

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL LITORAL

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA



Tesis de Doctorado presentada como parte de los requisitos de la Universidad Nacional del Litoral, para la obtención del grado académico de Doctor en Ciencia y Tecnología de los Alimentos.

“INNOVACIÓN Y DESARROLLO DE QUESOS DE MUY ALTA HUMEDAD: ESTRATEGIA PARA REVALORIZAR EL SUERO DE QUESERÍA”

Por:

Ing. Juan Diego Cortez Latorre (Msc. Esp.)

Director: Dr. Sergio Rozycki

Co-Directora: Dra. Patricia Risso

INSTITUTO DE TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS

A mi familia

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Sergio Rozycki y a la Dra. Patricia Risso, por dirigirme en la ejecución del presente trabajo de investigación.

A hijo, mi madre y hermanos, parte fundamental de mi vida, así como también por todo el apoyo brindado durante esta etapa.

A mi padre, quien, a pesar de su ausencia, sus ejemplos y enseñanzas se mantienen vigentes.

A mis compañeros y colegas del Instituto de Tecnología de los Alimentos, principalmente Leonardo, Facundo, Mirta y Víctor.

A los docentes de la Carrera de Doctorado en Ciencia y Tecnología de los Alimentos, quienes, supieron transmitir de manera adecuada cada uno de los temas planteados, promoviendo siempre la excelencia en la educación.

A la UNL, por brindarme la oportunidad de formarme en esta noble institución y a su vez por permitirme ser parte de ella durante esta etapa, también como docente.

.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

| | | |
|-----------------------------|---|--------------------------------------|
| ÍNDICE DE CONTENIDOS | | IV |
| ÍNDICE DE FIGURAS | | IX |
| ÍNDICE DE TABLAS | | XVII |
| ABREVIATURAS | | XX |
| RESUMEN | | XXII |
| 1 | INTRODUCCIÓN | 24 |
| 1.1 | LA LECHERÍA Y QUESERÍA EN ARGENTINA | 24 |
| 1.2 | PRINCIPIOS DE LA QUESERÍA | 26 |
| 1.2.1 | Selección de la leche. | 27 |
| 1.2.2 | Normalización de la composición de la leche | 28 |
| 1.2.3 | Adición de calcio | 28 |
| 1.2.4 | Pasteurización | ¡Error! Marcador no definido. |
| 1.2.5 | Acidificación. | 30 |
| 1.2.6 | Coagulación | 32 |
| 1.2.7 | Factores que afectan el desuerado de la cuajada | 34 |
| 1.2.7.1 | <i>Agitación de la mezcla suero-cuajada y dependencia del tiempo.</i> | 35 |
| 1.2.8 | Desuerado, moldeado y prensado de la cuajada | 37 |
| 1.2.9 | Salado | 39 |
| 1.2.10 | Maduración del gel deshidratado | 40 |
| 1.3 | LACTOSUERO | 42 |
| 1.3.1 | Suero de quesería | 42 |
| 1.3.2 | Tipos de suero | 45 |
| 1.4 | PROCESAMIENTO DEL SUERO | 47 |
| 1.4.1 | Pretratamiento | 47 |
| 1.4.2 | Derivados de suero y sus tecnologías | 48 |
| 1.4.2.1 | <i>Queso de suero</i> | 51 |
| 1.4.2.2 | <i>Suero en polvo dulce</i> | 51 |
| 1.4.2.3 | <i>Suero en polvo desmineralizado</i> | 52 |

| | | |
|---------|--|----|
| 1.4.2.4 | <i>Proteína de suero concentrada (WPC) y proteína de suero aislada (WPI)</i> | 52 |
| 1.4.3 | Consideraciones y usos de los derivados de suero | 54 |
| 1.5 | QUESOS DE MUY ALTA HUMEDAD..... | 57 |
| 1.5.1 | Formación del gel ácido | 62 |
| 1.5.2 | Sinéresis del gel..... | 65 |
| 1.6 | FUNCIONALIDAD DE LOS QUESOS. | 67 |
| 1.6.1 | Untabilidad..... | 68 |
| 1.6.2 | Procesos productivos de quesos untables..... | 69 |
| 1.7 | QUESOS ANÁLOGOS. | 71 |
| 1.7.1 | Definición y ventajas de su producción. | 71 |
| 1.7.2 | Clasificación..... | 72 |
| 1.7.3 | Proceso de producción. | 73 |
| 1.7.4 | Ingredientes. | 74 |
| 1.7.4.1 | <i>Propiedades funcionales de WPC</i> | 74 |
| 1.7.4.2 | <i>Grasa</i> | 77 |
| 1.7.4.3 | <i>Proteína</i> | 77 |
| 1.7.4.4 | <i>Agente acidificante</i> | 77 |
| 1.7.4.5 | <i>Conservante</i> | 77 |
| 1.7.4.6 | <i>Hidrocoloides</i> | 77 |
| 1.7.5 | Gelatina. | 78 |
| 1.7.6 | Almidón..... | 79 |
| 1.7.7 | Interacción almidón-gelatina..... | 85 |
| 1.8 | PARÁMETROS DE CALIDAD..... | 86 |
| 1.8.1 | Reología. | 86 |
| 1.8.1.1 | <i>Definición e importancia</i> | 86 |
| 1.8.1.2 | <i>Conceptos básicos</i> | 86 |
| 1.8.1.3 | <i>Fluidos Newtonianos</i> | 86 |
| 1.8.1.4 | <i>Fluidos no Newtonianos</i> | 87 |
| 1.8.1.5 | <i>Reometría</i> | 89 |
| 1.8.1.6 | <i>Viscosímetro de cilindros concéntricos</i> | 89 |
| 1.8.1.7 | <i>Modelos y parámetros reológicos</i> | 89 |
| 1.8.2 | Textura. | 91 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 1.8.2.1 | Definición..... | 91 |
| 1.8.2.2 | Medición de textura..... | 91 |
| 1.8.2.3 | Clasificación de técnicas instrumentales..... | 91 |
| 1.8.2.4 | Ensayo de penetración..... | 92 |
| 1.8.3 | Color..... | 93 |
| 1.8.3.1 | Definición..... | 93 |
| 1.8.3.2 | Medición del color..... | 93 |
| 1.8.3.3 | Sistema CIELAB..... | 93 |
| 1.8.4 | Calidad sensorial..... | 94 |
| 1.8.4.1 | Definición..... | 94 |
| 1.8.4.2 | Evaluación sensorial..... | 95 |
| 1.8.4.3 | Análisis descriptivo cuantitativo..... | 96 |
| 1.8.4.4 | Propiedades sensoriales del queso..... | 97 |
| 1.9 | IMPORTANCIA DEL TEMA DE INVESTIGACIÓN..... | 98 |
| 1.10 | OBJETIVOS..... | 99 |
| 1.10.1 | Objetivo General..... | 99 |
| 1.10.2 | Objetivos específicos..... | 99 |
| 2 | MATERIALES Y MÉTODOS: | 100 |
| 2.1 | CARACTERIZACIÓN DEL QUESO CASANCREM CLÁSICO..... | 100 |
| 2.2 | PRODUCCIÓN DE QUESO UNTABLE..... | 100 |
| 2.2.1 | Materias Primas..... | 100 |
| 2.2.2 | Etapas de producción..... | 100 |
| 2.2.3 | Diseño experimental y análisis estadístico..... | 102 |
| 2.2.3.1 | Diseño experimental Box-Behnken (BB)..... | 102 |
| 2.2.3.2 | Optimización de respuesta múltiples..... | 105 |
| 2.2.4 | Análisis estadístico..... | 106 |
| 2.2.5 | Validación de los modelos obtenidos..... | 106 |
| 2.3 | DETERMINACIONES ANALÍTICAS..... | 107 |
| 2.3.1 | pH..... | 107 |
| 2.3.2 | Acidez titulable..... | 107 |
| 2.3.3 | Sólidos totales..... | 108 |
| 2.3.4 | Grasa..... | 109 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 2.3.5 | Proteína..... | 109 |
| 2.3.6 | Cenizas. | 110 |
| 2.3.7 | Actividad de agua (a_w). | 111 |
| 2.3.8 | Sinéresis. | 111 |
| 2.4 | ANÁLISIS REOLÓGICOS. | 111 |
| 2.5 | ANÁLISIS TEXTURALES..... | 112 |
| 2.6 | ANÁLISIS COLORIMÉTRICO..... | 114 |
| 2.7 | ANÁLISIS SENSORIAL..... | 115 |
| 3 | RESULTADOS Y DISCUSIÓN..... | 117 |
| 3.1 | CARACTERIZACIÓN DE UN QUESO UNTABLE MARCA LÍDER..... | 117 |
| 3.1.1 | Características fisicoquímicas..... | 117 |
| 3.1.2 | Características reológicas..... | 118 |
| 3.1.3 | Características texturales..... | 119 |
| 3.1.4 | Características colorimétricas. | 119 |
| 3.2 | MODELADO DE LOS EFECTOS EN LAS PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS Y MECÁNICAS DE QUESOS OBTENIDOS POR LA VARIACIÓN DEL PORCENTAJE DE ALMIDÓN, GELATINA Y GRASA EN SU FORMULACIÓN | 120 |
| 3.2.1 | Efectos en el pH | 120 |
| 3.2.2 | Efectos en la acidez | 126 |
| 3.2.3 | Efecto en los parámetros de color. | 133 |
| 3.2.3.1 | <i>Efecto en el parámetro L^*</i> | 133 |
| 3.2.3.2 | <i>Efecto en el parámetro de color a^*</i> | 139 |
| 3.2.3.3 | <i>Efecto en el parámetro de color b^*</i> | 147 |
| 3.2.4 | Efecto en la actividad de agua (a_w). | 155 |
| 3.2.5 | Efecto en el porcentaje de grasa, proteína, sólidos totales y cenizas. | 160 |
| 3.2.6 | Efecto en la textura..... | 166 |
| 3.2.6.1 | <i>Efecto en la firmeza</i> | 166 |
| 3.2.6.2 | <i>Efecto en la cohesividad</i> | 175 |
| 3.2.6.1 | <i>Efecto en la consistencia</i> | 185 |
| 3.2.6.1 | <i>Efecto en la adhesividad</i> | 194 |
| 3.2.7 | Efecto en las propiedades de flujo..... | 203 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 3.2.7.1 | <i>Efecto en la viscosidad al día 1 de almacenamiento</i> | 203 |
| 3.2.7.2 | <i>Efecto en el τ_0, K, n e IT al día 1</i> | 211 |
| 3.2.7.3 | <i>Efecto en la viscosidad al día 7</i> | 218 |
| 3.2.7.1 | <i>Efecto en τ_0, k, n e IT al día 7</i> | 226 |
| 3.2.7.1 | <i>Efecto en la viscosidad al día 14</i> | 234 |
| 3.2.7.1 | <i>Efecto en el τ_0, K, n e IT al día 14</i> | 242 |
| 3.2.7.1 | <i>Efecto en la viscosidad al día 21</i> | 250 |
| 3.2.7.1 | <i>Efecto en el τ_0, k, n e IT al día 21</i> | 255 |
| 3.3 | DETERMINACIÓN DE LAS CONDICIONES ÓPTIMAS DE PROCESO... | 261 |
| 3.4 | VALIDACIÓN DE LOS MODELOS OBTENIDOS | 263 |
| 3.5 | FORTIFICACIÓN A PARTIR DE LA VALIDACIÓN..... | 263 |
| 3.5.1 | Efecto sobre el pH | 264 |
| 3.5.2 | Efecto sobre la acidez..... | 265 |
| 3.5.3 | Efecto sobre la a_w | 265 |
| 3.5.4 | Efecto sobre el porcentaje de sólidos totales, grasa, proteína, sinéresis y cenizas | 266 |
| 3.5.5 | Efecto sobre el parámetro de color L^* | 266 |
| 3.5.6 | Efecto sobre el parámetro de color a^* | 267 |
| 3.5.7 | Efecto sobre el parámetro de color b^* | 268 |
| 3.5.8 | Efecto sobre la firmeza..... | 269 |
| 3.5.9 | Efecto sobre la cohesividad..... | 270 |
| 3.5.10 | Efecto sobre la consistencia | 271 |
| 3.5.11 | Efecto sobre la adhesividad..... | 272 |
| 3.5.12 | Efecto sobre la viscosidad | 273 |
| 3.5.13 | Efecto sobre los atributos sensoriales..... | 274 |
| 3. | CONCLUSIONES | 278 |
| 4. | REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICOS | 280 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | | |
|-------------------|--|----|
| Figura 1. | Protocolo general para la elaboración de quesos. | 27 |
| Figura 2. | Efecto de la pasteurización de leche, por 15s, sobre el porcentaje de desnaturalización de las proteínas de suero. | 29 |
| Figura 3. | Esquema de estandarización y pasteurización de leche para quesería. 1) Tanque de recepción. 2) bomba de alimentación. 3) control de flujo. 4) intercambiador de placas. 5) centrifuga. 6) transmisor de flujo. 7) intercambio de calor. 8) densímetro. 9) válvula de regulación. 10) bomba. 11) tubo de residencia. 12) válvula de 3 vías. (Adaptado de Wit, 2001). | 30 |
| Figura 4. | Representación esquemática de cadenas (hebras) de micelas de paracaseína formando nuevas uniones, que conducen a la ruptura de una de ellas y a la contracción (local) de la red de gel. | 33 |
| Figura 5. | Corte del gel y proceso de sinéresis. | 34 |
| Figura 6. | Efecto de la temperatura (a) y el pH (b) sobre la tasa de sinéresis en geles cortados de leche cuajada. | 35 |
| Figura 7. | Efecto del tiempo de agitación en: (a) peso del suero de leche (●) y la cuajada (○) y humedad de la cuajada (▲) y (b) grado de sinéresis. | 36 |
| Figura 8. | Volumen de suero expelido (como porcentaje del volumen original de leche) en función del tiempo después del inicio del corte, con o sin agitación. Cuajada mantenida en el suero a 38°C. | 37 |
| Figura 9. | a) Quesos blandos: leve prensado de la masa por apilamiento de dos (o tres) moldes por superposición de moldes. b) Quesos duros o semiduros: prensado intenso mediante el empleo de prensa. | 39 |
| Figura 10. | Valor nutricional de la proteína de suero cuando se compara con otras fuentes proteicas comestibles, para valor biológico (A), contenido de aminoácidos esenciales (B) y contenido de aminoácidos sulfurados (C). (Smithers, 2008 modificado). | 44 |
| Figura 11. | Esquema del pre tratamiento del suero. 1) tanque receptor del suero; 2) clarificador; 3) tanque colector de finos 4) separador de crema; 5) pasteurizador 6) tanque | |

| | |
|--|----|
| colector de la crema del suero; 7) línea de suero a los tratamientos subsiguientes (Tetra Pak, 2017). | 48 |
| Figura 12. Alternativas para la industrialización de suero de quesería (Castells, 2017) | 50 |
| Figura 13. Formas de obtención de quesos frescos y quesos de suero (Adaptado de Fox et al., 2017). | 58 |
| Figura 14. Hidratación de las micelas de caseína en función del pH a 20°C en leche descremada (●) y micelas de paracaseína a partir de cuajada enzimática a partir de leche descremada (○). | 61 |
| Figura 15. Representación esquemática de un gel de estructura fina (a), estructura gruesa (b) y un precipitado (c). | 63 |
| Figura 16. Curva típica de viscosidad compleja con incremento en la tasa de viscosidad durante la coagulación ácido enzimática de leche descremada. RA adición de cuajo; A, agregación; IP1, IP2 e IP3, puntos de inflexión de la curva de viscosidad compleja; Max 1 y Max 2, máximos de la curva de viscosidad compleja/tiempo; Min, mínimo de la curva de viscosidad compleja/tiempo (adaptado de Schulz-Collins y Senge, 2004). | 64 |
| Figura 17. Clasificación de quesos análogos (Fox <i>et al.</i> , 2017). | 73 |
| Figura 18. Diagrama de proceso de elaboración de queso análogo (Rojas Espinosa, 2009). | 74 |
| Figura 19. Gráfico de superficie de respuesta para la solubilidad de proteína de suero afectada por el pH y temperatura (Pelegrine y Gasparetto, 2005). | 75 |
| Figura 20. Efecto de la concentración de proteína sobre la viscosidad (T=20°C, $\gamma = 500, 1 \text{ s}^{-1}$ y pH = 6.5) (Akhtar et al., 2006). | 76 |
| Figura 21. Enrollamiento helicoidal de la amilosa (Valdés Martínez, 2006). | 80 |
| Figura 22. Estructura química de la molécula de amilopectina (Valdés Martínez, 2006). | 81 |

