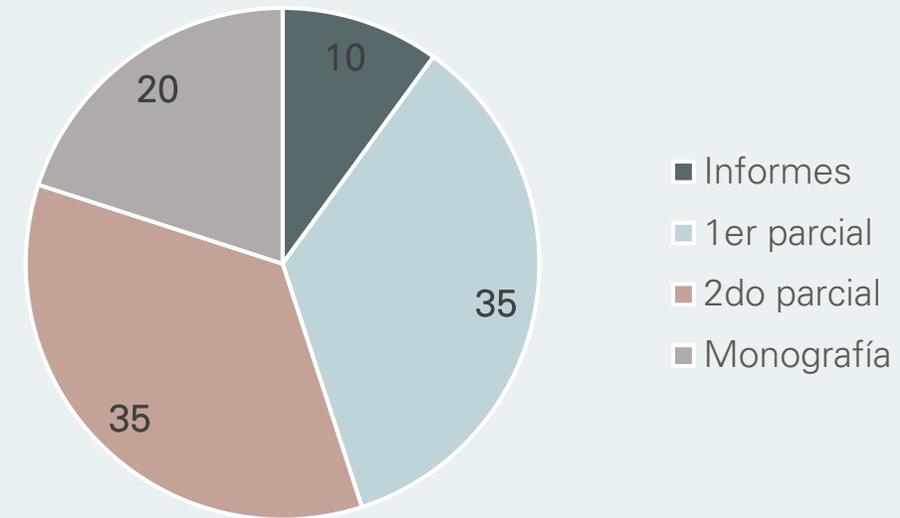
Evaluación y aprobación para estudiantes de grado

- **Aprobación:** 100% de asistencia a prácticas de laboratorio y 60/100 puntos compuestos de:
 - Informes de prácticas de laboratorio (5 puntos cada informe).
 - Primer parcial (45 puntos)
 - Segundo parcial (45 puntos)
- Estudiantes que no asistan a las 2 clases prácticas y obtengan menos de 40 puntos: no aprueban el curso.
- Estudiantes con 100% de asistencia a los prácticos y obtengan entre 40 y 60 puntos: podrán aprobar el curso entregando una monografía sobre un tema definido por el docente, que sea calificada con al menos 60%.
- No hay examen.



Evaluación y aprobación para estudiantes de posgrado

- **Aprobación:** 100% de asistencia a prácticas de laboratorio y 60/100 puntos compuestos de:
 - Informes de prácticas de laboratorio (5 puntos cada informe).
 - Primer parcial (35 puntos)
 - Segundo parcial (35 puntos)
 - Monografía (20 puntos)
- No hay examen.



Temario del curso

- **Introducción.** Descripción del curso: temario, cronograma, metodología de enseñanza, evaluación. Definiciones. Importancia de las propiedades físicas de alimentos en su formulación, producción y vida útil.
- **Propiedades morfológicas y geométricas.** Forma, tamaño, volumen, densidad, porosidad. Definiciones, métodos de medida, aplicaciones prácticas.
- **Propiedades ópticas.** Refracción: definiciones y aplicaciones prácticas. Color: definición, luz, percepción del color, cuantificación en sistema L, a, b, aplicaciones. Brillo. Infrarrojo cercano (NIR), luz ultravioleta (UV), definiciones, métodos de medida, aplicaciones prácticas.
- **Propiedades mecánicas.** Deformación elástica, plástica y viscosa. Textura. Propiedades reológicas de alimentos.
- **Propiedades de polvos.** Propiedades físicas de las partículas: distribución de tamaño de partícula, forma, densidad (verdadera, aparente, efectiva), área superficial. Propiedades físicas de sólidos a granel: densidad (aireada, aparente, compactada), porosidad, relación de Hausner, compresibilidad. Propiedades de fuerza, rotura y desgaste de partículas, friabilidad. Propiedades reológicas de polvos (propiedades de falla, clasificación de tipos de polvos). Propiedades de rehidratación (humectabilidad, hundibilidad, dispersabilidad, solubilidad).
- **Propiedades térmicas.** Conductividad térmica. Calor específico. Entalpía y calor latente. Difusividad térmica. Valor calórico de los alimentos.
- **Actividad de agua e isothermas de sorción.** Concepto y factores que afectan la a_w . Contenido de humedad. Higroscopicidad. Concepto de isoterma de sorción, tipos de isothermas, histéresis, modelos.
- **Transiciones de fase.** Conceptos generales. Transiciones de primer y segundo orden. Transición vítrea. Entalpía de relajación. Determinación experimental. Cambios en las propiedades físicas durante la transición vítrea.
- **Propiedades eléctricas, magnéticas y acústicas.** Propiedades eléctricas. Conductividad eléctrica. Calentamiento óhmico, pulsos eléctricos. Propiedades magnéticas. Propiedades electromagnéticas. Microondas. Propiedades acústicas. Ultrasonido.

Cronograma del curso

Semana	Fecha	Tema	Docente	Práctica
1	10/03/2025	Presentación del curso. Introducción.	Mariana Rodríguez	--
2	17/03/2025	Propiedades mecánicas.	Eliana Budelli	
3	24/03/2025	Propiedades mecánicas.	Eliana Budelli	25 o 28/3
4	31/03/2025	Propiedades de polvos	Mariana Rodríguez	
5	07/04/2025	Propiedades de polvos	Mariana Rodríguez	8 u 11/4
6	14/04/2025	SEMANA DE TURISMO		
7	21/04/2025	Propiedades morfológicas y geométricas	Mariana Rodríguez	--
8	28/04/2025	Clase de consulta	Mariana Rodríguez	
9		Primer parcial (fecha a confirmar)		
10	12/05/2025	Propiedades ópticas	Mariana Rodríguez	
11	19/05/2025	Propiedades térmicas	Mariana Rodríguez	
12	26/05/2025	Actividad de agua e isothermas de sorción	Mariana Rodríguez	
13	02/06/2025	Transiciones de fase	Germán Ayala- Valencia	
14	09/06/2025	Transiciones de fase	Germán Ayala- Valencia	
15	16/06/2025	Propiedades eléctricas, magnéticas y acústicas	Mariana Rodríguez	
16	23/06/2025	Clase de consulta	Mariana Rodríguez	
17		Segundo parcial (fecha a confirmar)		

Bibliografía

- Berk, Z. (2018). Food Process Engineering and Technology, 3rd ed. Academic Press, London.
- Sahin, S.; Gülüm Sumnu, S. (2006). Physical properties of foods. Springer, New York.
- Figura, L.O.; Teixeira, A.A. (2007). Food Physics: Physical properties- Measurement and Applications. Springer, Berlin.
- Arana, I. (2012). Physical properties of foods. CRC Press, Boca Raton.
- Barbosa-Cánovas, G.V.; Ortega-Rivas, E.; Juliano, P.; Yan, H. (2005). Food Powders. Physical Properties, Processing, and Functionality. Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York.
- Barbosa-Cánovas, G.V.; Fontana, A.J.J.; Schmidt, S.J.; Labuza, T.P. (2020). Water activity in foods. Fundamentals and applications., 2nd ed. John Wiley & Sons, Inc. and the Institute of Food Technologists, Chicago.
- Martínez Navarrete, N.; Andrés Grau, A.M.; Chiralt Boix, A.; Fito Maupoey, P. (1999). Termodinámica y cinética de sistemas alimento entorno. Instituto Politécnico Nacional, México D.F.
- Schulze, D. (2008). Powders and Bulk Solids. Springer, Berlin.
- Schuck, P.; Dolivet, A.; Jeantet, R. (2012). Analytical Methods for Food and Dairy Powders. John Wiley & Sons, Ltd., West Sussex.
- Bhandari, B.; Bansal, N.; Zhang, M.; Schuck, P. (2013). Handbook of food powders. Processes and properties. Woodhead Publishing Ltd, Cambridge.
- Singh, P.R.; Heldman, D.R. (2014). Introduction to Food Engineering, 5th ed. Academic Press, London.

Presentaciones

Introducción a las propiedades físicas de los alimentos

¿Qué son las propiedades físicas de los alimentos?

“Aquellas propiedades que se prestan a la descripción y cuantificación mediante métodos físicos más que químicos” (Szczesniak, 1983)

¿Ejemplos?

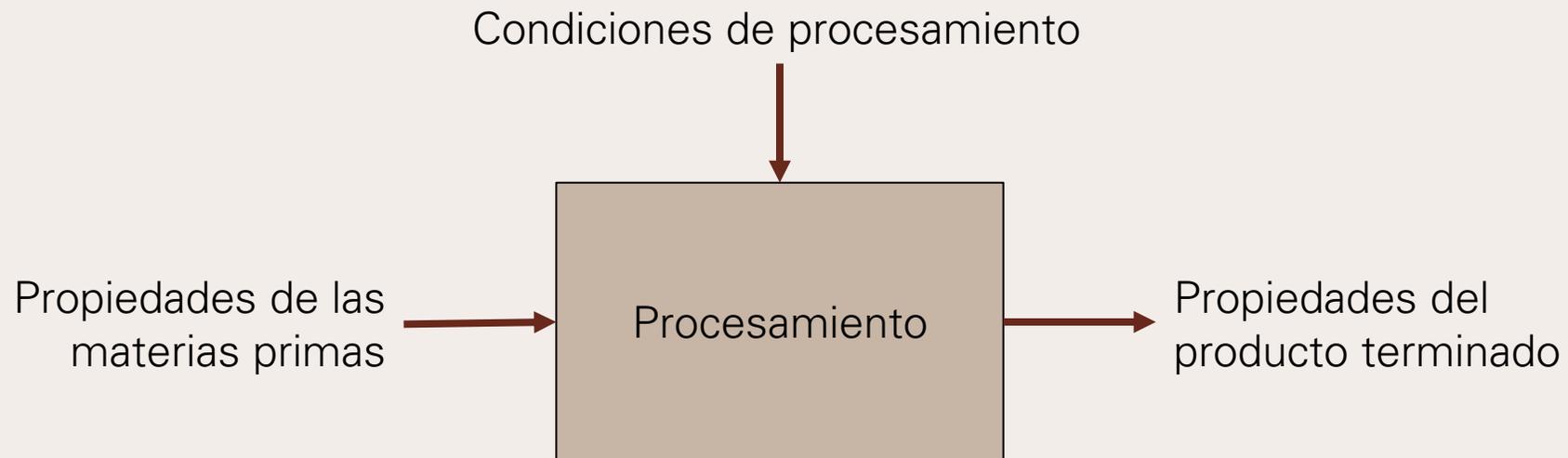
- Tamaño, forma, color y densidad.
- Textura.
- Viscosidad.
- Humectabilidad.
- Conductividad eléctrica.
- Actividad de agua.
- Conductividad térmica.
- Transición vítrea.

¿Por qué estudiar las propiedades físicas de los alimentos?

- Muchas de las características que definen la calidad de un alimento (textura, estructura, apariencia) y estabilidad de un producto alimenticio están vinculadas con sus propiedades físicas.
- La cuantificación de muchas propiedades físicas (conductividad térmica, densidad, viscosidad, calor específico, etc.) es esencial para desarrollar y operar procesos.
- La cuantificación de estas propiedades también es esencial para predecir la respuesta de los alimentos a su procesamiento, distribución y almacenamiento.

¿Por qué estudiar las propiedades físicas de los alimentos?

- Entender las propiedades físicas (y no sólo físicas) de los alimentos es esencial para científicos e ingenieros en alimentos para poder resolver problemas durante la formulación, procesamiento y almacenamiento de los alimentos.



¿Por qué estudiar las propiedades físicas de los alimentos?

- El conocimiento sobre estas propiedades es fundamental para:
 - Diseño y simulación de procesos.
 - Modificación y actualización de procesos, una vez que la planta está en marcha.
 - Control de calidad.
 - Diseño de envases.

Propiedades de superficie - repaso

Superficies e interfases

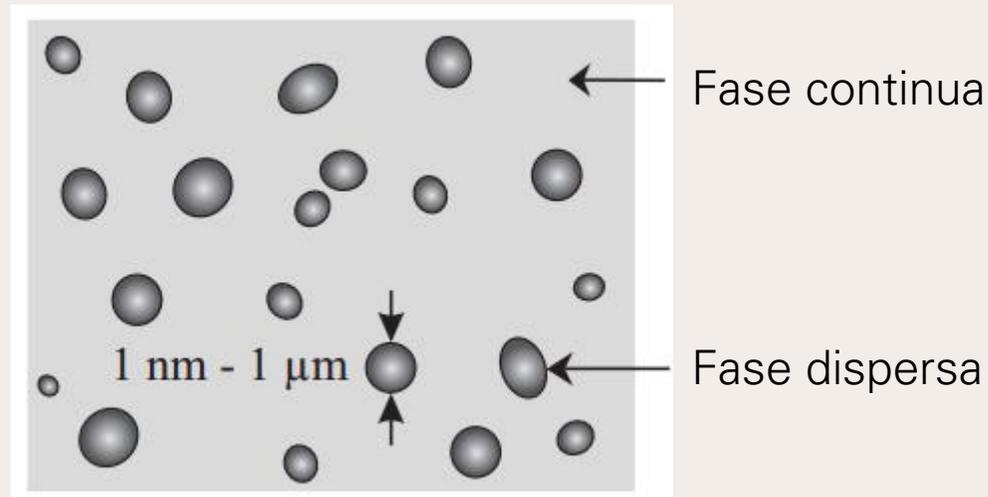
- Una interfase es un área que separa dos fases.

Si consideramos fase sólida, líquida y gaseosa, hay 3 combinaciones posibles: sólido-líquido, sólido-gas y líquido-gas. Son superficies.

- Las interfases también pueden separar dos líquidos inmiscibles (líquido-líquido) o dos sólidos inmiscibles (sólido-sólido).

Coloides

- Sistemas dispersos.
- Una fase dispersa (1 nm a 1 μm) en otra fase continua.



Butt, Graf & Kappl (2003).

Sistemas coloidales en alimentos

- Se clasifican de acuerdo al estado de la materia de sus fases.

Fase continua	Fase dispersa	Sistema	Ejemplos
Gas	Líquido	Aerosol	Rocío vegetal
	Sólido	Aerosol	Humo
Líquido	Gas	Espuma	Crema batida, merengue
	Líquido	Emulsión	Leche, mayonesa
	Sólido	Sol	Salsas, leche descremada
Sólido	Gas	Espuma sólida	Soufflé
	Líquido	Gel	Gelatina
	Sólido	Suspensión sólida	Chocolate