| | |
|---|-----|
| Figura 23. Gelatinización del almidón; los gránulos se hinchan y retienen un máximo de agua hasta que se rompen y producen una dispersión de moléculas de amilosa y amilopectina (Valdés Martínez, 2006). | 82 |
| Figura 24. Mecanismos de retrogradación del almidón (Valdés Martínez, 2006). | 83 |
| Figura 25. a) Curvas de flujo para los distintos tipos de comportamientos en un gráfico de esfuerzo de corte vs gradiente de deformación. b) Curvas de flujo para los distintos tipos de comportamientos en un gráfico de viscosidad vs gradiente de deformación. | 88 |
| Figura 26. Ciclo de histéresis observado para un fluido tixotrópico. | 89 |
| Figura 27. Representación gráfica de los parámetros de color $L^*a^*b^*$ y $L^*C^*_{ab}$ h_{ab} . 94 | |
| Figura 28. Clasificación de las pruebas sensoriales según su objetivo (Torricella Morales, 2008). | 96 |
| Figura 29. Diagrama de flujo del proceso de elaboración de queso untable con agregado de lactosuero. | 102 |
| Figura 30. pHmetro HANNA-HI8424. | 107 |
| Figura 31. Determinación de acidez por titulación. | 108 |
| Figura 32. Método Gerber. | 109 |
| Figura 33. Etapas de digestión a), destilación b) y titulación c), para la determinación de proteínas por el método Kjeldhal. | 110 |
| Figura 34. a) Etapa de calcinación; b) Horno Mufla. | 110 |
| Figura 35. Equipo Aqualab CX2. | 111 |
| Figura 36. Centrífuga de alta velocidad HealForce modelo Nefuge 18R. | 111 |
| Figura 37. Viscosímetro rotacional, Modelo Rheolab QC, Marca Anton Par. | 112 |
| Figura 38. Texturómetro TA.XT Plus Stable Microsystems con sonda P/10. | 113 |
| Figura 39. Curva de penetración fuerza (g) vs tiempo (s) y parámetros derivados: firmeza (F), cohesividad (Coh), consistencia (C) y adhesividad (Ad). | 114 |
| Figura 40. Espectrofotómetro Minolta | 114 |

| | | |
|-------------------|--|-----|
| Figura 41. | Representación gráfica de los parámetros de color $L^*a^*b^*$ | 115 |
| Figura 42. | Panilla de evaluación sensorial para análisis sensorial descriptivo de quesos untables a base de lactosuero..... | 116 |
| Figura 43. | Gráficos de superficie de respuesta estimada para los valores de pH de quesos untables elaborados con lactosuero en función de la concentración de almidón y gelatina para día 1(a) y 21 (b), y en función de la concentración de gelatina y grasa a día 1(c) y 21 (d) | 124 |
| Figura 44. | Gráficos de efectos principales para pH al día 1 (a) y día 21 (b), para quesos untables..... | 125 |
| Figura 45. | Gráfico de superficie de respuesta estimada para los valores de acidez Dornic de los quesos untables con lactosuero para día 1(a), 7(b), 14(c) y 21 (d)..... | 130 |
| Figura 46. | Diagramas de Pareto estandarizado para la acidez al día 1 (a) y día 21 (b).. | 132 |
| Figura 47. | Gráficos de efectos principales para la Luminosidad L^* al día 1 (a) y día 21 (b), de quesos untables elaborados con lactosuero..... | 137 |
| Figura 48. | Gráficos de superficie de respuesta estimada para los valores de Luminosidad en función del contenido de grasa y gelatina en el día 1 a) y 21 c) y en función del contenido de gelatina y almidón en el día 1 b) y 21 d)..... | 138 |
| Figura 49. | Diagramas de Pareto estandarizado para a^* al día 1 (a) y día 21 (b). | 143 |
| Figura 50. | Gráficos de efectos principales para a^* al día 1 (a) y día 21 (b), para los valores de pH de quesos untables elaborados con lactosuero. | 143 |
| Figura 51. | Gráficos de superficie de respuesta estimada para los valores de a^* en función del contenido de grasa y gelatina en el día 1 a), 7 c), 14 e) y 21 g) y en función del contenido de gelatina y almidón en el día 1 b) y 7 d), 14 f) y 21 h)..... | 146 |
| Figura 52. | Diagrama de Pareto estandarizado para b^* al día 1 (a) y día 21 (b) | 151 |
| Figura 53. | Gráfica de efectos principales para b^* al día 1 (a) y día 21 (b)..... | 152 |
| Figura 54. | Gráficos de superficie de respuesta estimada para los valores de Luminosidad en función del contenido de grasa y gelatina en el día 1 a), 7 c), 14 e) y 21 g) y en función del contenido de grasa y almidón en el día 1 b) y 7 d), 14 f) y 21 h).. | 154 |

| | | |
|-------------------|---|-----|
| Figura 55. | Gráfica de efectos principales para a_w al día 1 (a) y día 21 (b), para quesos untables elaborados con lactosuero. | 159 |
| Figura 56. | Gráficos de superficie de respuesta estimada para los valores de a_w en función del contenido de grasa y gelatina en el día 1 a), 21 b). | 160 |
| Figura 57. | Gráficos de efectos principales para % de grasa (a) % de proteína (b) % y % de cenizas d) de quesos untables elaborados con lactosuero. | 164 |
| Figura 58. | Gráficos de superficie de respuesta para el % de grasa (a) % de proteína (b) % de sólidos totales c) y % de cenizas d). | 165 |
| Figura 59. | Diagramas de Pareto estandarizado para firmeza al día 1 (a), día 7 (b), día 14 (c) y día 21 (d)..... | 171 |
| Figura 60. | Gráficos de efectos principales para firmeza al día 1 (a) y día 21 (b), para quesos untables elaborados con lactosuero. | 172 |
| Figura 61. | Gráficos de superficie de respuesta estimada para los valores de firmeza en función del contenido de almidón y gelatina en el día 1 a), 7 c), 14 e) y 21 g) y en función del contenido de grasa y gelatina en el día 1 b) y 7 d), 14 f) y 21 h). | 175 |
| Figura 62. | Diagramas de Pareto estandarizado para cohesividad al día 1 (a), día 7 (b), día 14 (c) y día 21 (d)..... | 181 |
| Figura 63. | Gráficos de efectos principales para cohesividad al día 1 (a) y día 21 (b)... .. | 182 |
| Figura 64. | Gráficos de superficie de respuesta estimada para los valores de cohesividad en función del contenido de almidón y gelatina en el día 1 a), 7 c), 14 e) y 21 g) y en función del contenido de grasa y gelatina en el día 1 b) y 7 d), 14 f) y 21 h).. | 184 |
| Figura 65. | Diagramas de Pareto estandarizado para consistencia al día 1 (a), día 7 (b), día 14 (c) y día 21 (d). | 190 |
| Figura 66. | Gráficos de efectos principales para consistencia al día 1 (a) y día 21 (b). .. | 191 |
| Figura 67. | Gráficos de superficie de respuesta estimada para los valores de consistencia en función del contenido de almidón y gelatina en el día 1 a), 7 c), 14 e) y | |

| | |
|--|-----|
| 21 g) y en función del contenido de grasa y gelatina en el día 1 b) y 7 d), 14 f) y 21 h)... | 193 |
| Figura 68. Diagrama de Pareto estandarizado para adhesividad al día 1 (a), día 7 (b), día 14 (c) y día 21 (d) | 199 |
| Figura 69. Gráficos de efectos principales para adhesividad al día 1 (a) y día 21 (b), para quesos untables elaborados con lactosuero..... | 200 |
| Figura 70. Gráficos de superficie de respuesta estimada para los valores de adhesividad en función del contenido de almidón y gelatina en el día 1 a), 7 c), 14 e) y 21 g) y en función del contenido de grasa y gelatina en el día 1 b) y 7 d), 14 f) y 21 h) . | 202 |
| Figura 71. Diagramas de Pareto estandarizado para viscosidad al día 1 para los gradientes de deformación 50s ⁻¹ a), 100s ⁻¹ b), 150s ⁻¹ c) y 200s ⁻¹ d)..... | 207 |
| Figura 72. Gráficos de efectos principales para para viscosidad al día 1 para los gradientes de deformación 50s ⁻¹ a), 200s ⁻¹ b)..... | 208 |
| Figura 73. Gráficos de superficie de respuesta estimada para los valores de viscosidad al día 1 en función del contenido de almidón y gelatina en el para los gradientes de deformación 50s ⁻¹ a), 100s ⁻¹ c), 150s ⁻¹ e) y 200s ⁻¹ g) y en función del contenido de grasa y gelatina en los gradientes de deformación 50s ⁻¹ b) y 100s ⁻¹ d), 150s ⁻¹ f) y 200s ⁻¹ h). | 210 |
| Figura 74. Diagramas de pareto estandarizado al día 1 para τ_0 a), k b), n c) y IT d). | 215 |
| Figura 75. Gráficos de efectos principales para para viscosidad al día 1 para los gradientes de deformación τ_0 a), k b), n c) y IT d). | 216 |
| Figura 76. Gráficos de superficie de respuesta estimada al día 1 para los parámetros reológicos función del contenido de grasa y gelatina τ_0 a), k c), n e) y IT g) y en función del contenido de almidón y grasa en los gradientes de deformación t0b) y k d), n f) IT h). | 217 |
| Figura 77. Diagramas de Pareto estandarizado para viscosidad al día 7 para los gradientes de deformación 50s ⁻¹ a), 100s ⁻¹ b), 150s ⁻¹ c) y 200s ⁻¹ d)..... | 223 |
| Figura 78. Gráficos de efectos principales para para viscosidad al día 7 para los gradientes de deformación 50s ⁻¹ a), 200s ⁻¹ b)..... | 224 |

| | | |
|-------------------|---|-----|
| Figura 79. | Gráficos de superficie de respuesta estimada para los valores de viscosidad al día 7 en función del contenido de almidón y gelatina en el para los gradientes de deformación 50s ⁻¹ a), 100s ⁻¹ c), 150s ⁻¹ e) y 200s ⁻¹ g) y en función del contenido de grasa y gelatina en los gradientes de deformación 50s ⁻¹ b) y 100s ⁻¹ d), 150s ⁻¹ f) y 200s ⁻¹ h). | 225 |
| Figura 80. | Diagramas de Pareto estandarizado al día 7 para t0 a), k b), n c) y IT d). | 230 |
| Figura 81. | Gráficos de efectos principales para para viscosidad al día 7 para los gradientes de deformación t0 a), k b), n c) y IT d). | 231 |
| Figura 82. | Gráficos de superficie de respuesta estimada al día 7 para los parámetros reológicos función del contenido de grasa y gelatina t0 a), k c), n e) y IT g) y en función del contenido de almidón y grasa en los gradientes de deformación t0b) y k d), n f) IT h). | 233 |
| Figura 83. | Diagramas de Pareto estandarizado para viscosidad al día 14 para los gradientes de deformación 50s ⁻¹ a), 100s ⁻¹ b), 150s ⁻¹ c) y 200s ⁻¹ d). | 238 |
| Figura 84. | Gráficos de efectos principales para para viscosidad al día 14 para los gradientes de deformación 50s ⁻¹ a), 200s ⁻¹ b). | 239 |
| Figura 85. | Gráficos de superficie de respuesta estimada para los valores de viscosidad al día 14 en función del contenido de almidón y gelatina en el para los gradientes de deformación 50s ⁻¹ a), 100s ⁻¹ c), 150s ⁻¹ e) y 200s ⁻¹ g) y en función del contenido de grasa y gelatina en los gradientes de deformación 50s ⁻¹ b) y 100s ⁻¹ d), 150s ⁻¹ f) y 200s ⁻¹ h). | 241 |
| Figura 86. | Diagramas de Pareto estandarizado al día 14 para τo a), k b), n c) y IT d). .. | 246 |
| Figura 87. | Gráficos de efectos principales para al día 14 para τo a), k b), n c) y IT d). . | 247 |
| Figura 88. | Gráficos de superficie de respuesta estimada al día 14 para los parámetros reológicos función del contenido de grasa y gelatina τo a), k c), n e) y IT g) y en función del contenido de almidón y grasa en los gradientes de deformación t0b) y k d), n f) IT h). | 249 |

Figura 89. Diagramas de Pareto estandarizado para viscosidad al día 21 para los gradientes de deformación $50s^{-1}$ a), $100s^{-1}$ b), $150s^{-1}$ c) y $200s^{-1}$ d)..... 254

Figura 90. Gráfica de efectos principales para para viscosidad al día 21 para los gradientes de deformación $50s^{-1}$ a), $200s^{-1}$ b)..... 255

Figura 91. Diagramas de Pareto estandarizado al día 21 para τ_0 a), k b), n c) y IT d). ..
..... 259

Figura 92. Gráficos de efectos principales para para viscosidad al día 21 para los parámetros reológicos τ_0 a), k b), n c) y IT d). 260

Figura 93. Análisis cuantitativo descriptivo de quesos untables elaborados con lactosuero de quesería fortificados con diferentes fuentes de hierro (T01: tratamiento testigo; T02: hierro amino; T03: pirofosfato férrico) 275

ÍNDICE DE TABLAS

| | | |
|-----------------|---|------------|
| Tabla 1 | Composición del suero del leche dulce y ácido | 46 |
| Tabla 2 | Tipos de tecnologías de membranas y sus características (modificado de tunick, 2008)..... | 53 |
| Tabla 3 | Composición típica de suero líquido y seco..... | 53 |
| Tabla 4 | Volumen potencial e ingreso bruto de distintas opciones de utilización de suero de quesería | 56 |
| Tabla 5 | Composición aproximada de quesos frescos obtenidos de diferente forma.. | 59 |
| Tabla 6 | Clasificación de almidones modificados..... | 84 |
| Tabla 7 | Concentraciones y codificación de las variables independientes utilizadas para la formulación de quesos untables. | 103 |
| Tabla 8 | Descripción de los ingredientes y composición nutricional del queso casancrem clásico. | 117 |
| Tabla 9 | Parámetros fisicoquímicos del queso casancrem clásico. | 118 |
| Tabla 10 | Parámetros reológicos del queso casancrem clásico..... | 118 |
| Tabla 11 | Parámetros texturales del queso casancrem clásico..... | 119 |
| Tabla 12 | Parámetros colorimétricos del queso casancrem clásico. | 119 |
| Tabla 13 | Valores promedio y desvío estándar obtenidos para pH. | 121 |
| Tabla 14 | Análisis de varianza de los modelos obtenidos para ph durante los días de análisis. | 122 |
| Tabla 15 | Valores promedio y desvío estándar obtenidos para la acidez..... | 127 |
| Tabla 16 | Análisis de varianza de los modelos obtenidos para acidez. | 128 |
| Tabla 17 | Valores promedio obtenidos para luminosidad L*. | 134 |
| Tabla 18 | Análisis de varianza de los modelos obtenidos para L* | 135 |
| Tabla 19 | Valores promedio obtenidos para a* | 140 |
| Tabla 20 | Análisis de varianza de los modelos obtenidos para a*..... | 141 |
| Tabla 21 | Valores promedio obtenidos para b*..... | 148 |
| Tabla 22 | Análisis de varianza de los modelos obtenidos para b* durante los días de análisis. | 149 |
| Tabla 23 | Valores promedio obtenidos para aw. | 156 |