Superficies líquidas

Tensión superficial

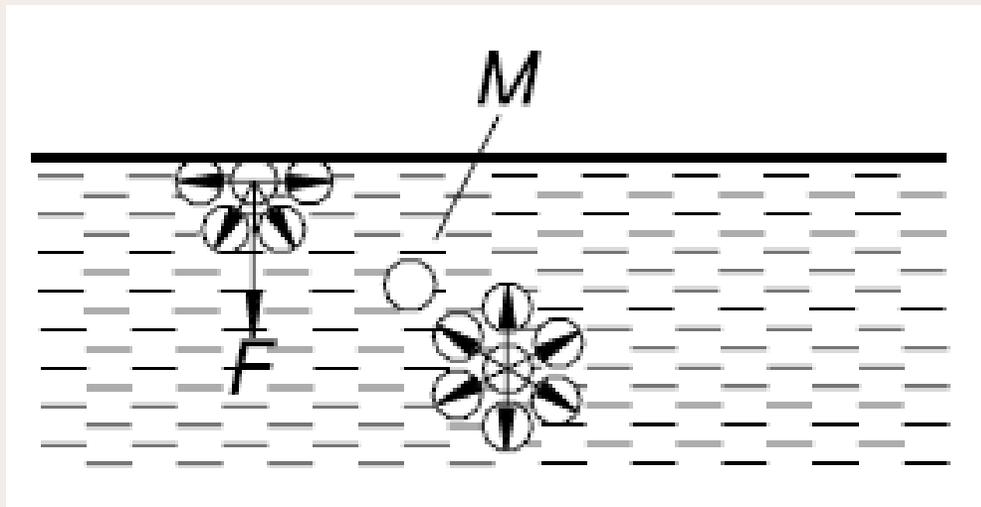
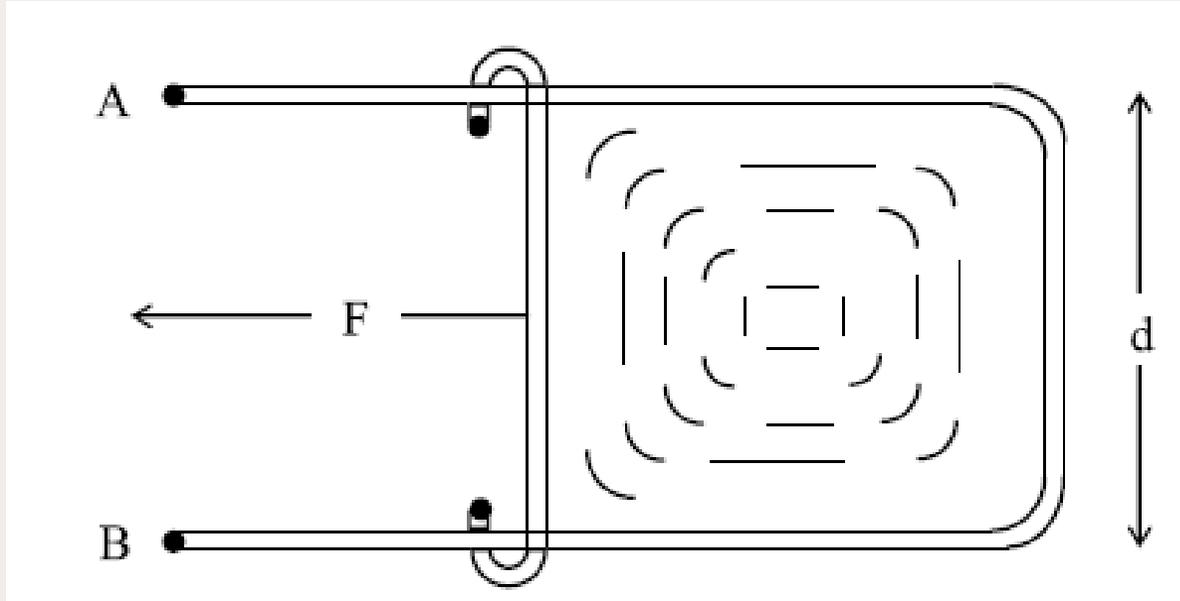


Figura &Teixeira (2007).

- La fuerza neta actuando sobre la molécula M en el interior es 0.
- En las moléculas de la superficie la fuerza neta $\neq 0$.
- Las moléculas de la interfase tiene mayor energía libre que las del interior del material. Los materiales líquidos adoptan forma esférica porque minimiza el área superficial.
- Para alterar las condiciones de la interfase hay que aplicar trabajo o energía (ej. hacer una emulsión o espuma).

Tensión superficial (γ)



La tensión superficial se expresa como la energía libre por área superficial o trabajo requerido para extender una superficie en condiciones isotérmicas.

Sahin & Samnu (2006).

$$\gamma [N/m] = \frac{\text{Trabajo aplicado}}{\text{Área aumentada}} = \frac{FL}{2Ld} = \frac{F}{2d}$$

Tensión superficial (γ)

Líquido	γ (mN/m) a 20°C
Agua	72,75
Leche	42,3-52,1
Leche descremada	52,7
Crema	45,5
Aceite de oliva	33,0
Aceite de girasol	33,5
Vino Chardonnay (10,8% etanol)	46,9
Vino Chardonnay diluido (2,7% etanol)	60,9

Ecuación de Laplace

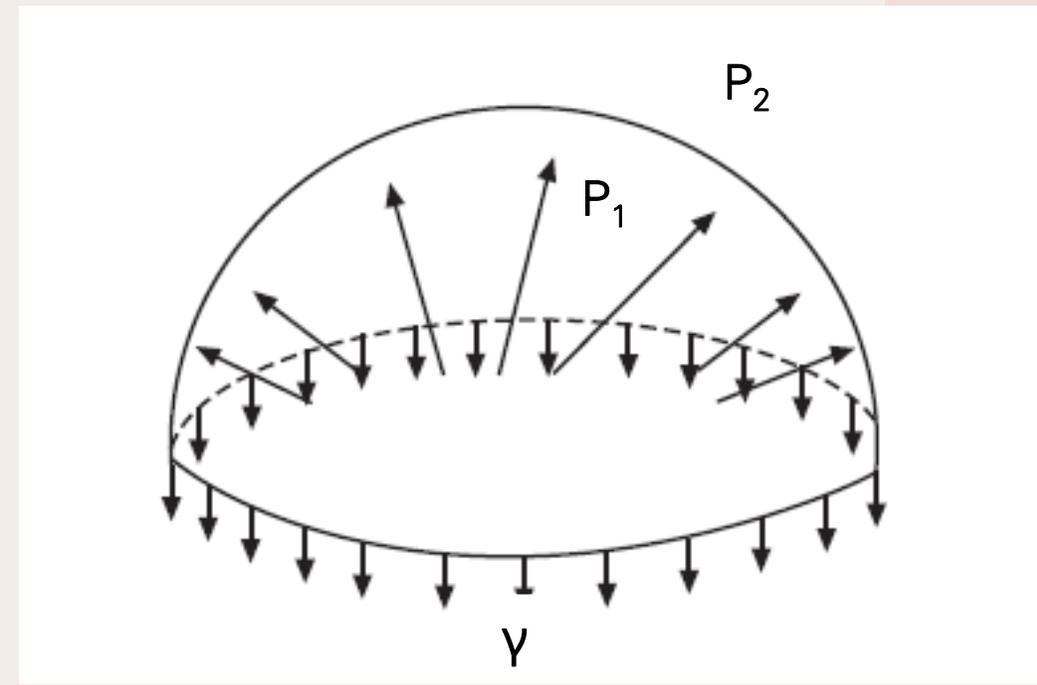
Fuerza debida a la diferencia de presión entre el interior de la gota y el vapor de afuera:

$$F = (P_1 - P_2)\pi r^2$$

Fuerza debida a la tensión superficial:

$$\gamma = \frac{Fr}{2\pi r^2} \rightarrow F = \gamma 2\pi r$$

En equilibrio: $\Delta P = \frac{2\gamma}{r}$



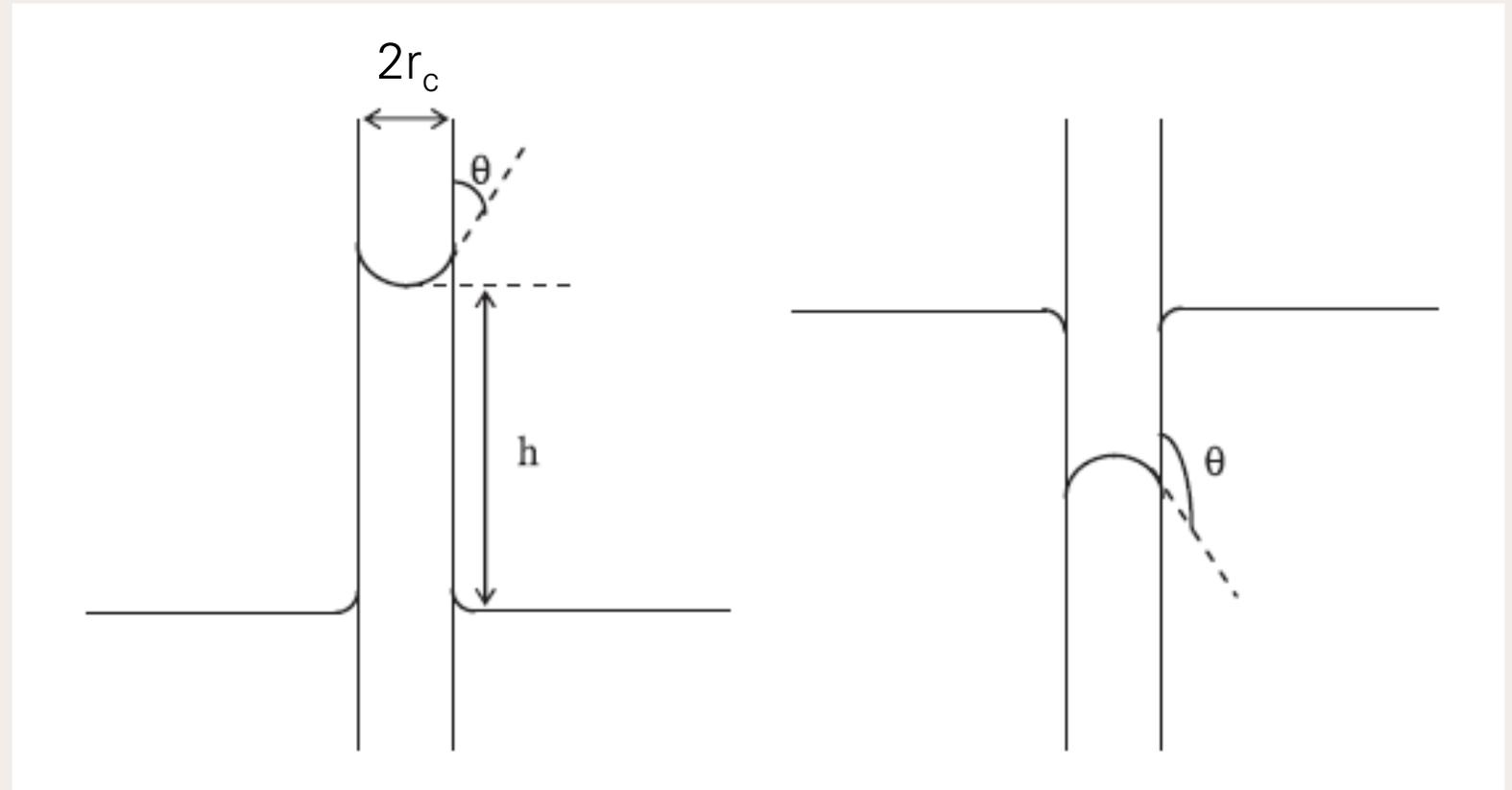
Sahin & Samnu (2006).

Ecuación de Laplace en capilares

- Al sumergir un capilar verticalmente en un líquido, el líquido va subir o bajar por el capilar, dependiendo del ángulo de contacto del líquido con la pared.

$\theta < 90^\circ$: asciende

$\theta > 90^\circ$: desciende



Sahin & Samnu (2006).

Ecuación de Laplace en capilares

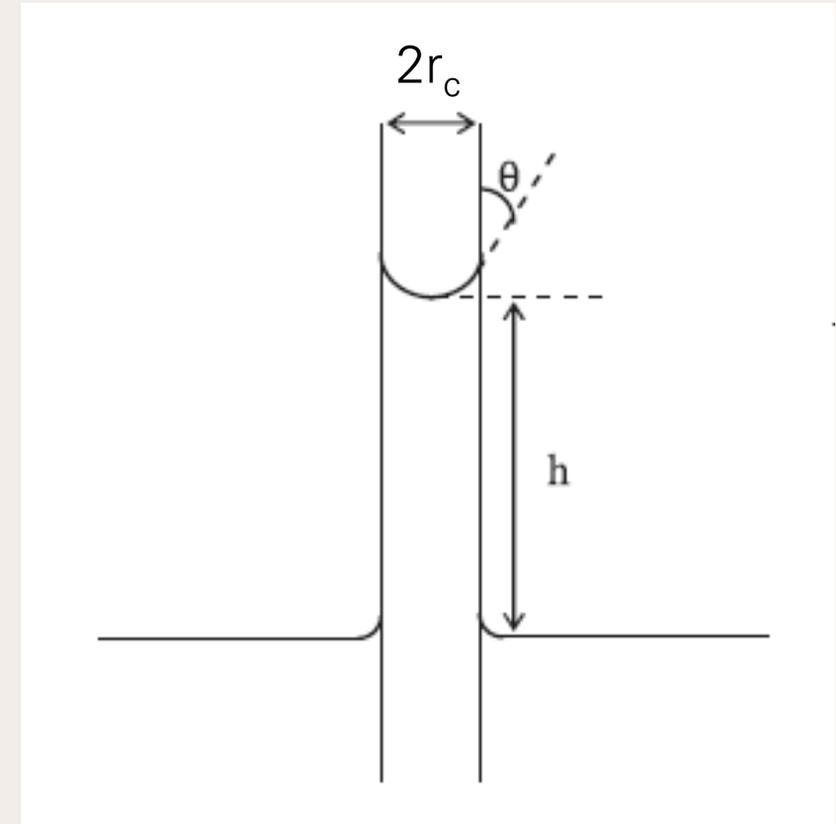
Si el diámetro del capilar es muy pequeño, el menisco tendrá forma esférica y el radio de la curvatura del líquido en la superficie del capilar será:

$$r = \frac{r_c}{\cos \theta}$$

$$\Delta P = \frac{2\gamma \cos \theta}{r_c}$$

$$\frac{2\gamma \cos \theta}{r_c} = hg(\rho_1 - \rho_v)$$

$$\gamma = \frac{hg\rho_1}{2 \cos \theta}$$



Sahin & Samnu (2006).

Tensión interfacial

- Cuando la tensión ocurre en interfases (líquido-líquido), en vez de en situaciones con superficies libres (líquido-gas o sólido-sólido), se le llama tensión interfacial.
- Los emulsificantes y detergentes actúan en las interfases de líquidos inmiscibles reduciendo la tensión interfacial.

Material	Tensión interfacial con agua a 25°C (mN/m)
Aceite de oliva	17,6
Aceite de maní	18,1
Aceite de coco	12,1

Sahin & Samnu (2006).

Ecuaciones de Young y Dupré

Cuando se tiene una gota líquida en una superficie sólida deben considerarse las tensiones superficiales: sólido-líquido (γ_{sl}), sólido-vapor (γ_{sv}), y líquido-vapor (γ_{lv}) deben considerarse.

Ecuación de Young: $\gamma_{sv} = \gamma_{lv} \cos \theta + \gamma_{sl}$

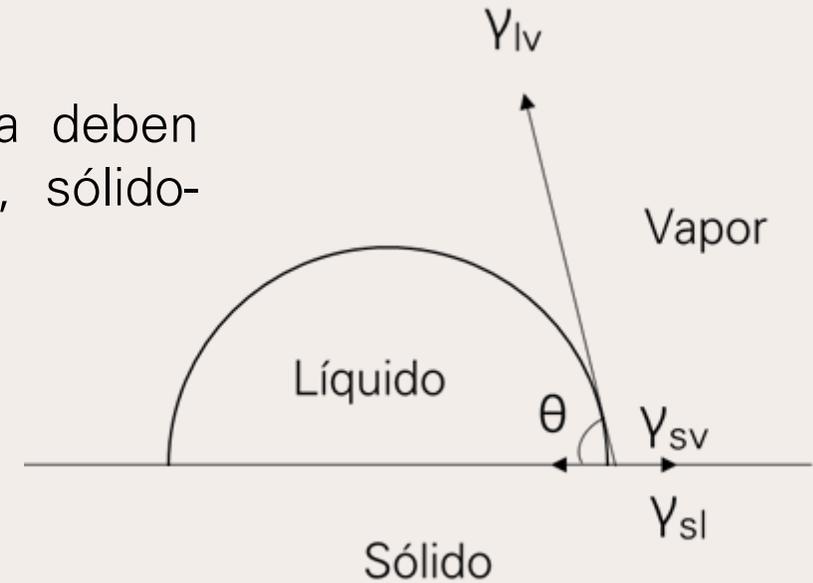
Entonces:
$$\cos \theta = \frac{\gamma_{sv} - \gamma_{sl}}{\gamma_{lv}}$$

$\theta > 90^\circ$: el líquido no moja.