| | | |
|----------|---|-----|
| Tabla 24 | Análisis de varianza de los modelos obtenidos para a_w durante los días de análisis. | 157 |
| Tabla 25 | Valores promedio obtenidos para % de grasa, proteína sólidos totales y ceniza. | 161 |
| Tabla 26 | Análisis de varianza de los modelos obtenidos para % de grasa, proteína sólidos totales y ceniza durante los días de análisis. | 162 |
| Tabla 27 | Valores promedio obtenidos para firmeza. | 167 |
| Tabla 28 | Análisis de varianza de los modelos obtenidos para firmeza. | 168 |
| Tabla 29 | Valores promedio de cohesividad..... | 177 |
| Tabla 30 | Análisis de varianza de los modelos obtenidos para cohesividad... .. | 178 |
| Tabla 31 | Valores promedio obtenidos de consistencia..... | 186 |
| Tabla 32 | Análisis de varianza de los modelos obtenidos para consistencia. . | 187 |
| Tabla 33 | Valores promedio y desvíos estándar obtenidos de adhesividad.... | 195 |
| Tabla 34 | Análisis de varianza de los modelos obtenidos para adhesividad. . | 196 |
| Tabla 35 | Valores promedio obtenidos de viscosidad al día 1. | 204 |
| Tabla 36 | Análisis de varianza de los modelos obtenidos para viscosidad en el día 1. | 205 |
| Tabla 37 | Valores promedio obtenidos de τ_0 , k, n e IT al día 1 | 212 |
| Tabla 38 | Análisis de varianza de los modelos obtenidos para los parámetros reológicos al día 1 para esfuerzo inicial (t_0), índice de consistencia (k), índice de comportamiento (n) e índice de tixotropía (IT) | 213 |
| Tabla 39 | Valores promedio obtenidos de viscosidad al día 7. | 220 |
| Tabla 40 | Análisis de varianza de los modelos obtenidos para viscosidad en el día 7. | 221 |
| Tabla 41 | Valores promedio obtenidos para τ_0 , k, n y IT al día 7..... | 227 |
| Tabla 42 | Análisis de varianza de los modelos obtenidos para los parámetros reológicos al día 7 para τ_0 , k, n y IT..... | 228 |
| Tabla 43 | Valores promedio obtenidos de viscosidad al día 14. | 235 |
| Tabla 44 | Análisis de varianza de los modelos obtenidos para viscosidad en el día 14..... | 236 |

| | | |
|----------|--|-----|
| Tabla 45 | Valores promedio obtenidos de τ_0 , k n e IT al día 14. | 243 |
| Tabla 46 | Análisis de varianza de los modelos obtenidos para los parámetros reológicos al día 14 para τ_0 , k, n e IT..... | 244 |
| Tabla 47 | Valores promedio obtenidos de viscosidad al día 21 | 251 |
| Tabla 48 | Análisis de varianza de los modelos obtenidos para viscosidad en el día 21 a los diferentes gradientes de deformación estudiados..... | 252 |
| Tabla 49 | Valores promedio obtenidos τ_0 , k, n e IT al día 21. | 256 |
| Tabla 50 | Análisis de varianza de los modelos obtenidos para los parámetros reológicos al día 21 τ_0 , k, n e it..... | 257 |
| Tabla 51 | Valores mínimos y máximos observados, objetivos e impactos de cada una de las respuestas utilizados para la optimización de respuestas múltiples. | 262 |
| Tabla 52 | Valor de deseabilidad y valores óptimos concentración de almidón y gelatina. | 262 |
| Tabla 53 | Valores de las respuestas predichas y experimentales para el queso obtenido en las condiciones de optimización..... | 263 |
| Tabla 54 | Efecto del fortificante férrico sobre el pH..... | 264 |
| Tabla 55 | Efecto del fortificante férrico sobre la acidez. | 265 |
| Tabla 56 | Efecto del fortificante férrico sobre la aw. | 266 |
| Tabla 57 | Efecto del fortificante férrico sobre el porcentaje de sólidos totales, grasa, proteína, sinéresis y cenizas..... | 266 |
| Tabla 58 | Efecto del fortificante férrico sobre el parámetro de color L*..... | 267 |
| Tabla 59 | Efecto del fortificante férrico sobre el parámetro de color a*. | 267 |
| Tabla 60 | Efecto del fortificante férrico sobre el parámetro de color b*..... | 269 |
| Tabla 61 | Efecto del fortificante férrico sobre la firmeza. | 270 |
| Tabla 62 | Efecto del fortificante férrico sobre la cohesividad..... | 271 |
| Tabla 63 | Efecto del fortificante férrico sobre la consistencia..... | 272 |
| Tabla 64 | Efecto del fortificante férrico sobre la adhesividad..... | 273 |
| Tabla 65 | Efecto del fortificante férrico sobre la viscosidad. | 274 |

ABREVIATURAS

% NT = porcentaje de nitrógeno total.

°D = acidez Dornic.

ac = ácido sulfúrico

a* = Parámetro de color a (sistema CIELAB)

aw = Actividad de agua

ba = hidróxido de sodio.

b* = Parámetro de color b (sistema CIELAB)

β-Lg = Beta lactoglobulina.

BAL = Bacterias ácido lácticas.

CAA = Código Alimentario Argentino.

CMP = Caseinmacropéptido.

COD = Codificado

DBO = Demanda Biológica de Oxígeno

DF = Diafiltración

DQO = Demanda Química de Oxígeno

FAO = Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación

GMP = Glicomacropéptido

G' = Módulo elástico

G'' = Módulo viscoso

L* = Luminosidad (sistema CIELAB)

MAGyP = Ministerio de Agricultura y Ganadería.

MF = microfiltración.

N = normalidad

NF = nanofiltración.

NSLAB = Bacterias lácticas que no son del fermento

OCLA = Observatorio de la Cadena Láctea Argentina.

QDA = Análisis cuantitativo descriptivo (por sus siglas en inglés)

RO = Ósmosis inversa.

PDCAAS = Puntaje de Digestibilidad adecuada de Aminoácidos (por sus siglas en inglés).

RVD = Rango viscoelástico lineal.

UF = Ultrafiltración.

VIH = Virus inmunodeficiencia humano

WPC = acrónimo del inglés, Whey Protein Concentrate.

WPI = acrónimo del inglés, Whey Protein Isolate.

RESUMEN

El suero de quesería es conocido como uno de los principales efluentes generados por la industria láctea quesera. En algunos casos se ha podido revalorizar, siendo las que más lo aprovechan las grandes industrias, pero a nivel mundial y con una ola creciente de nuevas queserías pequeñas y artesanales, se ha visto que este líquido rico en lactosa y proteínas se ha convertido en un precursor de contaminación medioambiental. Por otro lado, desde el punto de vista del consumidor, se ha observado que existe una demanda creciente en el consumo de quesos de muy alta humedad tipo untables, debido a su versatilidad de usos y sabores. En ese sentido, el objetivo del presente estudio fue desarrollar quesos de muy alta humedad elaborados con lactosuero. Para su formulación se utilizaron algunos ingredientes como suero en polvo desmineralizado (DEMI 40), proteínas de suero (WPC-35), leche en polvo descremada, crema de leche e hidrocoloides como gelatina y almidón. Se estudió el efecto de la concentración de gelatina, almidón y grasa sobre las propiedades fisicoquímicas, reológicas, texturales y sensoriales mediante un diseño Box-Behnken con tres factores y tres niveles: gelatina y almidón (ambos en un porcentaje 0,5–0,9 %) y contenido de grasa (10–20 %). El proceso incluyó mezcla, pasteurización a 75°C, acidificación a pH 4,8–5,0, homogeneización a 50 bar y almacenamiento a 5–6°C. Los resultados mostraron que la combinación de 0,7 % gelatina y 0,7% almidón modificado con 15% de grasa minimizó la sinéresis (< 5 %), manteniendo un pH óptimo (4,8–5,0). Reológicamente, los quesos presentaron comportamiento tixotrópico, con viscosidad decreciente al aumentar el gradiente de deformación, mientras que texturalmente, esta formulación equilibrada mejoró la firmeza, cohesividad y adhesividad. Sensorialmente, replicó las características de un producto comercial en color, cremosidad y untabilidad. La optimización de respuestas múltiples confirmó que estas condiciones son técnicamente viables y económicamente competitivas, ofreciendo una solución sostenible para valorizar el lactosuero. Finalmente, a la formulación optimizada se la fortificó con diferentes fuentes de hierro, con el objetivo de obtener un alimento fortificado, observándose que el pirofosfato férrico es una adecuada alternativa para enriquecer estas matrices con hierro ya que no afecta las características sensoriales. Se concluye que los quesos untables desarrollados son una alternativa innovadora que combina calidad, funcionalidad y sostenibilidad, con potencial para escalamiento industrial.

Palabras clave: Lactosuero, queso alta humedad, gelatina, almidón modificado, optimización, fortificación.

1 INTRODUCCIÓN

1.1 LA LECHERÍA Y QUESERÍA EN ARGENTINA

Según la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación-FAO (2017), la leche es uno de los alimentos más económicos, en función a la cantidad de proteína de alto valor biológico que proporciona, siendo su precio menor que la carne o el pescado. Esta particularidad, la convierte en un recurso sumamente adecuado para enfrentar los principales flagelos a nivel mundial, como son el hambre y la malnutrición asociada a un inadecuado consumo de calorías y/o una insuficiente ingesta de aminoácidos esenciales (Chatterje, Sarkar y Boland, 2014). Cabe recalcar que, los productos lácteos son muy susceptibles a la contaminación por agentes físicos, químicos y biológicos, y si no han sido procesados higiénicamente, pueden convertirse en un riesgo para la salud de los consumidores (FAO, 2018).

Según el Observatorio de la Cadena Láctea Argentina (OCLA, 2024), en Argentina en el año 2022 la producción de leche fue de aproximadamente 11 mil millones de litros. Del volumen total de leche producida, cerca del 36% fue destinado a la elaboración de quesos, es decir una producción de alrededor de 40 mil toneladas de queso por día, entre quesos de pasta dura, semidura y blanda (MAGyP, 2021).

El queso es uno de los derivados lácteos de mayor interés, en general, por las características propias que este alimento posee. En términos generales, a nivel mundial se producen centenares de variedades de queso, muchos de los cuales son característicos de una región específica del mundo. No obstante, la mayoría de los quesos se producen en los países desarrollados. Estos pueden ser duros, semiduros, blandos, madurados o no madurados, etc. Las distintas características de los quesos derivan de las diferencias en la composición de la leche y los tipos de ésta, los procedimientos de elaboración aplicados y los microorganismos utilizados. Pero indistintamente del tipo de queso, existe una demanda creciente en el consumo de queso, sobre todo en los países en vías de desarrollo (FAO, 2013)

La elaboración de queso es seguramente la forma más antigua de procesamiento de la leche. Dependiendo del tipo de queso, puede llegar a ser un alimento valioso y económico

para el consumidor. El queso contribuye notablemente a cubrir las deficiencias proteicas de la dieta del ser humano (Spreer, 2017).

Cabe mencionar que, a partir de la elaboración de quesos, se obtiene, el suero de quesería el cual, en sus inicios era destinado principalmente a la alimentación de cerdos u otro tipo de ganadería, se lo empleaba como fertilizante, o se lo descartaba como efluente. Sin embargo, esta última alternativa representa un serio problema medioambiental, dado que se trata de un líquido con un elevado poder contaminante, que posee una demanda biológica de oxígeno (DBO) > 35.000 ppm y una demanda química de oxígeno (DQO) > 60.000 ppm, lo cual impone la implementación de costosos tratamientos previos a su evacuación. El suero tiene un color verde-amarillo debido al contenido de riboflavina. Este suero contiene cerca del 50% de los sólidos totales de la leche (Carvalho et al., 2013; Mollea et al., 2013; Khezri et al., 2016; González et al., 2017; Tsermoula et al., 2021).

Cabe destacar que la leche es una fuente valiosa de proteínas, las cuales se dividen en dos grandes grupos: las caseínas y las proteínas del suero. En términos generales, las proteínas lácteas son aproximadamente 80% caseínas y 20% proteínas del suero (Walstra et al., 2006; Fox & McSweeney, 2022).

Las caseínas constituyen el grupo mayoritario de proteínas en la leche bovina. Estas se caracterizan por ser proteínas fosforiladas altamente hidrofóbicas, que se encuentran estructuradas principalmente en forma de micelas. Estas micelas tienen la capacidad de coagular en presencia de enzimas proteolíticas o debido a la acidificación, lo que las hace particularmente importantes para la fabricación de queso y otros productos fermentados (Fox et al., 2015).

Las proteínas del suero, por el contrario, son solubles en condiciones de acidez y no forman micelas. Las principales proteínas de este grupo incluyen β -lactoglobulina y α -lactoalbúmina (Fox & McSweeney, 2022). Estas proteínas son valiosas por su perfil de aminoácidos, siendo particularmente ricas en aminoácidos esenciales y de cadena ramificada, así como por su capacidad de rápida digestión, favoreciendo un rápido suministro de nutrientes al organismo (Korhonen & Pihlanto, 2006). Desde un punto de vista tecnológico, las proteínas del suero poseen propiedades funcionales relevantes en la industria alimentaria,

tales como alta solubilidad, capacidad emulsionante, espumante y gelificante, propiedades ampliamente usadas en la elaboración de productos lácteos y no lácteos (Kinsella & Whitehead, 1989; Korhonen & Pihlanto, 2006).

1.2 PRINCIPIOS DE LA QUESERÍA

Según Veisseryre (1988), y lo que hasta la actualidad se conoce, la fabricación de un queso comprende tres fases esenciales:

- a) La formación del gel de caseína, conocido como cuajado o coagulación de la leche;
- b) La deshidratación parcial de este gel por sinéresis, es decir por contracción de la red proteica que lo forma, llamado también desuerado de la cuajada.
- c) La maduración enzimática del gel deshidratado. Esta etapa se incluye en la mayoría de las variedades. Es el afinado o maduración de la cuajada, proceso por el cual, además de permitir la proliferación de determinados microorganismos, el queso adquiere sus características particulares de *flavor* y textura de cada queso (Fox et al., 2017).

El desuerado de la cuajada no constituye solamente una simple pérdida de agua, dado que, juntamente con ésta, se separan también constituyentes solubles de la leche, lactosa y sales minerales, en cantidades más o menos grandes, así como las proteínas no floculadas (sueroproteínas) en el curso del cuajado. La coagulación y el desuerado constituyen operaciones destinadas a separar los elementos de la leche que sufrirán posteriormente la acción de los complejos enzimáticos presentes (enzimas nativas, de origen microbiano y coagulante residual) en la matriz.

La producción de todos los tipos de queso conlleva un protocolo general en común, en el cual, mediante modificaciones en alguna/s de las etapas que lo conforman, es posible obtener un producto con características deseadas.

De forma general, en la Figura 1, se presenta un esquema de las diferentes etapas de un proceso de elaboración.

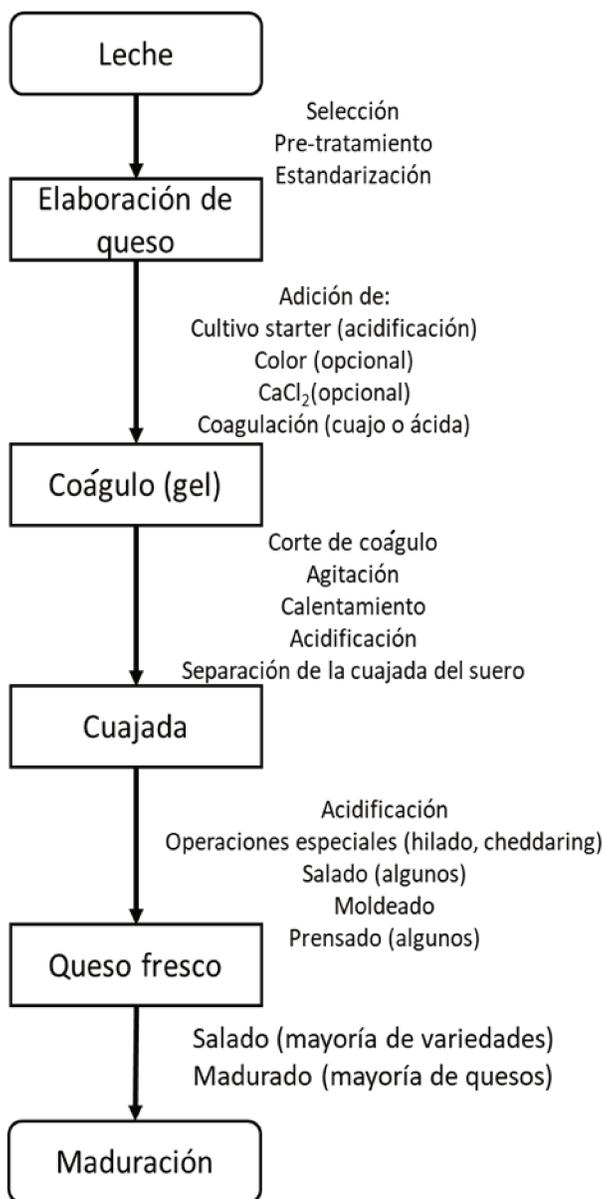


Figura 1. Protocolo general para la elaboración de quesos.

A continuación, se detallan las principales etapas que comprende la tecnología quesera, haciendo énfasis en la etapa de sinéresis y desuerado, por ser el eje central del presente trabajo de investigación.