$\theta = 0^\circ$: el líquido moja completamente el sólido.

Ecuación de Dupré: $W_a = \gamma_{lv} + \gamma_{sv} - \gamma_{sl}$

Combinando ambas ecuaciones: $W_a = \gamma_{lv}(\cos \theta + 1)$



Aplicación práctica



ELSEVIER

Colloids and Surfaces

A: Physicochemical and Engineering Aspects 149 (1999) 107–121

COLLOIDS
AND
SURFACES

A

Adhesion of food emulsions to packaging and equipment surfaces

M.C. Michalski ^a, S. Desobry ^{a,*}, V. Babak ^b, J. Hardy ^a

^a *Laboratoire de Physicochimie et Génie Alimentaires, ENSAIA, INPL, 2 avenue de la forêt de Haye, BP 172, 54505 Vandoeuvre-les-Nancy, France*

^b *INEOS, Russian Academy of Sciences, 28 Vavilova Street, Moscow 117813, Russian Federation*

Received 27 August 1997; accepted 8 January 1998

Aplicación práctica: Michalski et al. (1999)

Emulsión (o/w) modelo: 70% aceite, 1% lecitina y 1,5% proteínas.

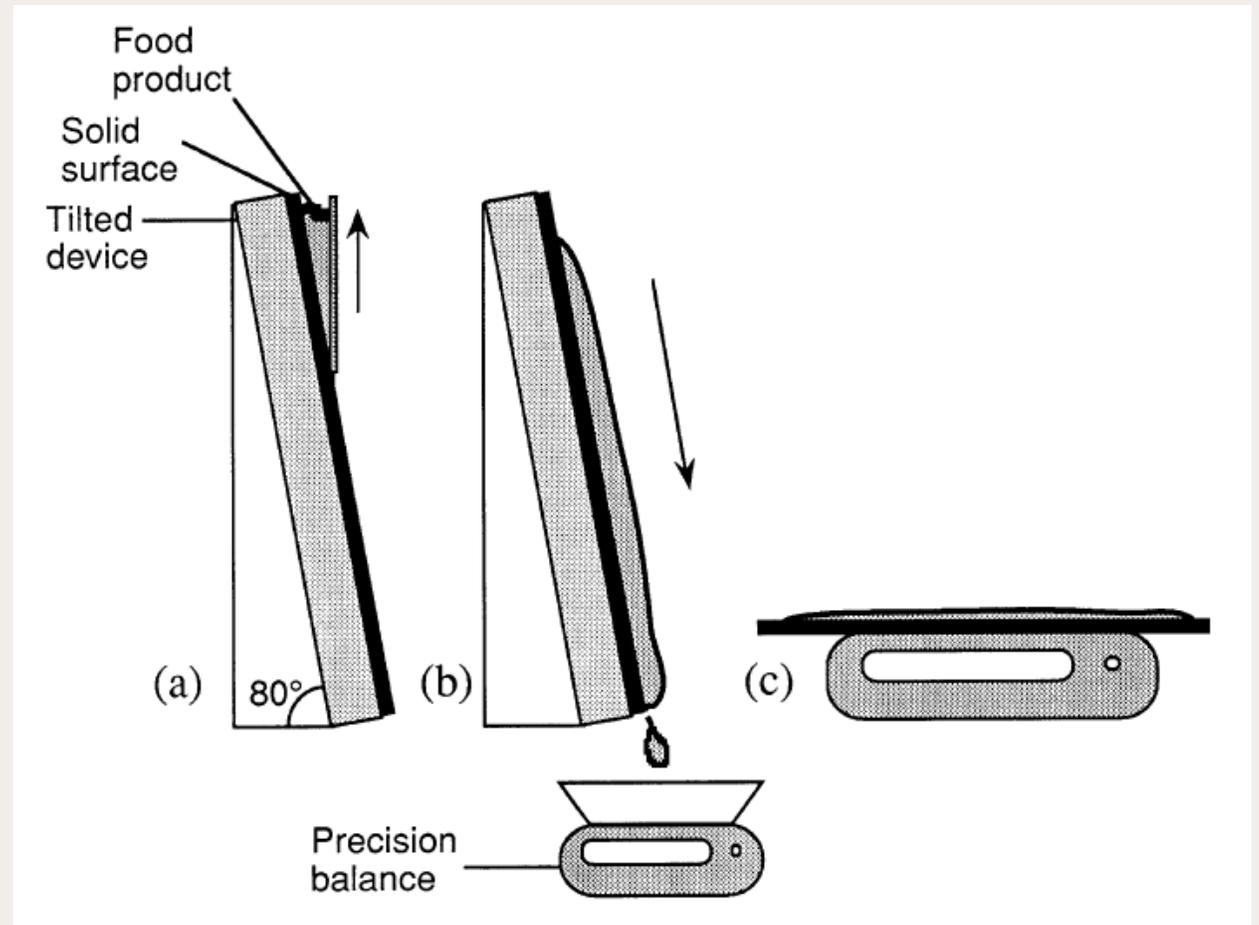
Aceites evaluados:

- Aceite de oliva extra virgen
- Aceite de girasol refinado
- Aceite de soja
- Aceite puro de vaselina (estándar)

Superficies sólidas evaluadas:

- Teflón
- LDPE
- PET
- AISI 304
- Vidrio

Cantidad de emulsión adherida a la superficie



$$M_{ad}(g/m^2) = \text{Peso depósito/superficie}$$

Aplicación práctica: Michalski et al. (1999)

Determinación de tensión superficial (γ): tensiómetro

Determinación de ángulo de contacto (θ):

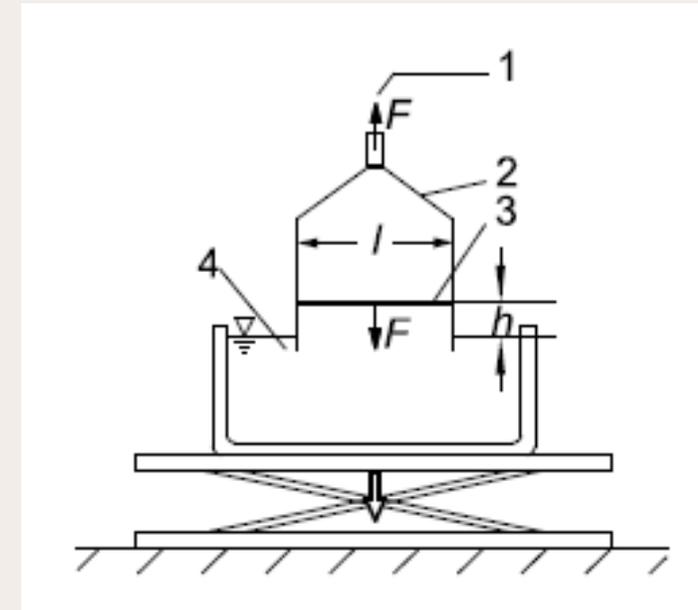
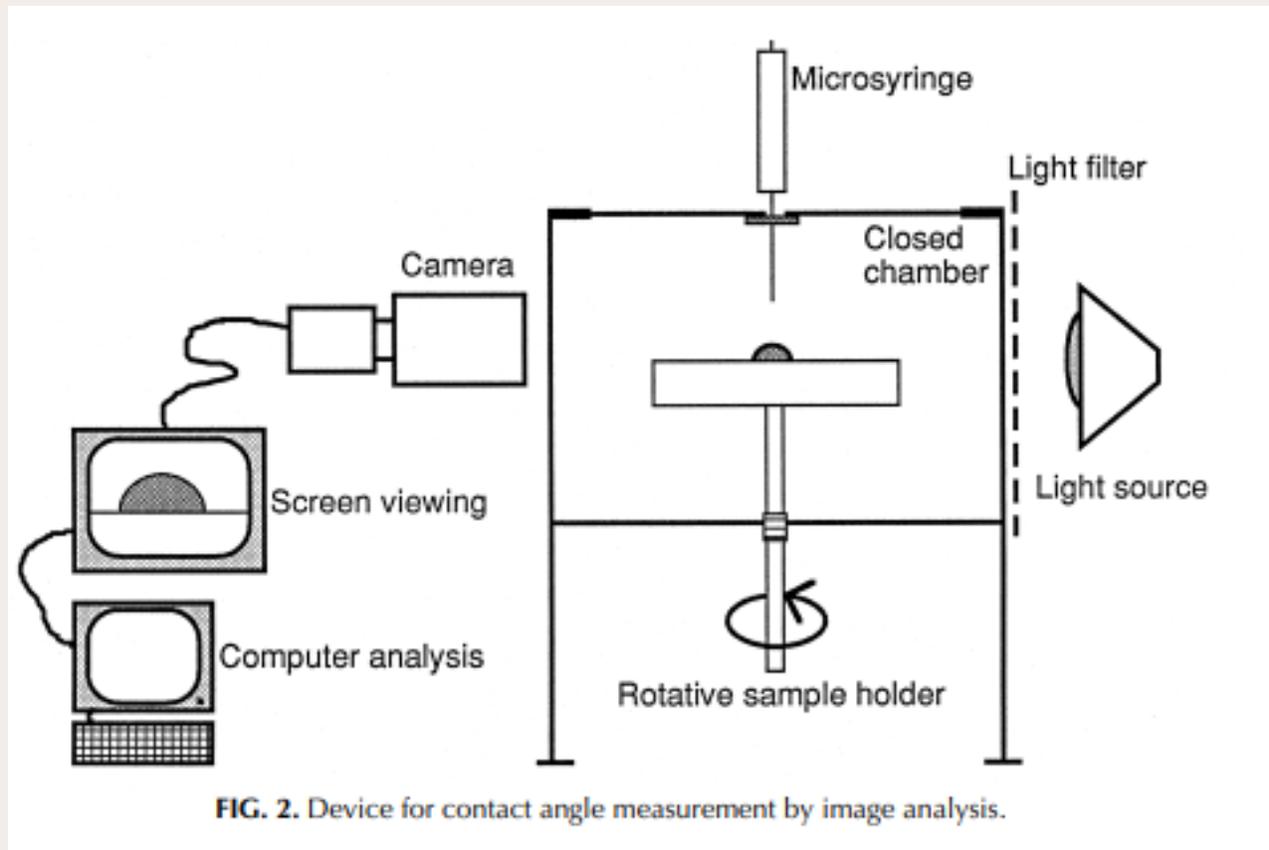


Figura &Teixeira (2007).

Aplicación práctica: Michalski et al. (1999)

A partir de ecuaciones de Young y Dupré: $W_a = \gamma_{lv}(\cos \theta + 1)$

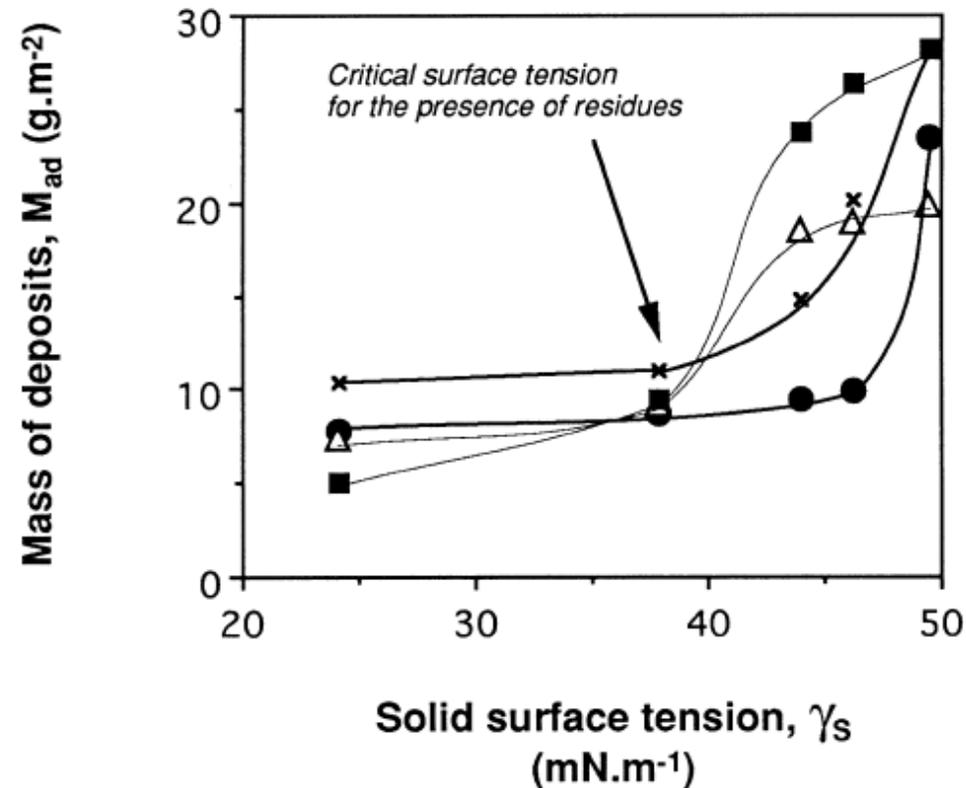
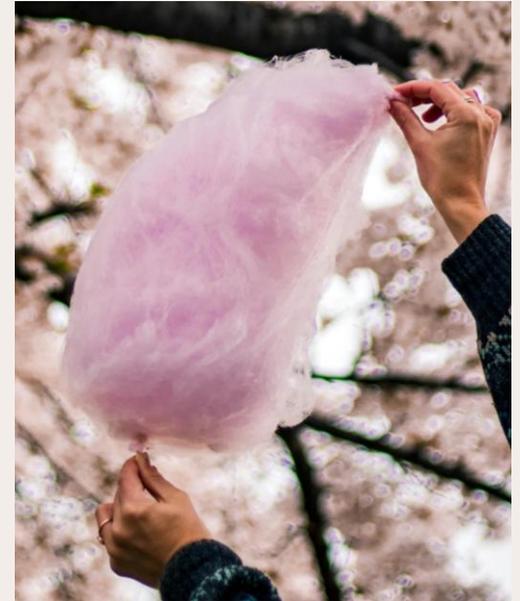


Fig. 2. Effect of solid surface tension γ_s on amount of emulsion adhered M_{ad} : \bullet , olive 1; \blacksquare , sunflower 4; \times , soybean 2; \triangle , vaseline 1.

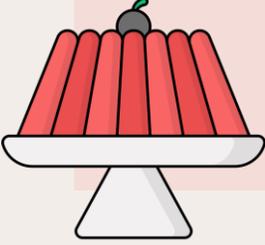
La cantidad de emulsión adherida aumentó con la tensión superficial del sólido.
Existe una tensión superficial crítica para cada emulsión, a partir de la cual se empieza a formar depósito.