1.2.1 Selección de la leche.

La calidad de un queso está fuertemente influenciada por la composición de la leche, especialmente por el contenido de grasa, proteína, calcio. Las principales anomalías se observan en leches de vacas en estado temprano o tardío de lactación y, principalmente, en

aquellas que provienen de animales enfermos (mastitis), las cuales deben ser excluidas. Debe estar libre de químicos y además de antibióticos que evitan el desarrollo de microorganismos incorporados de manera intencional (cultivos lácticos) (Fox et al., 2017; Spreer, 2017).

1.2.2 Normalización de la composición de la leche

Las diferentes variedades de queso tienen distintas características respecto al contenido de grasa (en base seca), de hecho, la relación entre el contenido de grasa y proteína define el “*Status* de identificación” legal para muchos tipos de queso, mientras que el contenido de humedad y, a su vez el, contenido de grasa más proteína, dependen del protocolo de elaboración. De ahí que, si la estandarización de la leche no es adecuada, no se obtendrán quesos con características reproducibles. Dependiendo de la relación requerida, se puede recurrir a diferentes procedimientos, tales como: remover algo de grasa por descremado natural o centrífugo, adición de leche descremada, crema, caseína micelar (preparada por ultrafiltración), leche en polvo, leche evaporada o el retenido de la ultrafiltración, con lo cual se incrementa el contenido de sólidos totales y, por ende, el rendimiento quesero (Johnson y Law, 2010; Fox et al., 2017).

1.2.3 Adición de calcio

El calcio juega un rol importante en la coagulación de la leche por cuajo y el subsecuente procesamiento de la cuajada por lo que una práctica común es la adición de CaCl_2 , aproximadamente (200 ppm), a los afectos de restituir la cantidad precipitada (como fosfato de calcio) durante el tratamiento de pasteurización (Candioti et al., 2009; Costabel et al., 2015; Fox et al., 2017a). No obstante, no se aconsejan adiciones de calcio superiores al 0,02%, dado que estas pueden conducir a anormalidades, como la aparición de sabores amargos (Rajinder Nath, 1993).

1.2.4 Pasteurización

A partir de 1940's, se realiza la pasteurización en la leche, con lo cual, además de asegurar la salud pública, se obtiene una uniformidad en su calidad microbiológica (Spreer, 2017). Sin embargo, el uso inapropiado de esta práctica puede causar algunos inconvenientes, como la desnaturalización de la proteína del suero, propiciando su interacción con las

caseínas entre la β -lactoglobulina (β -Lg) y la kappa-caseína, lo cual, como ya se mencionó, puede interferir con el normal proceso de coagulación. (Figura 2).

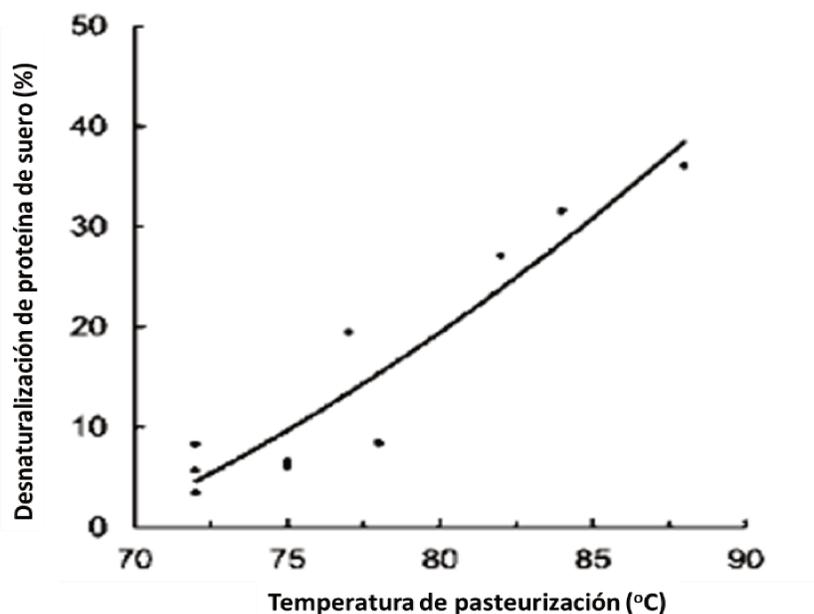


Figura 2. Efecto de la pasteurización de leche, por 15s, sobre el porcentaje de desnaturalización de las proteínas de suero.

Es por lo que el tratamiento térmico aplicado a la leche se debe realizar de la manera más moderada posible, es decir, se ha de elegir un procedimiento de pasteurización que utilice temperaturas bajas, en virtud de lo cual, se recomiendan 72-73°C por 15 s (pasteurización alta) para sistemas continuos, o bien 63-65°C por 30 min (pasteurización baja) para sistemas discontinuos. Sin embargo, no destruye los bacilos esporulados tales como las bacterias butíricas (clostridios) que son los responsables de los defectos de la fermentación gasógena, conocida como “hinchazón tardía” en los quesos de mediana y larga maduración, de pasta dura y firme (Spreer, 2017).

En la Figura 3 se presenta un proceso típico, para el acondicionamiento de leche para quesería, que comprende una etapa de estandarización y una de pasteurización.

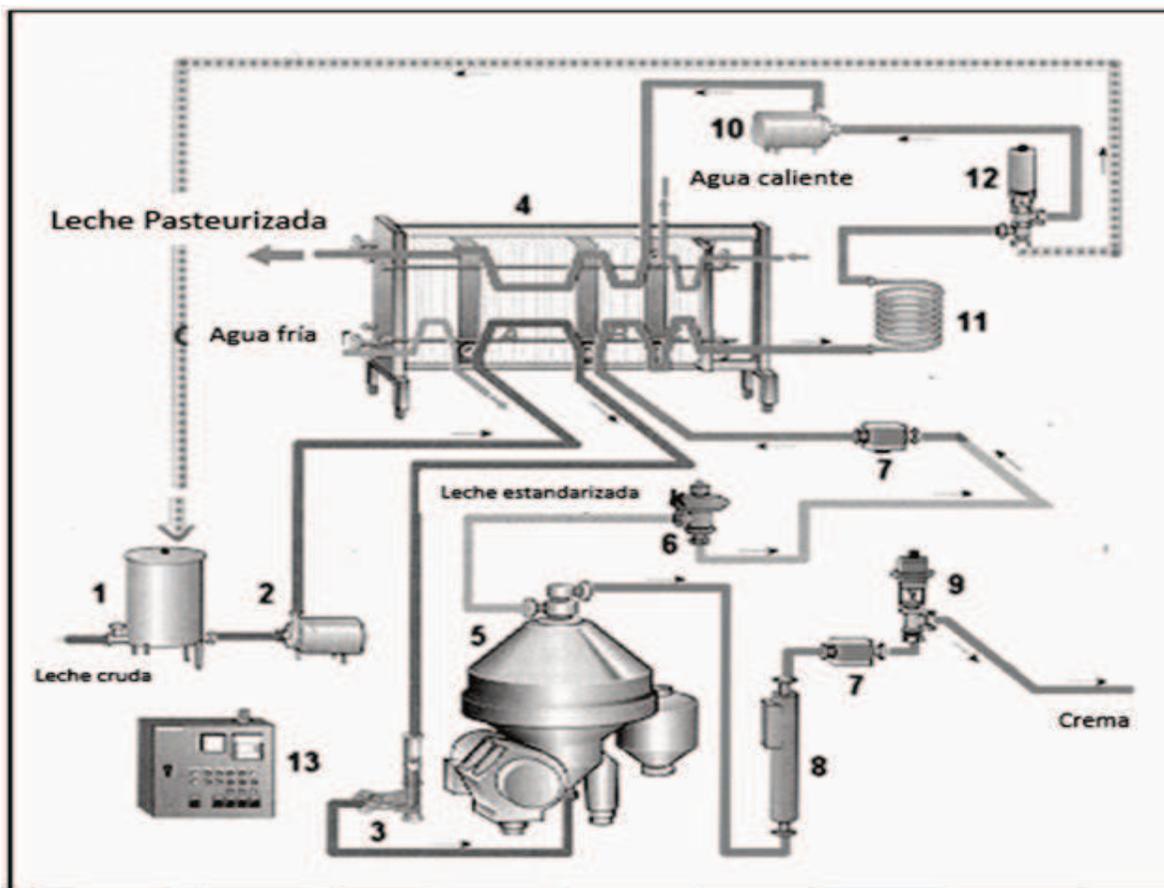


Figura 3. Esquema de estandarización y pasteurización de leche para quesería. 1) Tanque de recepción. 2) bomba de alimentación. 3) control de flujo. 4) intercambiador de placas. 5) centrifuga. 6) transmisor de flujo. 7) intercambio de calor. 8) densímetro. 9) válvula de regulación. 10) bomba. 11) tubo de residencia. 12) válvula de 3 vías. (Adaptado de Wit, 2001).

1.2.5 Acidificación.

Normalmente la producción de ácido láctico es a través de la fermentación de la lactosa, por las bacterias ácido-lácticas (BAL). Dicho proceso de acidificación depende de la naturaleza del estárter (cultivos lácticos) y el perfil de temperatura de la cuajada, propios del tipo de queso a elaborar.

De acuerdo con Fox et al. (2017), el pH de la leche es un factor crítico en la elaboración de quesos. Normalmente, la adición de 1,5-2% de estárter produce una natural e inmediata reducción de ~0,1 unidad en el pH de la leche de elaboración. Sin embargo, esto no ocurre con los fermentos concentrados de adición directa, hoy en día ampliamente difundidos, dado

que éstos no tienen un efecto acidificante inmediato, por lo que su adición se realiza entre 30-60 min antes de agregar el coagulante (Veisseyre, 1988). Por otro lado, se debe considerar, que el uso de fermentos iniciadores cumple un rol esencial en el proceso de la maduración del queso, a diferencia de la acidificación directa, cuyo efecto incide más en la textura que en el *flavor* del producto.

Entre los diferentes aspectos tecnológicos que influye la acidificación, se encuentran:

- a) Actividad del coagulante: la acidificación de la leche acerca su pH al valor óptimo del cuajo (5,5).
- b) Desnaturalización y retención del coagulante en la cuajada durante la fabricación, lo cual determina su nivel residual en el queso. Se ha demostrado que la retención de coagulantes gástricos (por ejemplo, quimosina de ternera o pepsina bovina) aumenta con la disminución del pH durante el corte de gel y en el drenaje de suero (Fox et al., 2017b).
- c) Resistencia mecánica de la cuajada, ligada al rendimiento quesero.
- d) Sinéresis del gel: controla la humedad de la cuajada y también regula el crecimiento de los microorganismos y la actividad de las enzimas existentes en el mismo, lo cual impacta en la velocidad y el perfil de maduración y, consecuentemente, en la calidad del queso terminado.
- e) Desmineralización de la cuajada: el nivel de acidificación determina el grado de disolución del fosfato de calcio coloidal, lo que modifica la susceptibilidad de las caseínas a la proteólisis durante la maduración e influye en las propiedades reológicas (especialmente en la textura) del queso. En base a ello, se considera que el máximo pH para quesos duros debe ser entre 5,0 y 5,3, en tanto que para quesos suaves como Cottage, Quarg y Crema, este valor puede descender hasta 4,6 (Fox et al., 2000).
- f) Selección microbiana: la acidificación controla el crecimiento de muchas bacterias no pertenecientes al fermento en el queso, incluyendo microorganismos patógenos y/o indeseables, como, por ejemplo, los productores de gas.
- g) Absorción de sal durante el salado: el pH del queso tiene una gran influencia en el proceso de salado, por cuanto afecta la cantidad de sal absorbida. En efecto, se

ha demostrado que a menor pH en el queso se produce una mayor incorporación de sal durante el salado en salmuera (Guinee and Sutherland, 2011).

1.2.6 Coagulación

Luego de que la leche ha sido Estandarizado, pasteurizada o sometida a otro tipo de tratamiento requerido para su acondicionamiento, se la se transfiere a la tina quesera en la que se llevará a cabo la elaboración del queso. Una vez que la leche ha sido colocada en la tina, se produce su coagulación, con el fin de obtener la cuajada del queso. Este proceso involucra tres operaciones básicas: acidificación, coagulación y deshidratación según Fox et al. (2017). El paso esencial y característico en la elaboración de todas las variedades de queso, es la coagulación de la caseína, que da lugar a la formación de un gel, que retiene todos los componentes de la leche, incluyendo la materia grasa (Fox et al.,2017). La coagulación puede conseguirse por:

- Proteólisis limitada por proteinasas selectivas (cuajo).
- Acidificación a pH ~ 4,6.
- Acidificación a pH > 4,6 (posiblemente ~ 5,2) en combinación con calor a ~ 90°C.

La forma más difundida dentro de la tecnología quesera es realizar una coagulación mediante enzimas específicas, pertenecientes al grupo de las proteasas ácidas, genéricamente conocidas como cuajo. Los principales factores que influyen sobre la coagulación de la leche son la dosis del coagulante, la temperatura y el pH.

Los geles de leche obtenidos por vía enzimática o ácida son bastante estables si se mantienen en reposo, pero cuando éstos son cortados o se rompen, se propicia la aparición nuevas interacciones entre las cadenas proteicas, que conducen a una contracción del coágulo, con la consiguiente expulsión del suero, fenómeno conocido como sinéresis. Para el presente trabajo de investigación es necesario profundizar en esta etapa, por lo cual en la Figura 4 se presenta un esquema muy simplificado del proceso de sinéresis (Walstra et al., 2006).

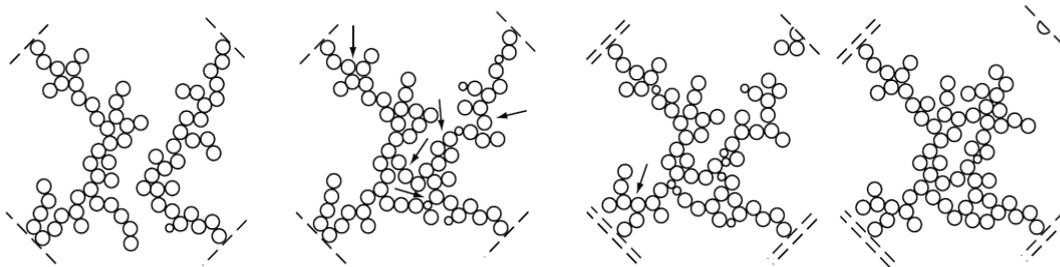


Figura 4. Representación esquemática de cadenas (hebras) de micelas de paracaseína formando nuevas uniones, que conducen a la ruptura de una de ellas y a la contracción (local) de la red de gel.

Por ello, una vez que el gel ha adquirido la consistencia adecuada, además de presentar una elasticidad y estructura determinada, se procede a trocearlo, con el propósito de obtener una gran superficie libre que permita la salida del suero intersticial o expurgue (Hui, 1993; Johnson y Law, 2010; Spreer, 2017). Es una acción que inicia de manera cuidadosa para no destruir el gel que aún es poco consistente, de manera tal de evitar pérdidas de finos (partículas de caseína) y materia grasa en el suero.

El coágulo se corta primeramente en tiras o trozos regulares de 2 a 3 cm de ancho. Los quesos de pasta dura y firme exigen un troceado adicional, y un calentamiento a agitación constante (cocción), para lograr un mayor expurgue de la fase acuosa. De hecho, cuanto más fino sea el corte del coágulo, es decir, cuanto más pequeño sea el tamaño del grano de cuajada obtenido mediante el lirado de la misma, se tendrá una mayor superficie, lo cual facilitará el drenaje del suero (Figura 5). De este modo, el tamaño final del grano de cuajada quedará definido por el tipo de queso a elaborar y, por consiguiente, por su contenido de humedad requerido (Dejmek y Walstra, 2004; Spreer, 2017). Así, en Argentina, desde hace tiempo, se ha adoptado el siguiente criterio; para quesos de pasta blanda, de alta humedad (46-54 %) como el Cremoso Argentino, la cuajada se corta hasta obtener granos del tamaño de una nuez; para quesos semiduros, de humedad intermedia (36,0 y 45,9 %), como el Pategrás o Gouda Argentino, el tamaño del grano, se aproxima al de maíz; mientras que en los quesos duros o de baja humedad (menor al 35,9 %), el grano se reduce a un tamaño equivalente al de uno de arroz, o menos (Zalazar et al., 1999).



Figura 5. Corte del gel y proceso de sinéresis.