Dispersión coloidal

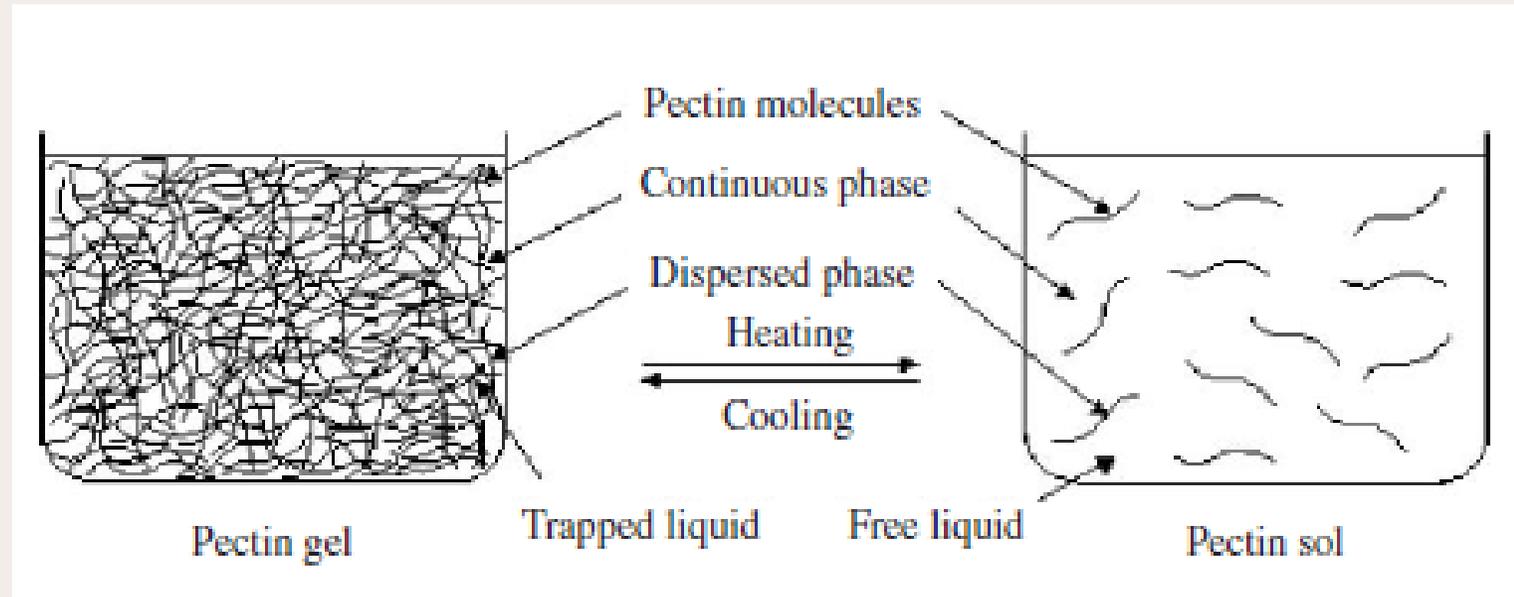
- Sistema de al menos 2 fases inmiscibles: dispersa y continua.
- Fase dispersa: partículas discretas de 1 a 1000 nm de diámetro.
- Sistemas coloidales alimentarios: sol, gel, emulsión, espuma.



Soles y geles



- La pectina es hidrofílica y atrae capas de agua que está fuertemente unida a través de puentes de H a otras moléculas, como carbohidratos y proteínas.
- Al reducir la temperatura, un sol se puede transformar en gel. Los sólidos en la fase dispersa se mueven cada vez con mayor dificultad a través de la fase continua hasta que eventualmente empiezan a asociarse entre ellos. Ej. jaleas y gelatina.
- En un gel de pectina, las moléculas de pectina son la fase continua y el líquido es la fase dispersa, mientras que, en un sol de pectina, las pectinas son la fase dispersa y el líquido la fase continua.
- Al cortar un gel se puede liberar un poco de líquido (fase dispersa) y esto se conoce como sinéresis.



Emulsiones



- Se clasifican en: aceite en agua (o/w) (mayonesa) o agua en aceite (w/o) (manteca).
- Emulsificantes: pequeñas moléculas surfactantes anfifílicas que atraen a las 2 fases de la emulsión y ayudan en la formación de la emulsión y estabilidad a corto plazo.
- Los emulsificantes se ubican en la superficie de las esferas dispersas, evitando que entren en contacto y se unan (coalescencia).
- Ejemplo de emulsificantes: monoglicéridos, polisorbatos, lecitina.
- Estabilizantes: proveen estabilidad a más largo plazo. Su principal acción es modificar la viscosidad de la fase continua. Ej.: proteínas o polisacacáridos.
- Las proteínas pueden actuar como emulsionantes y como estabilizantes.

Espumas



- Los líquidos deben tener baja tensión superficial para formar espumas.
- Los líquidos deben tener baja presión de vapor para prevenir la evaporación.
- Para aumentar la estabilidad se puede incorporar materia sólida en los films para aumentar la rigidez de las paredes que rodean a las burbujas de gas. En el caso de espumas de proteínas, su desnaturalización provee rigidez.



$$\text{Overrun} = \frac{V_f - V_l}{V_l} \times 100$$

V_l : volumen inicial de líquido
 V_f : volumen final de la espuma.

$$We = \tau \frac{D_{max}}{\gamma}$$

We : número de Weber
 τ : esfuerzo cortante
 D : diámetro de burbuja
 γ : tensión superficial

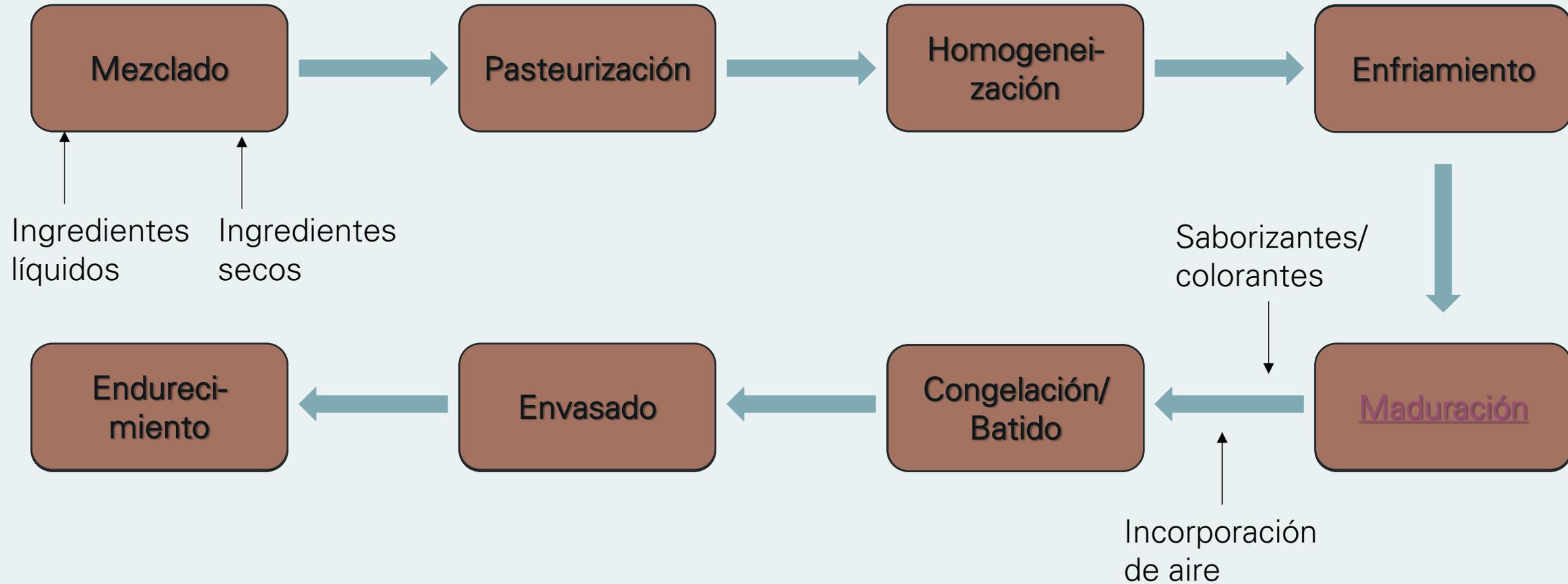


EJEMPLO

Helado, un sistema coloidal alimentario complejo



Proceso de producción



Mezclado

- En esta etapa se prepara la mezcla de helado.
- Ingredientes:
 - Grasa láctea
 - Sólidos no grasos de la leche (lactosa, micelas de caseína, proteínas del suero, minerales, vitaminas, ácidos, enzimas)
 - Endulzantes
 - Estabilizantes
 - Emulsionantes
 - Agua

Pasteurización

- Esta etapa se diseña para destruir bacterias patógenas.
- También funde las grasas para su apropiada homogeneización.