1.2.7 Factores que afectan el desuerado de la cuajada

- Composición de la leche: especialmente por las características de las caseínas y la concentración de Ca^{+2} . La sinéresis provoca, en primer lugar, la aparición de una tensión de retracción, debida a diferentes interacciones entre las moléculas de caseína (puentes iónicos e interacciones hidrofóbicas), que estrecha las cavidades rellenas de suero, lo cual incrementa la presión a la que se encuentra sometido el suero. Esta presión hace que se expulse el suero de las cavidades, pero este flujo se ve dificultado por la resistencia que ofrece la red de paracaseinato. La magnitud de esta resistencia depende de la consistencia del coágulo y del recorrido que emprenda el suero en su desplazamiento hacia la superficie. (Lucey, 2011).
- pH del suero. Se ha demostrado que, cuanto más bajo sea el valor de pH, mayor será la retracción de coágulo y el consecuente desuerado (Lucey, 2011; Spreer, 2017), tal como se puede apreciar en la Figura 6b.
- Temperatura de cocción, La sinéresis se ve favorecida por una mayor temperatura de coagulación o de cocción. En efecto, por un lado, la temperatura reduce la viscosidad de la fase acuosa, lo que incrementa los procesos difusionales y, por ende, su escurrimiento. Por otro lado, aumenta el movimiento de cadenas proteicas en la red, lo cual propicia interacciones entre las mismas, lo

que conduce a un encogimiento de las partículas, y la consecuente expulsión del suero retenido por las mismas, como se muestra en la Figura 6a (Lucey, 2011).

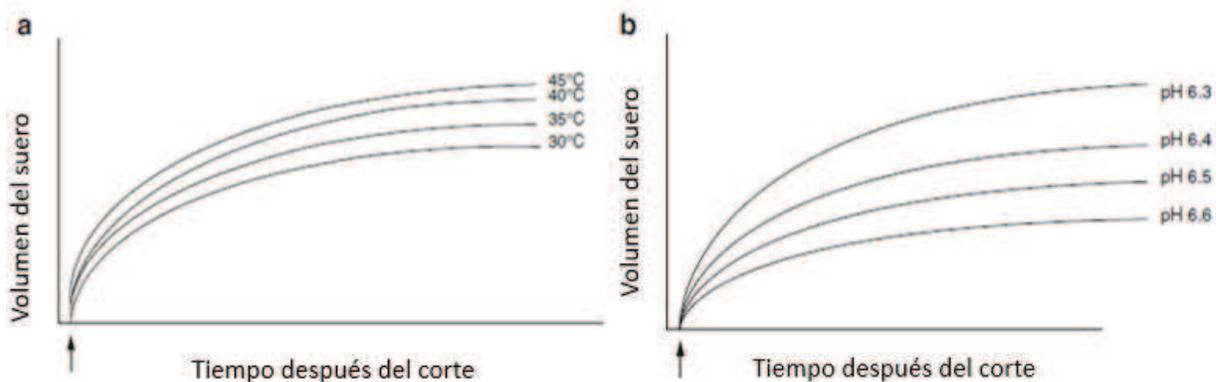


Figura 6. Efecto de la temperatura (a) y el pH (b) sobre la tasa de sinéresis en geles cortados de leche cuajada.

1.2.7.1 Agitación de la mezcla suero-cujada y dependencia del tiempo.

Como ya se mencionó, el coágulo enzimático tiende a contraerse, y esta contracción se acelera al cortar el coágulo, primeramente, en piezas cúbicas de escasos centímetros de lado y posteriormente en pequeños granos, debido a que se produce una reducción en la distancia que el suero tiene que recorrer a través de la matriz de paracaseína para alcanzar una superficie donde se libera. De este modo, durante la sinéresis, tienen lugar dos sucesos concomitantes; por un lado, la contracción de la cuajada con la consecuente reducción en su contenido de humedad y, por ende, en su peso y, por otro lado, el aumento en el volumen de suero expelido. Sin embargo, dado que las partículas de cuajada se encuentran en un medio cuyo volumen de suero es creciente, inicialmente, ambos sucesos resultan muy dependientes del tiempo, tendiendo luego a alcanzar valores estables (Figura 7a). Como consecuencia de ello, la sinéresis experimenta una marcada disminución inicial, durante aproximadamente los primeros 30 min, y luego desciende paulatinamente hasta hacerse cero (Figura 7b). (Barry, Law y Tamine, 2010).

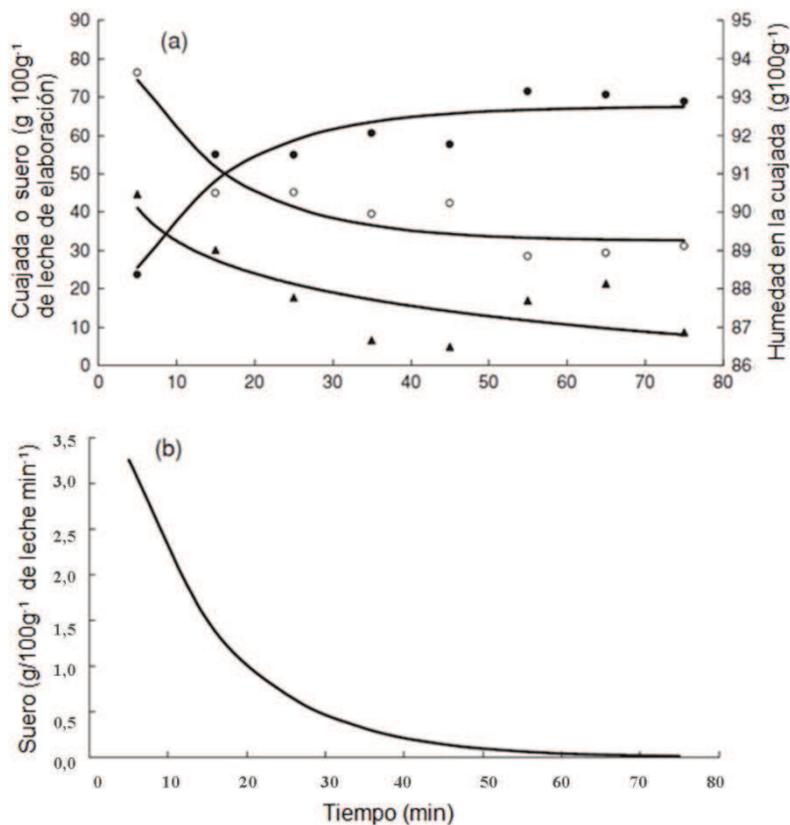


Figura 7. Efecto del tiempo de agitación en: (a) peso del suero de leche (●) y la cuajada (○) y humedad de la cuajada (▲) y (b) grado de sinéresis.

Indudablemente, el volumen de suero expurgado se verá incrementado conforme aumente la intensidad de agitación a la que se someta la mezcla suero-granos de cuajada. En la Figura 8, se puede apreciar la diferencia entre el volumen de suero expelido en función del tiempo transcurrido luego de realizar el lirado, entre una cuajada agitada y una mantenida en reposo (Walstra et al., 2006).

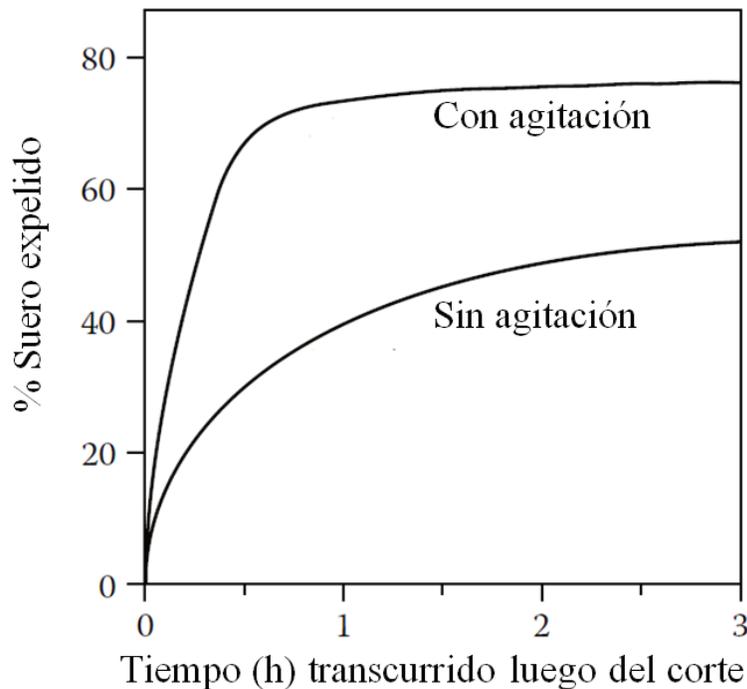


Figura 8. Volumen de suero expelido (como porcentaje del volumen original de leche) en función del tiempo después del inicio del corte, con o sin agitación. Cuajada mantenida en el suero a 38°C.

En virtud de lo expuesto, se infiere que la composición final del queso está determinada por el grado de sinéresis. Por lo tanto, una vez que la cuajada ha sido dividida hasta el tamaño requerido, mediante el efecto combinado de la temperatura (cocción), acidificación (actividad del fermento) y la acción mecánica (agitación), los granos de cuajada son llevados, por sinéresis, al nivel de humedad preciso (Zalazar et al., 1999; Dejmek y Walstra, 2004).

1.2.8 Desuerado, moldeado y prensado de la cuajada

Cuando se ha llegado al grado de sinéresis y pH deseado, la cuajada se separa del suero por alguna de las siguientes metodologías: transferencia de la cuajada a moldes con agujeros (común en variedades de queso suave como Camembert); permitiendo que la cuajada se asiente en el fondo de la tina, removiendo por succión el suero sobrenadante (Gouda, Emmental); recolectando la cuajada desde la tina utilizando telas fuertes, y colocándolas en moldes (Parmigiano Reggiano) ó drenando el suero desde la cuajada, usando tamices perforados (cheddar, queso para pizza) (Fox et al., 2017). El tratamiento de la cuajada deberá

ser con mayor delicadeza cuánto más elevada sea su humedad, es decir, cuánto más blanda sea su estructura.

Los moldes son principalmente plásticos (raramente metálicos o de madera), y su forma puede rectangular o circular, cuyas dimensiones le son transferidas a la masa de queso.

En los quesos de pasta blanda o de alta humedad (no cocidos) tal, como el Cremoso Argentino, se implementa un ligero prensado, que puede ser por el propio peso de la cuajada, o bien mediante el apilamiento de dos o tres moldes (Figura 9a). En este caso, se emplean moldes cuadrados de 24 x 24 cm de lado, y ~15 cm de alto, que se colocan en un ambiente templado para facilitar el desarrollo del estárter, y que comiencen a acidificar la pasta. Una vez que el pH de la cuajada alcanza su valor final de 5,1-5,2 (lo que equivale a una acidez de unos 65 °Dornic), lo cual puede tardar entre 2 y 3 horas, dependiendo de la actividad del fermento, los quesos se extraen de los moldes y se sumergen en salmuera a 5 °C, para detener inmediatamente el proceso de acidificación.

Por el contrario, cuando se trata de quesos duros o semiduros, el prensado es más intenso, y por ello se recurre a medios externos, conocidos como prensas, en las cuales se aplica una adecuada presión a los moldes (Figura 9b). En este caso, los quesos se mantienen bajo tales condiciones por un período de aproximadamente 12 horas para los quesos semiduros y 24 horas para los duros (Zalazar et al., 1999).

Durante la permanencia de la cuajada en los moldes, éstos se voltean periódicamente; de 8 a 10 veces (inicialmente cada 15-30 min, luego cada 1-2,5 horas dependiendo del tipo de queso), de 5 a 8 veces a los efectos de favorecer la salida del excedente de suero y para que adquieran un formato lo más homogéneo posible (Zalazar et al., 1999; Spreer, 2017).



Figura 9. a) Quesos blandos: leve prensado de la masa por apilamiento de dos (o tres) moldes por superposición de moldes. b) Quesos duros o semiduros: prensado intenso mediante el empleo de prensa.

1.2.9 Salado

Si bien el salado es la última operación en un proceso de elaboración de queso, su rol en el desarrollo de las características del producto final es esencial. En efecto, la incorporación de NaCl a la matriz caseosa cumple las siguientes funciones (Hardy, 1990; Spreer, 1998^a; Guinee, 2004; Melilli et al., 2004; Cuffia et al., 2015; Fox et al., 2017c):

- a) Contribuye al sabor del queso (función gustativa): La sal interactúa con las sustancias sápidas propias del queso, enmascarando o exaltando sabores, haciéndolo más agradable al paladar del consumidor.
- b) Completa el desuerado de los quesos (expurgue terciario): Durante el proceso de salado, en virtud de un efecto osmótico, concomitantemente con el ingreso de la sal, se produce la evacuación de una cierta cantidad de suero desde su interior. No obstante, si bien el salado promueve la sinéresis, no constituye un factor adecuado para controlar la humedad del queso, dado que la presencia de sal en la masa conlleva otros efectos que pueden alterar la calidad del producto (Fox y McSweeney, 1998).
- c) Controla la actividad microbiológica y enzimática: El aumento de la concentración salina dentro del queso inhibe varias reacciones enzimáticas y evita el desarrollo de microorganismos contaminantes (en especial aquellos responsables del fenómeno de hinchamiento). Este mecanismo se produce básicamente por la disminución en la actividad del agua (a_w) que realiza la sal en el interior del queso.

- d) Regula ciertas características reológicas de la pasta: La sustitución de Ca^{+2} por Na^{+} en la masa, le confiere ternura, haciéndola más esponjosa y menos plástica.
- e) Propicia la formación de la corteza: El proceso de salado en salmuera contribuye a la formación de una corteza más rígida que protege mecánicamente al queso, manteniendo más definida su forma.
- f) Permite controlar el proceso de acidificación en quesos blandos termoestabilizados, dado que, al ser colocados en la salmuera (aproximadamente a unos 5 °C), su temperatura desciende rápidamente, hasta ~10 °C, lo cual retarda el desarrollo de los fermentos termófilos.

Una salmuera es simplemente una solución concentrada de NaCl en agua (por lo general, en el orden del 20-22 % p/p), a la que suele agregarse también cloruro de calcio (0,2-0,3 % p/p). Sin embargo, con el tiempo de uso, se van incorporando otras sustancias procedentes del queso, en especial sustancias solubles transportadas por el suero durante el expurgue terciario, como ser; proteínas solubles, nitrógeno no proteico, lactosa y sales minerales (principalmente Ca^{+2} , K^{+} , Mg^{+2} , Fosfato, etc.). Normalmente, las concentraciones más utilizadas para el salado son 20-22 % (algunos autores indican hasta un 25 %) de sal para los quesos duros y 16-18 % para los quesos blandos, mientras que, para algunos salados breves y excepcionales, se usan salmueras diluidas (12-14 %) (Gauna, 2005).

La absorción de sal en el queso durante el salado depende de numerosos factores. Entre los más relevantes se pueden mencionar; concentración de la salmuera, composición del queso (principalmente contenido de humedad y pH), tamaño y geometría de la horma, tiempo y temperatura de salado, etc. (Guinee, 2004; Guinee y Sutherland, 2011; Fox et al., 2017c).

1.2.10 Maduración del gel deshidratado

El proceso de maduración de un queso es un complejo conjunto de fenómenos físicos, bioquímicos y biológicos que producen la transformación de la cuajada insípida, inodora y de pobre textura, en un producto final de características organolépticas muy apreciadas. Así, a través de Efecto que afectan tanto a la lactosa, como a las proteínas y las grasas, durante la maduración se desarrollan los atributos de aroma, sabor, olor, textura, que son propios de cada variedad (Zalazar, 1994; Fox et al., 2000; Bergamini et al., 2010; Fox, 2017a).

Esencialmente, durante el proceso de maduración ocurren tres fenómenos fundamentales:

- a) Glicólisis: Como ya se mencionó, la acción primaria de los cultivos lácticos es la acidificación del medio, a partir de la producción de ácido láctico, resultante de la metabolización de la lactosa (Reinheimer, 1994). Luego, durante la maduración, continúa el metabolismo de la lactosa residual y, posiblemente del citrato y lactato (Fox y McSweeney, 1998; Fox. et al., 2017a).
- b) Proteólisis de la caseína: La hidrólisis de la caseína es uno de los fenómenos más importantes y primarios de la maduración (Sousa et al., 2001). La caseína insípida e insoluble retenida en la cuajada se hidroliza enzimáticamente, dando origen a compuestos más simples, y solubilizándola en mayor o menor grado. A consecuencia de ello se producen importantes Efecto en el sabor y aroma del queso, así como también, en su aspecto y consistencia (Visser, 1993; Hynes et al., 1999). El proceso de proteólisis se inicia a través de la acción de la enzima coagulante que, comienza con la ruptura del enlace peptídico Fen₁₀₅-Met₁₀₆ de la kappa-caseína (κ -CN), tras lo que se libera su segmento hidrofílico (106-169) denominado glico-macropéptido (GMP) o caseíno-macropéptido (CMP), lo cual conduce a la coagulación de la leche. Sin embargo, dependiendo del tipo de coagulante empleado y de cuánto de éste quede retenido en la cuajada (aproximadamente en un 10 %), su acción hidrolítica sobre la caseína continuará, dependiendo de su estado y de las condiciones del medio (pH, actividad acuosa, temperatura, etc.). Si bien la proporción de compuestos de bajo peso molecular es relativamente baja, los compuestos producidos por el coagulante sirven como sustrato a las proteasas microbianas, ya que la mayoría de las bacterias lácticas no actúan directamente sobre la caseína, por no poseer enzimas apropiadas (Zalazar, 1994; Zalazar et al., 1994; Candiotti et al., 2009).

Paralelamente, a la acción proteolítica desarrollada por las bacterias del fermento, se suma la que producen otros microorganismos de distinto origen, como por ejemplo los agregados como fermento secundario, los pertenecientes a la flora natural de la leche,

bacterias lácticas que no son parte del fermento (NSLAB), los provenientes del medio ambiente, etc. (Wolf et al., 2011; Oliszewski et al., 2013; Fox et al., 2017a).

c) Lipólisis de la materia grasa: La hidrólisis de los triglicéridos en glicerina y ácidos grasos, es llevada a cabo por las enzimas llamadas lipasas. Subsecuentemente, los ácidos grasos libres, por efecto de otras enzimas, son parcialmente transformados en compuestos tales como metilcetonas, ésteres, alcoholes y lactonas. Estos Efecto tienen una importancia decisiva en la determinación de las características finales del queso. En efecto, los ácidos grasos de cadenas cortas (butírico, caproico, caprílico, cáprico) son muy influyentes en el sabor y aroma de los quesos, al igual que las metilcetonas provenientes de a degradación de ácidos grasos (Wolf et al., 2009).

1.3 LACTOSUERO

1.3.1 Suero de quesería

Según el Código Alimentario Argentino (2018), con la denominación de sueros de lechería, se refiere a los líquidos formados por parte de los componentes de la leche, que resultan de diversos procesos de elaboración de productos lácteos, tales como:

- Suero de queso: es el subproducto líquido remanente de la elaboración de quesos, siendo el de mayor producción.
- Suero de manteca: es el subproducto líquido proveniente del batido de la crema en la obtención de manteca.
- Suero de caseína: es el subproducto líquido derivado de la obtención de caseínas.
- Suero de ricotta: es el líquido resultante de la precipitación por el calor, en medio ácido, de las proteínas solubles contenidas en el suero de queso.

Cuando estos productos se utilicen como materias primas para la elaboración de otros productos alimenticios, deberán ser pasteurizados o esterilizados, antes o durante su procesamiento, no debiendo presentar un recuento mayor de 100 bacterias coliformes por gramo después del tratamiento térmico. Queda prohibido alimentar animales con sueros de lechería que no hayan sido pasteurizados o esterilizados. Se exceptúan de esta exigencia los sueros provenientes de procesos de elaboración en los que se aplicaron dichos tratamientos (CAA, 2018).

Por otra parte, el avance de la ciencia permitió descubrir que este subproducto de la quesería representa una excelente fuente de proteínas funcionales de alto valor biológico y péptidos bioactivos, lípidos, vitaminas, minerales y lactosa (Smithers, 2008; Mollea et al., 2013; Moatsou y Moschopoulou et al., 2021). Se estima que la producción mundial de suero es alrededor de 160-190 millones de toneladas por año, del cual, aproximadamente el 50 % es descartado (Fox et al., 2017; Pires et al., 2021; Karim y Aider, 2022).

El elevado valor biológico que exhiben las proteínas del suero deriva de su conformación aminoacídica sumamente favorable, por cuanto no son deficientes en ningún aminoácido esencial (Figura 10). Proporcionalmente, tienen mayor contenido de aminoácidos azufrados (metionina y cisteína) que la caseína. La cisteína es importante para la síntesis de glutatión, un tripéptido con propiedades antioxidantes, anti carcinogénicas e inmuno estimulatoria (Bounous, 2000). Además, las proteínas del suero constituyen un buen recurso de aminoácidos de cadena ramificada, como isoleucina, leucina y valina que tienen la capacidad de reducir el desgaste muscular en condiciones en las que se incrementa la descomposición de proteínas, lo que hace del suero un alimento particularmente beneficioso para los atletas. Asimismo, la leucina presente en el suero, juega un rol fundamental en la formación del músculo, además de arginina y lisina, las cuales incrementan la secreción de hormona de crecimiento, un estimulante del desarrollo del músculo. Por otro lado, las proteínas de suero lácteo pueden ser importantes para individuos que intentan mantener o bajar de peso, gracias a que su consumo incrementa la saciedad. Se ha reportado que las proteínas de suero tienen potencial para prevenir y tratar la diabetes, enfermedades cardiovasculares, enfermedades del hígado, enfermedades relacionadas al sistema inmunológico, control de obesidad, entre otras (Vasconcelos et al., 2021; Lesgards, 2023). Según Mangano, Bao y Zhao (2019), algunos ensayos clínicos han mostrado que las proteínas de suero tienen efecto benéfico en el tratamiento del cáncer, virus inmunodeficiencia humano (SIDA), hepatitis B, enfermedades cardiovasculares, osteoporosis y también como agente antimicrobiano.

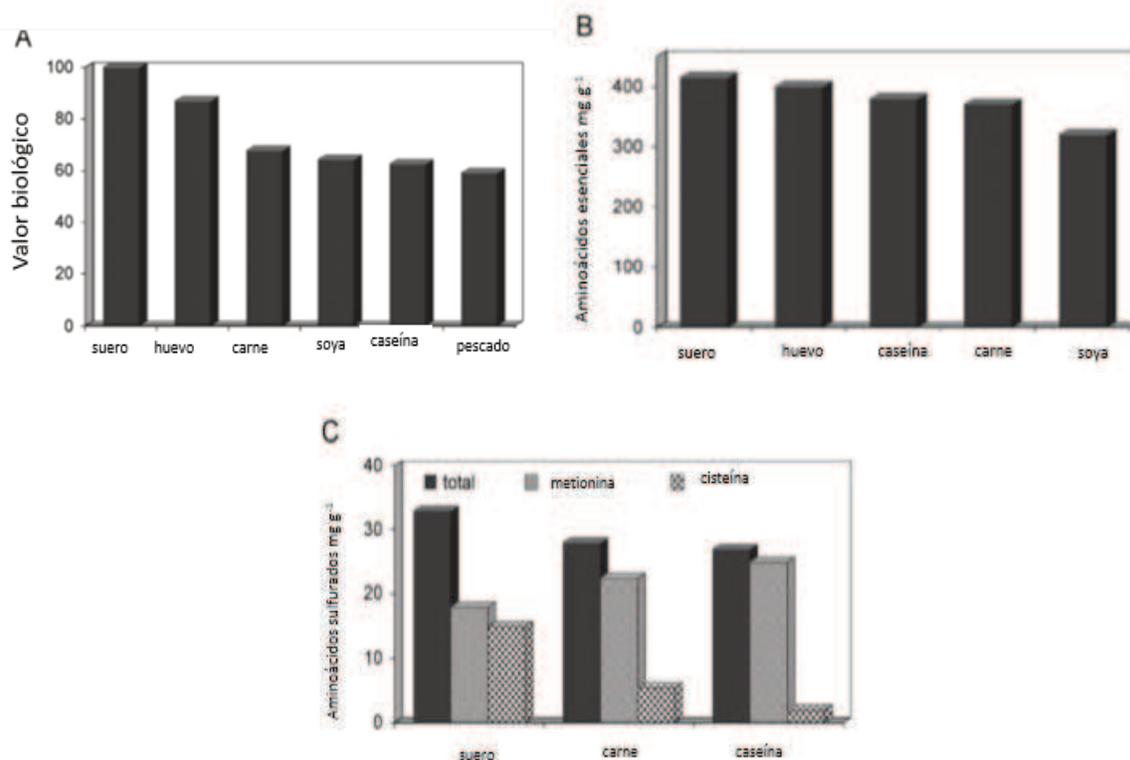


Figura 10. Valor nutricional de la proteína de suero cuando se compara con otras fuentes proteicas comestibles, para valor biológico (A), contenido de aminoácidos esenciales (B) y contenido de aminoácidos sulfurados (C). (Smithers, 2008 modificado).

Asimismo, el puntaje de digestibilidad adecuada de aminoácidos (PDCAAS, por sus siglas en inglés) de la proteína de suero es 1, siendo este el mayor puntaje posible, y excede al de la carne, el trigo y las nueces (Smithers, 2015).

Por otro lado, se ha demostrado que las proteínas del lactosuero exhiben excelentes propiedades funcionales, que pueden impartirse o bien mejorar las de los alimentos a los que se las integre. En este sentido, una de las operaciones a las que se someten las proteínas del suero, es la texturización mediante la extrusión de concentrados de proteínas del suero o WPC (acrónimo del inglés, Whey Protein Concentrate) o de aislados de proteínas de suero o WPI (acrónimo del inglés, Whey Protein Isolate), los cuales se describen más adelante (Wang, Killpatric y Humphrey, 2019).

Todo esto hace que el suero de quesería sea un producto muy requerido, no sólo por sus proteínas, sino también por su contenido de lactosa y minerales. De hecho, se ha llegado a

afirmar que en ciertos países se lo considera el producto principal, siendo el queso el subproducto (Miller et al., 2007; Tunnick, 2008; Smithers, 2015; Guo y Wang, 2019).

El suero fresco pasteurizado, es raramente usado en su forma líquida original, ya sea como alimento o para consumo animal, debido a su alto costo de transporte y a la susceptibilidad al deterioro durante el almacenamiento (Miller et al., 2007; Lappa et al., 2019). Sin embargo, el elevado gasto que demanda la adquisición e instalación de equipos para el procesamiento de suero de leche ha impedido que algunas plantas elaboradoras de queso, más pequeñas y antiguas puedan procesar y vender este subproducto.

1.3.2 Tipos de suero

Se pueden distinguir dos tipos de suero de quesería según cuál sea el proceso de elaboración, estos son suero dulce y suero ácido. El primero, de mayor profusión, se obtiene a partir de la desestabilización enzimática de la caseína. En este caso, las enzimas coagulantes, a través de una proteólisis limitada, catalizan la ruptura del enlace peptídico Fen105-Met106 de la κ -caseína, lo que conduce a la agregación de las micelas modificadas, dando como resultado la formación de un gel que engloba todos los componentes de la leche (Smithers, 2015). Por el contrario, el suero ácido no involucra una acción enzimática, sino que es resultado de una coagulación ácida exógena y/o láctica de las micelas de caseína, cuya carga eléctrica neta superficial (potencial Z) ha sido neutralizada al haber descendido el pH del medio hasta su punto isoeléctrico (pH 4,6), normalmente como resultado de una fermentación láctica y/o agregado externo de ácido/s. Este fenómeno, como se indicó anteriormente, conlleva la desmineralización de las micelas y la pérdida de su estructura. Por lo que este suero contiene más del 80 % de los minerales presentes en la leche de partida, aunque su tenor de lactosa se ve reducido a causa de la fermentación láctica. Además, dado que se trata de un producto que posee una elevada acidez, la mayoría de sus aplicaciones requiere una neutralización (Tunnick, 2008; Fox et al., 2017; Parzanese, 2017).

En la Tabla 1 se presentan los valores medios de la concentración de las principales sustancias presentes en un suero dulce y un suero ácido.

Tabla 1 Composición del suero del leche dulce y ácido

| Constituyente | Suero Dulce | Suero Ácido |
|-----------------------------|-------------|-------------|
| | % | % |
| Sólidos totales | 6 | 6,4 |
| Agua | 94 | 93,6 |
| Grasa | 0,05 | 0,05 |
| Proteína verdadera | 0,60 | 0,60 |
| NPN (Nitrógeno no proteico) | 0,20 | 0,20 |
| Lactosa | 4,5 | 4,6 |
| Ceniza (Minerales) | 0,5 | 0,8 |
| Calcio | 0,035 | 0,12 |
| Fósforo | 0,040 | 0,065 |
| Sodio | 0,045 | 0,050 |
| Potasio | 0,14 | 0,16 |
| Cloro | 0,09 | 0,11 |
| Ácido láctico | 0,05 | 0,05 |

Fuente: Tetrapak, 2017 modificado

A pesar de la gran similitud existente en la concentración de la mayoría de los constituyentes, se ha comprobado que, de estos dos tipos de suero, el dulce posee mejores aptitudes para el procesamiento y obtención de subproductos de mayor valor agregado. Éste contiene aproximadamente 95 % de lactosa, 25 % de proteínas y 8 % de la materia grasa que contiene la leche y, es por lo que, desde hace mucho tiempo, se observó la posibilidad de reutilizarlo para distintos fines (Parzanese, 2017).

Es importante destacar que, cualquiera sea el origen del suero, su acidez continuará aumentando mientras los microorganismos presentes, principalmente del *starter* prosigan desarrollándose, a menos que este crecimiento sea retrasado por procesos térmicos o refrigeración. Por lo tanto, si no se realiza ninguna práctica que frene la actividad microbiana, el suero dulce puede convertirse en suero ácido (Zall, 1992).

Actualmente, con el desarrollo de las nuevas tecnologías de procesamiento, algunos investigadores procuran obtener nuevos productos a base de suero y, para ello, deben tener en cuenta que el suero no es un producto de características uniformes, y que las diferencias entre unos y otros se acentúan según su estado (nativo, condensado, secado o fraccionado por membranas, desionizado o si pasó a través de un sistema de electrodiálisis).

1.4 PROCESAMIENTO DEL SUERO

1.4.1 Pretratamiento

Después de retirar el queso de la tina, el suero pasa a través de un tamiz metálico con el fin de eliminar los pequeños restos de caseína o finos contenidos en el mismo. Los finos son reintegrados a la cuajada y el suero se conduce a un tanque de recepción, desde donde luego se lo pasa aun clarificador centrífugo o una malla muy fina, para remover las partículas muy pequeñas que lograron atravesar el primer tamiz. Si el suero no se procesa inmediatamente, se debe mantener a temperaturas menores a 4 °C (Spreer, 2019).

Finalizada esta etapa, el suero está libre de partículas finas, pero aún posee restos de grasa en forma globular, para cuya eliminación se lo calienta a unos 50-55 °C para que la grasa se vuelva líquida. Bajo estas condiciones, la grasa puede ser luego separada por centrifugación, de modo que sólo un 0,05 % permanezca en el suero.

Una vez que el suero ha sido desprovisto de los restos de caseína y materia grasa, se lo depura microbiológicamente por pasteurización a 72–74 °C por 17–20 s. Con este tratamiento se eliminan las bacterias provenientes de los cultivos utilizados para la elaboración del queso, junto con otros microorganismos que también puedan estar en el suero (Page et al., 2014). Una vez pasteurizado, el suero se mantiene refrigerado a menos de 4 °C hasta el momento de ser utilizado, y se recomienda que luego del descremado se adicione 0,05 % de peróxido de hidrógeno o 0,5 % de sulfato de sodio o magnesio (Johnson y Law, 2010; Spreer, 2019).

En la Figura 11 se presenta un esquema de las diferentes etapas que conforman el pretratamiento del suero.