Homogeneización

- Etapa responsable por la formación de la emulsión.
- Fuerza a la mezcla caliente a pasar por un pequeño orificio bajo presión (15 – 19 MPa).
- La reducción del tamaño del glóbulo graso genera un importante aumento de su área superficial.
- En general los homogeneizadores cuentan con una segunda válvula en la que se aplican presiones de ~ 3,4 MPa.

Maduración

- Se recomienda un tiempo mínimo de maduración de 4 horas a 2-4°C.
- Esta etapa permite:
 - Hidratación de las proteínas lácteas y los estabilizantes
 - Cristalización de glóbulos grasos.
 - Rearreglo de la membrana.

Congelación

- Consiste en dos etapas:
 1. La mezcla pasa a través de un intercambiador de calor de paredes rascadas en condiciones de alto esfuerzo de corte.
 - Extensiva nucleación de cristales de hielo.
 - Incorporación de aire.
 2. Congelado del helado envasado.
 - Congelado rápido.
 - Formación de cristales de hielo pequeños.

Formación de la emulsión

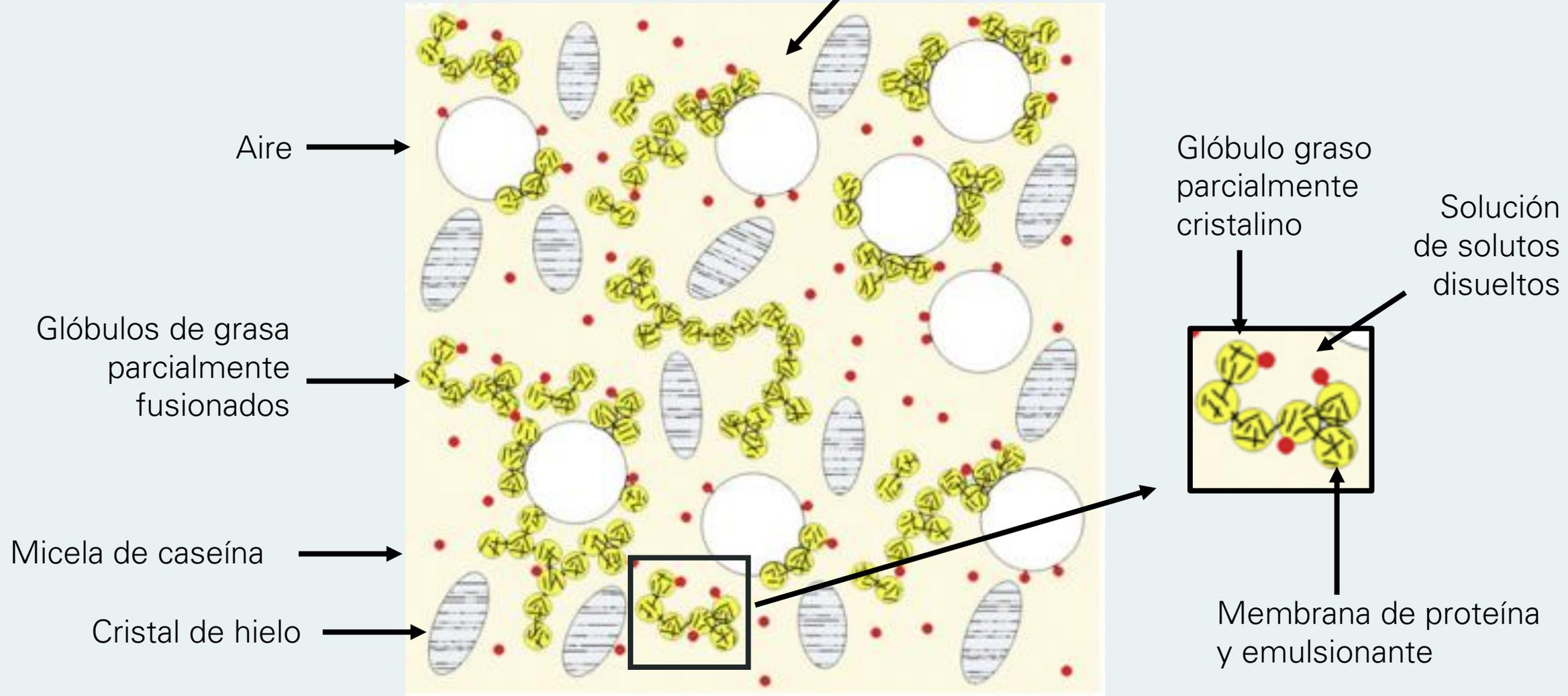
- Inmediatamente luego de la homogeneización, las moléculas anfifílicas de la solución se adsorben en la interfase.
- Moléculas surfactantes: caseínas, micelas de caseína, proteínas del suero, fosfolípidos, lipoproteínas, componentes de la membrana de glóbulo graso original y otros emulsionantes agregados a la mezcla.
- La membrana formada durante la homogeneización continúa desarrollándose y reorganizándose hasta alcanzar el estado con menor energía libre superficial posible.
- Si bien la membrana formada inmediatamente luego de la homogeneización depende del microambiente en el momento de su creación, la membrana no se desarrolla completamente hasta avanzado el proceso de maduración.

Formación de la espuma

- Ocurre en las etapas conjuntas de batido y congelación.
- Incorporación de aire:
 - En procesos en batch: durante largos procesos de batido.
 - En procesos continuos: se introduce en la mezcla mediante vacío o se inyecta.
- El proceso de batido junto a la formación de cristales durante el congelado generan un importante esfuerzo de corte que causan una parcial desestabilización de la emulsión.
- El aire queda atrapado adentro de los glóbulos de grasa fusionados, se forma una red de grasa dentro del producto congelado.

Estructura del helado

Fase no congelada



Petrut et al. (2016).

Referencias

- Berk, Z. (2018). Capítulo 1: Physical properties of food. En: Food Process Engineering and Technology, 3rd ed. Academic Press, London, pp. 1-29.
- Sahin, S.; Gülüm Sumnu, S. (2006). Capítulo 6: Surface properties of foods. En: Physical properties of foods. Springer, New York, pp. 229-250.
- Figura, L.O.; Teixeira, A.A. (2007). Capítulo 5: Interfacial phenomena. En: Food Physics: Physical properties- Measurement and Applications. Springer, Berlín, pp. 207-232.
- Butt, H.J.; Graf, K.; Kappl, M. (2003). Physics and chemistry of interfaces. Wiley, Weinheim.
- Michalski, M.C.; Desobry, S.; Babak, V.; Hardy, J. (1999). Adhesion of food emulsions to packaging and equipment surfaces. Colloids and Surfaces A, 149: 107-121.
- Goff, H.D. (1997). Colloidal Aspects of Ice Cream – A Review. International Dairy Journal, 7: 363-373.
- Petrut, R.F.; Danthine, S.; Blecker, C. (2016). Assessment of partial coalescence in whippable oil-in-water food emulsions. Advances in Colloid and Interface Science, 229: 25-33.