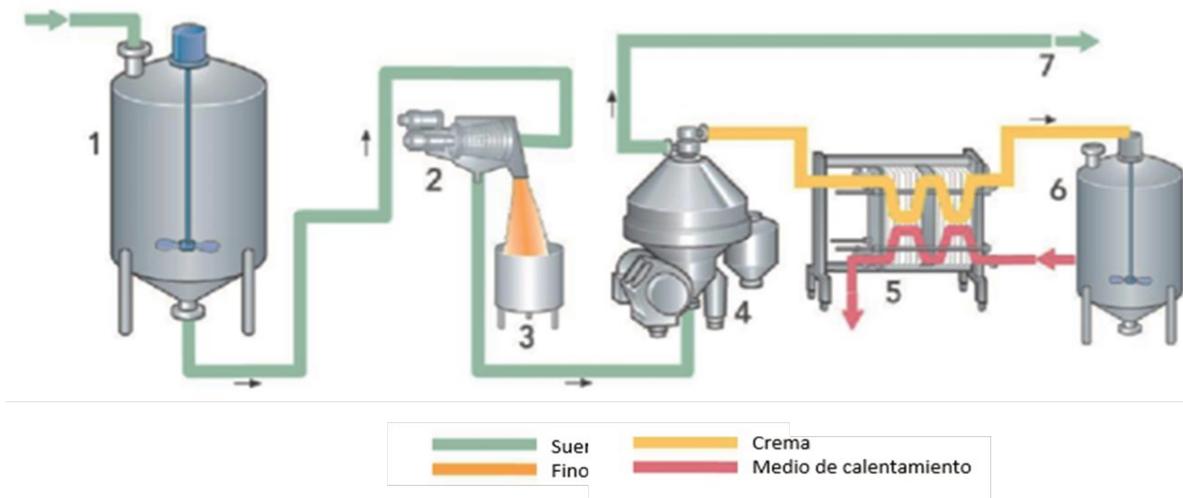


Figura 11. Esquema del pre tratamiento del suero. 1) tanque receptor del suero; 2) clarificador; 3) tanque colector de finos 4) separador de crema; 5) pasteurizador 6) tanque colector de la crema del suero; 7) línea de suero a los tratamientos subsiguientes (Tetra Pak, 2017).

El suero clarificado obtenido puede utilizarse en diversos tipos de alimentos, especialmente en bebidas (Fox et al., 2017). Asimismo, el suero clarificado es el paso previo para la concentración, fraccionamiento por membranas, cristalización, secado, entre otros (Cortez Latorre, 2018).

1.4.2 Derivados de suero y sus tecnologías

Según Muset y Castells (2017), existen algunos parámetros generales de calidad que debe cumplir el suero para su utilización como materia prima, en la elaboración de ingredientes y de productos de consumo directo. Si bien, algunos parámetros pueden variar, dependiendo del tratamiento posterior, en general un suero dulce debería cumplir con los siguientes requerimientos:

- pH entre 6,0 y 6,6
- Acidez 1-2 g L⁻¹ ácido láctico
- Contenido de proteína mínimo 0,7 g 100 g⁻¹.
- Materia grasa 0.05 %.
- Partículas de queso o finos de caseína < 0,02 %
- Nitrato < 3 ppm

- Nitrito < 1 ppm
- Ausencia de colorantes
- Libre de antibióticos
- Peróxido negativo
- Recuento total < 1000 ufc mL⁻¹
- Coliformes < 50 ufc mL⁻¹
- *Bacillus cereus* < 1 ufc mL⁻¹

Las alternativas tecnológicas existentes para industrializar suero de quesería son varias dependiendo del producto que se desea obtener (Figura 12) (Castells, 2017).

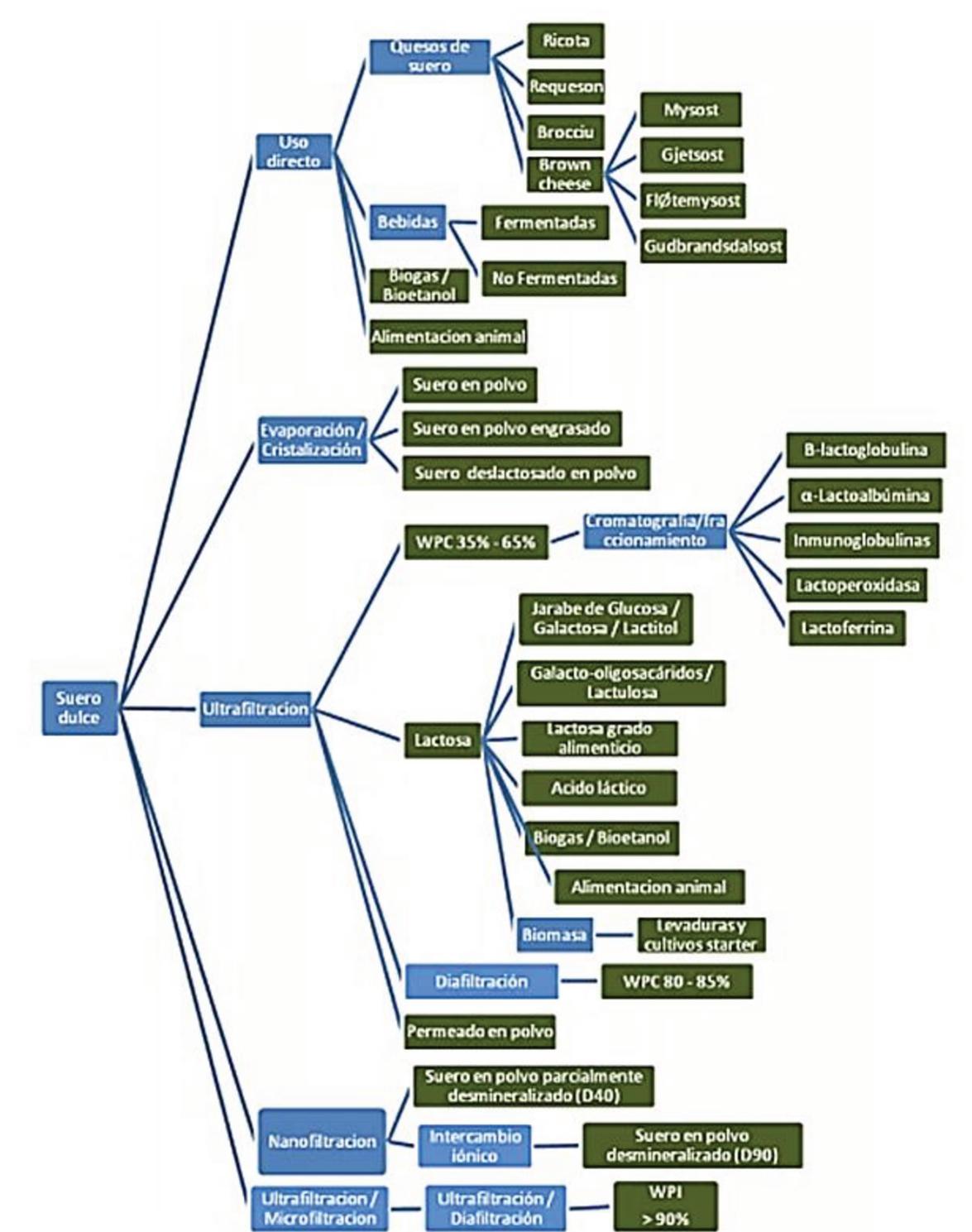


Figura 12. Alternativas para la industrialización de suero de quesería (Castells, 2017)

1.4.2.1 Queso de suero

Los quesos de suero son elaborados prácticamente en todo el mundo y son conocidos con nombres diferentes, como por ejemplo ricotta o requesón. La ricotta, es un queso suave color crema, sin olor, de sabor dulce y sin madurar (Fox et al., 2000; Castells et al., 2017). Su composición media (expresada en % p/p), es: 73,2 % de humedad, 11,3 % de proteína, 10 % de materia grasa y 0,4 % de NaCl. Una estrategia para producir ricotta es partir de un suero con acidez entre 10 y 11 °D, el cual se termostatiza hasta alcanzar 60 – 65 °C, se adiciona 5% de leche (incrementa el rendimiento en un 5 %), posteriormente se calienta hasta 85 °C (aparecen flóculos). A continuación, se adiciona ácido cítrico o acético hasta alcanzar un pH de 4,3 y se calienta lentamente hasta 90 °C. Aflora la ricotta, a la cual se la compacta y seca, luego se la extrae del suero de ricotta y se coloca en molde, para finalmente desueralarla, enfriarla y envasarla (Porrás, 1999; Meinardi, 2015). No obstante, la elaboración de ricotta no resulta una solución completa al uso del suero, ya que supone la generación de otro subproducto, como es el suero de ricotta o también conocido segundo suero de queso, que aún contiene valores altos de materia orgánica debido a la gran concentración de lactosa y ácido láctico remanente (Castells et al., 2017; Pires et al., 2021).

1.4.2.2 Suero en polvo dulce

Los polvos de suero han sido producidos por muchos años y tienen numerosas aplicaciones en la industria de alimentos, como por ejemplo en productos de panadería, cárnicos y helados.

A través de variaciones en los procesos de producción, se pueden obtener distintos tipos de sueros en polvo, tales como suero en polvo no higroscópico, suero en polvo desmineralizado, suero en polvo deslactosado y deslactosado/desmineralizado. Indudablemente, la implementación de estos procedimientos expande su rango de aplicación, pero también incrementan su costo (Fox et al., 2017a).

La lactosa representa cerca del 70 % de los sólidos del suero y es difícil de cristalizar. Esto representa un serio inconveniente, por cuanto si no se promueve una adecuada cristalización de dicho azúcar, el polvo de suero se vuelve higroscópico, haciéndolo inestable en el almacenamiento. Es por lo que, para la obtención de suero en polvo no higroscópico,

previo a la etapa de secado, se lo concentra hasta un 50-60 % de sólidos, y se siembra con cristales de lactosa para inducir la cristalización (Fox et al., 2017c). El producto así obtenido, cuya vida útil se estima en 6-12 meses, debe transportarse y almacenarse en un ambiente fresco y seco, a temperaturas inferiores a 27 °C y una humedad relativa inferior al 65% (Page et al., 2014).

1.4.2.3 Suero en polvo desmineralizado

El suero de leche desmineralizado se obtiene al eliminar una porción de los minerales del suero de leche pasteurizado. Los niveles típicos de desmineralización son del 25 %, 50 % y 90 %. El producto seco no puede exceder el 7 % de cenizas. El suero desmineralizado se produce mediante técnicas de separación tales como intercambio iónico, diafiltración o electrodiálisis (Page et al., 2014). El suero en polvo desmineralizado es frecuentemente utilizado para el desarrollo de fórmulas infantiles. La leche humana contiene más lactosa (~7 %) y menos caseína que la leche bovina (~ 1 % de proteína total), lo cual eleva la relación proteína de suero:caseína al 60:40, en comparación con el 20:80 que presenta esta última. Por ello, la mayoría de las formulaciones infantiles, basadas en leche bovina, se maternizan ajustando su contenido de lactosa y su relación entre las proteínas del suero: caseína, a los valores de la leche humana. Esta corrección suele hacerse con la adición de suero de leche bovino y leche descremada. Sin embargo, debido a que la concentración de sales en la leche bovina es 3-4 veces más alta que la leche humana, lo que representa una carga renal alta para el bebé, se emplean técnicas de electrodiálisis y/o intercambiadores de iones para reducir la cantidad de iones en el suero. (Fox et al, 2017c).

1.4.2.4 Proteína de suero concentrada (WPC) y proteína de suero aislada (WPI)

Las técnicas de filtración por membrana se han convertido en las más difundidas. Estas tecnologías, destinadas a la separación de compuestos, se basan en el empleo de membranas semipermeables, mediante las cuales se efectúa la operación de filtrado por flujo cruzado, aplicando una presión controlada sobre el material a fraccionar. A partir de esta operación se obtienen dos corrientes: el permeado o filtrado, que contiene aquellos compuestos que atraviesan la membrana (normalmente se deshecha) y el retenido o concentrado, que se compone de las sustancias aprovechables que se desean mantener en el producto final, la cual

está determinada por el tamaño de sus poros. Se distinguen cuatro tipos de operaciones por membrana: ultrafiltración (UF), microfiltración (MF), nanofiltración (NF), y ósmosis inversa (RO), como se muestra en la Tabla 2 (Wit, 2001; Tunick, 2008; Page et al., 2014; Parzanese, 2017).

Tabla 2 Tipos de tecnologías de membranas y sus características (modificado de Tunick, 2008).

| Tipo | Tamaño de poro (nm) | Componentes retenidos | Peso molecular (KDa) |
|-------------|--------------------------------|--|---------------------------------|
| MF | 20 - 4000 | Bacterias, micelas de caseína, glóbulos grasos | 100 – 500 |
| UF | 20 – 200 | Proteínas de suero | 1 – 100 |
| NF | <2 | Lactosa | 0,1 - 1 |
| OI | <2 | Iones | <0,1 |

Asimismo, en base a las distintas combinaciones de estos procedimientos, resulta posible obtener polvos con diferente contenido de proteína (Tabla 3) (Tunick, 2008).

Tabla 3 Composición típica de suero líquido y seco.

| Producto | Proteína | Lactosa (g L⁻¹ Suero) | Minerales |
|-----------------|-----------------|---|------------------|
| Suero dulce | 6-10 | 46-52 | 2,5-4,7 |
| Suero ácido | 6-8 | 44-46 | 4,3-7,2 |
| | | g 100 g⁻¹ polvo | |
| WPC-35 | 35 | 50 | 7,2 |
| WPC | 65-80 | 4-21 | 3-5 |
| WPI | 88-92 | <1 | 2-3 |
| UF permeado | 1 | 90 | 9 |

La UF del suero permite una concentración selectiva de la proteína, la cual cuando ésta es secada, se la conoce como proteína de suero concentrada (WPC). El WPC puede contener entre el 20-89 % de proteína, aunque el más común es el WPC con 35 % de proteína.

Mediante una combinación de UF y diafiltración (DF) es posible remover los minerales y la lactosa desde el retenido, lo que permite la obtención de WPC con el 50 % de proteína (Walstra et al, 2006; Tunick, 2008). Debido a que la cantidad de retenido en la microfiltración es pequeña, la técnica más común para la recuperación de proteína es la UF.

Sin embargo, a pesar del uso de estas tecnologías, existe también un efluente desproteinizado (permeado) rico en lactosa, que requiere una DBO mayor a 30 kg m^{-3} , siendo este también una fuente de contaminación importante (Lappa et al., 2019).

1.4.3 Consideraciones y usos de los derivados de suero

En el pasado, el suero fue considerado como una cura para diversos tipos de enfermedades y, en virtud de ello, ha sido usado en baños termales o bien como medicina. Sin embargo, el incremento en la producción de suero y polvos de suero, cuyo costo es inferior al de la leche descremada en polvo, estimuló su uso como suplemento nutricional en la alimentación de animales. La introducción de las técnicas de separación y aislamiento de los componentes de suero amplió las posibles aplicaciones en productos alimenticios. Hoy en día, los usos potenciales del suero, tanto por sus propiedades funcionales como nutricionales, son muy numerosos (Moatsou y Moschopoulou, 2021; Pires et al., 2021).

Las ventajas exhibidas, por los WPC y los WPI, en sus aplicaciones alimentarias, estriban en su alto contenido de proteína y aminoácidos; bajos en calorías, grasa, y contenido de sodio, libre de patógenos, compuestos tóxicos y factores antinutricionales, a lo que se suman otras propiedades como su óptima capacidad emulsionante (compatible con otros ingredientes), rápida disponibilidad, y la percepción de que es un producto natural (Taha et al., 2020; Cheng et al., 2023; Emon et al., 2025).

La estabilidad térmica de los concentrados de proteína de suero en los sistemas alimentarios está influenciada por una variedad de factores tales como el pH, la duración y la intensidad del tratamiento térmico, la cantidad de calcio y la presencia de otros ingredientes (Page et al., 2014).

Un estudio realizado por el INTI (2017) expone varios criterios para tener en cuenta al momento de analizar una propuesta, como son: el volumen y la calidad del lactosuero producido; la elaboración de ingredientes u otros productos y su mercado potencial y, por

último, la tecnología y la inversión necesaria. Asimismo, el volumen disponible determina la posible aplicación (Tabla 4).

En la misma Tabla se observa que la opción de mayor valorización (USD/ton de suero líquido) es la producción del queso ricotta, pero el rendimiento es bajo, y se debe tener en cuenta que habrá que darle un destino final al suero generado. La fabricación de bebidas fermentadas presenta un rendimiento elevado y a su vez un precio de venta alto. Para el caso de los ingredientes, esta opción implica en primer lugar disponer de una escala mínima de producción estimada en centenares de miles de litros diarios de lactosuero dependiendo del producto final. Además, las inversiones asociadas a dichos procesos son significativas. Incluye la escala de volumen potencial y el ingreso bruto de cada una de las opciones, como guía inicial para toma de decisiones. Estos ingresos están calculados en base a costos del año 2014 y, en algunos casos, para distintos tipos de volúmenes.

Tabla 4 Volumen potencial e ingreso bruto de distintas opciones de utilización de suero de quesería (estimados en el 2014).

| Aplicación | Rango de volumen de suero para la aplicación (L/día) | Valores de mercado (USD/ton) | Rendimiento industrial aproximado (kg/100Kg de suero líquido) | Ingreso bruto por venta (USD/ton suero líquido) |
|---|---|------------------------------|---|--|
| Alimentación animales propios (agua de bebida a cerdo en fases de crecimiento y ceba) | 20L/ cerdo de 30-70kg) y 32L/cerdo de 70-100Kg) | no aplica | 100 | ahorro equivale al reemplazo de alimentación suministrada por lactosuero |
| Suero dulce líquido enfriado (puerta de planta) | >10,000 | 9 | 100 | 9 |
| Suero dulce líquido desmigado, desnatado, pasteurizado y enfriado | >30,000 | 20 | 100 | 20 |
| Suero dulce líquido concentrado al 18-20% y desmineralizado | >50,000 | 500 USD/ton materia seco | 29 | 30 |
| Ricotta sin agregado de leche | Sin límite inferior, depende del acceso al mercado | 3000 | 4 | 120 |
| Con agregado de leche | | | 6 | 180 |
| Bebida fermentada y no fermentada (70% suero líquido) | estimado >5,000 | 900 – 1,100 | 140 | 60-80 |
| NHWP | >300,000 | 1,200 | 6 | 72 |
| D40WP | >300,000 | 1,400 | 5,8 | 81 |
| D90WP | >600,000 | 2,500 | 4,8 | 120 |
| WPC35 | >600,000 incluye producción /valorización de la lactosa | 2,700 | 1,6 | 43 |
| WPC80 | >600,000 incluye producción /valorización de la lactosa | 9,000 | 0,6 | 64 |
| Lactosa | >600,000 incluye producción /valorización de la WPC | 1,800 | 2,8 | 50 |

NHWP: Suero en polvo no higroscópico; DWP: suero desmineralizado; WPC: Proteína de suero concentrada

1.5 QUESOS DE MUY ALTA HUMEDAD

Existen distintas clasificaciones en lo que respecta a queso, siendo el contenido de grasa y de agua las más conocidas. Según el Código Alimentario Argentino (CAA, 2018), de acuerdo con el contenido de humedad, en porcentaje, los quesos se clasifican en:

- Quesos de baja humedad (generalmente conocidos como de pasta dura): humedad hasta 35,9 %.
- Quesos de mediana humedad (generalmente conocidos como de pasta semidura): humedad entre 36,0 y 45,9 %.
- Quesos de alta humedad (generalmente conocidos como de pasta blanda o macíos): humedad entre 46,0 y 54,9 %.
- Quesos de muy alta humedad (generalmente conocidos como de pasta muy blanda o mole): humedad no menor a 55,0 %.

Por su parte, los quesos de muy alta humedad se clasifican de acuerdo con: si han recibido o no, tratamiento térmico luego de la fermentación, en:

- Quesos de muy alta humedad tratados térmicamente.
- Quesos de muy alta humedad.

Mientras que, de acuerdo con el contenido en materia grasa del extracto seco de la pasta, los quesos se clasifican en:

- Doble crema: cuando contengan no menos de 60,0 % de materia grasa.
- Grasos: cuando contengan más de 40,0 y hasta 59,9 % de materia grasa.
- Semigrasos: cuando contengan entre 25,0 y 39,9 % de materia grasa.
- Magros: cuando contengan más de 10,0 y hasta 24,9 % de materia grasa.
- De leche descremada: cuando contengan menos de 10,0 % de materia grasa.

No obstante, cuando se analizan las distintas variedades de queso, como podemos observar en las clasificaciones antes descritas, no son exclusivas para cada variedad de queso, es decir, un mismo queso puede ser, por ejemplo, de alta humedad y magro, dependiendo de la formulación y de su proceso de obtención. Por tanto, es importante diferenciar otra clasificación, que lo caracteriza cuando los quesos son de pasta fresca o madurada como se establece en el CAA.

En general, los quesos de muy alta humedad son quesos frescos, es decir, que puede ser consumidos inmediatamente luego de su elaboración (CAA, 2018). Según Fox et al.

(2017), este tipo de quesos pueden ser obtenidos de distintas maneras, por coagulación enzimática, coagulación ácida, coagulación enzimática-ácida y/o con tratamiento térmico (Figura 13).

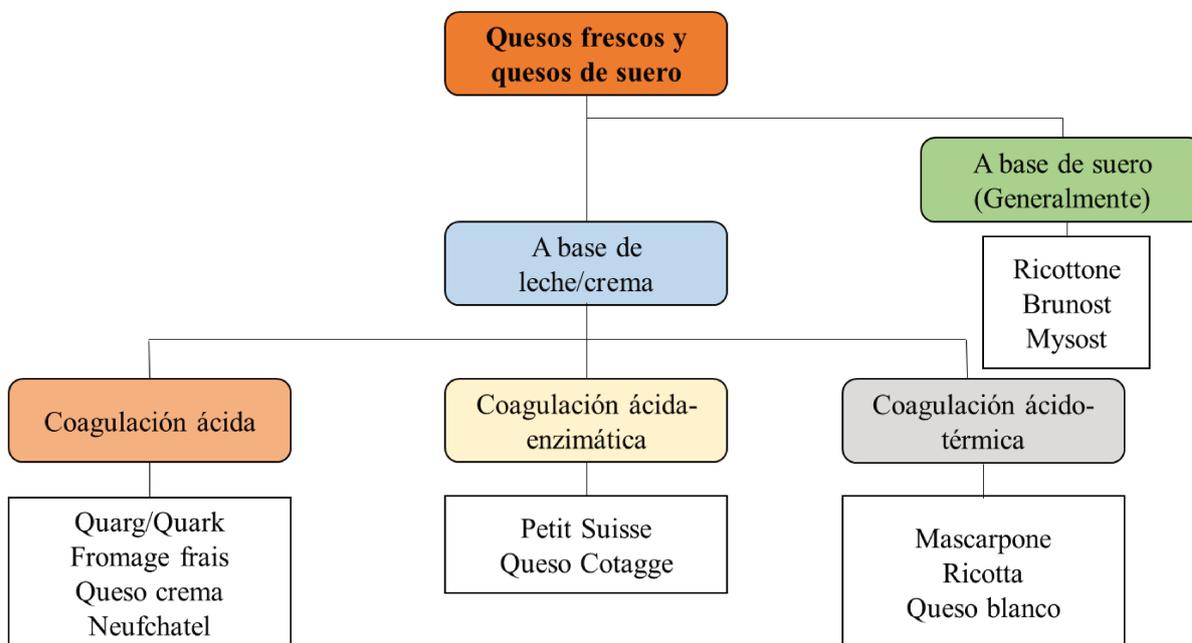


Figura 13. Formas de obtención de quesos frescos y quesos de suero (Adaptado de Fox et al., 2017).

En términos generales, este tipo de quesos se diferencian de los quesos tradicionales elaborados a partir de cuajada enzimática, en que la coagulación se realiza a pH bajo, cercano al punto isoeléctrico (4,6) o a elevadas temperaturas. A modo de ejemplo, la ricotta se elabora a pH entre 5,8-6,0 a una temperatura de 80 °C. En algunos quesos como el Quark o Cotagge, se utiliza una pequeña proporción de cuajo con el fin de obtener un coágulo más firme y para minimizar las pérdidas de caseína durante la separación de suero posterior, pero no es esencial. Según Fox et al. (2017), las principales diferencias que se pueden observar son:

- Generalmente son de muy alta humedad (55-84 % vs. 32-55 %), bajo contenido de proteína (10-15 % vs. 16-34 %) y calcio (< 0,15 % vs. > 0,4 %) y bajo pH (4,4-5,0 vs. 4,9-6,0).
- Son suaves y menos masticables.
- No requieren un período de maduración y se consumen en fresco.

- Tienen una corta vida útil (si son envasados en frío menos de un mes y si es envasado en caliente menos de seis meses, comparado con entre un mes a 2 años de los quesos madurados).

En la Tabla 5 se presenta una lista de quesos con varios tipos de coagulación:

Tabla 5 Composición aproximada de quesos frescos obtenidos de diferente forma (adaptado de Fox et al., 2019).

| Grupo de queso/variedad | Materia seca (%) | Grasa (%) | Proteína (%) | Sal (%) | Ca (mg/100-ml) | pH |
|----------------------------------|------------------|-----------|--------------|---------|----------------|------|
| Cuajada ácida | | | | | | |
| Quark descremado | >18 | <1,8 | >12 | 0,15 | 100 | 4,6 |
| Queso doble crema | 45 | 33 | 10 | 0,75 | 70 | 4,7 |
| Queso crema | 30 | 14 | 10-20 | 0,75 | 84 | 4,6 |
| Neufchatel americano | >35 | 20-33 | 10 | 0,75 | na | 4,6 |
| Petit suisse | 45 | 35 | 7,3 | 1 | | 4,6 |
| Cuajada ácido/enzimática | | | | | | |
| Cottage | 21 | 4,2 | 12,5 | 1,0 | 60 | <5,2 |
| Cottage bajo en grasa | 17,5 | 1,0 | 12,4 | 1,0 | 61 | 4,8 |
| Cottage de cuajada seca | >20 | 0,4 | 17,3 | 0,03 | 40 | 4,8 |
| Coagulación ácido/térmica | | | | | | |
| Mascarpone | 39,0 | 54,0 | 2,6 | 0,2 | na | 5,8 |
| Ricota de leche entera | 28,0 | 13,0 | 11,0 | <0,5 | 207 | 5,7 |
| Ricotta de leche descremada | 25,5 | 8,0 | 11,5 | <0,5 | 272 | 5,7 |
| Ricottone | 23,0 | 2,5 | 16 | <0,5 | na | na |
| Queso blanco | 49,0 | 15,0 | 22,9 | 3,9 | na | Na |

na= sin información

Asimismo, este tipo de quesos han presentado una demanda creciente debido a los siguientes motivos:

- Presentan suavidad y una consistencia fácil de ingerir lo cual los vuelve atractivo para los consumidores de menor edad.
- Existe una precepción saludable por parte de los consumidores respecto a estos productos.
- Existe una gran variedad de oferta en términos de consistencia y *flavor*, haciendo posible que se puedan modificar más fácilmente los protocolos de elaboración, adición de azúcares, purés de fruta, especias, condimentos, etc.
- Tienen una presentación atractiva en empaques convenientes para el consumidor.

La estructura del gel tiene una mayor influencia sobre la textura (untabilidad, firmeza) y los atributos sensoriales (suavidad), además en la estabilidad fisicoquímica (desuerado o sensación granulada) durante el almacenamiento. Dicha estructura está influenciada por muchos factores, entre ellos: el nivel de proteína, la pasteurización de la leche, homogeneización, temperatura de acidificación y el pH en el cual el gel es roto y sujeto a deshidratación. En quesos como Quark (no tratado térmicamente) la estructura del gel es importante para la calidad del producto final, debido a que la cuajada no es tratada posteriormente. Mientras que los quesos de muy alta humedad tratados térmicamente, como el queso crema, u otros quesos frescos y preparaciones, la cuajada está sujeta a varios procesos (tratamiento térmico, homogeneización, cizalla, adición de hidrocoloides) dependiendo de cada producto, al igual que Efecto por acción de enzimas proteolíticas provenientes de los fermentos que pueden estar presentes en la cuajada (Tunick, 2000; Fox et al., 2017).

La acidificación lenta de la leche, que muchas veces se realiza con el uso de fermentos iniciadores, en condiciones de reposo, va acompañada de dos conjuntos opuestos de Efecto fisicoquímicos:

- a) Tendencia a la desagregación de las micelas de caseína a un sistema más desordenado:
 - Solubilización del fosfato de calcio coloidal, el cual es completamente soluble a pH 5,2-5,3 a temperatura de 20-30 °C.
 - Efecto del pH y la temperatura sobre la disociación de las caseínas independientes, especialmente la caseína β , generando un incremento en la caseína sérica. La disociación de las caseínas decrece con el descenso del pH

- 6,2, luego incrementa hasta su máximo a pH 5,3-5,6 (dependiendo de la temperatura) y posteriormente decrece hasta su valor mínimo, en su punto isoeléctrico.
- Incremento en la hidratación de las caseínas con la reducción del pH en el rango de 6,7-5,3.
- b) Tendencia de las micelas de caseína a agregarse y formar un sistema más ordenado debido a:
- Reducción de la carga negativa superficial sobre las micelas de caseína y por tanto las fuerzas de repulsión intermicelares debido a la producción de ácido láctico.
 - Descenso de la hidratación de las caseínas en el rango de pH 5,3-4,6 (Figura 14).

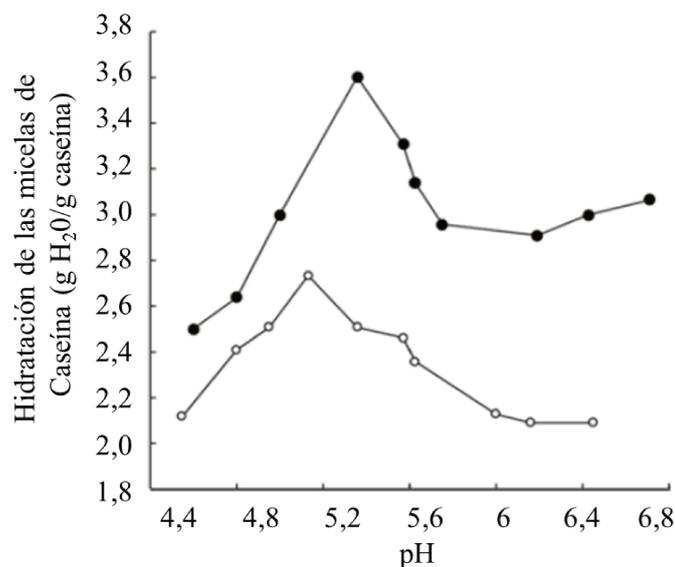


Figura 14. Hidratación de las micelas de caseína en función del pH a 20°C en leche descremada (●) y micelas de paracaseína a partir de cuajada enzimática a partir de leche descremada (○).

Por tanto, en el desarrollo de la estructura se han diferenciado tres etapas en función del pH:

- a) Etapa 1 (pH 6,7-5,8): las micelas de caseína individuales empiezan a perder su identidad y tienden a formarse clústeres de partículas de caseína.
- b) Etapa 2 (pH 5,8-5,3-5,2): las partículas de caseína se convierten en una red abierta particulada compuesta por hebras de partículas de caseína agregadas,

en las que es evidente la considerable extensión e hinchazón de las partículas de caseína.

- c) Etapa 3 (pH 5,3-4,6): encogimiento y contracción de las partículas de caseína y por tanto de las hebras y la red como un todo. La reorganización y el encogimiento de las partículas de caseína conducen a una red de caseína más estrecha que tiene enlaces más numerosos.

A diferencia de una cuajada enzimática, en quesos de cuajada ácida, el grado de las uniones con el calcio que contribuyen a la formación de la red de caseína es mucho más baja. A pH por debajo de 5,5, las micelas de caseína se vuelven más porosas debido a la solvatación de las caseínas (principalmente β y κ) y su permeación en el suero circundante y también la solubilización del fosfato de calcio coloidal (FCC), el cual contribuye en la unión electrostática de la red de caseínas dentro de la micela. Otra diferencia con los quesos de cuajada enzimática es que, el calcio contribuye muy poco en la formación de la red de caseínas, debido al bajo pH (4,5-4,8) todo el FCC se solubiliza durante la formación del gel, lo cual genera una cuajada menos calcificada (Fox et al., 2017).

La estructura de un gel ácido de leche tiene mayor influencia sobre las propiedades reológicas y de sinéresis. El impacto de la estructura del gel sobre la calidad del producto final depende de los tratamientos a los cuales dicho gel fue sometido, por ejemplo: esfuerzos de corte, agitación, tratamiento térmico, enfriamiento, etc. (Fox et al., 2017).

Según Schulz-Collins y Senge (2004), a pH debajo de 5,3, las fuerzas de agregación son mayores que las fuerzas de desagregación, mientras que, por arriba de este pH, las fuerzas de desintegración de las micelas son más fuertes, por lo cual no se forma un gel. No obstante, en las cuajadas ácido-enzimáticas, existe un efecto sinérgico, debido a que la baja concentración de cuajo usada permite que existan zonas en las cuales no se produce desmineralización, por tanto, puede contribuir a la formación de un gel más reforzado.

1.5.1 Formación del gel ácido

La acidificación de la leche puede inducir la formación de un gel o un precipitado, dependiendo de la tasa y el grado de agregación de las caseínas. La gelificación de la leche ocurre cuando las fuerzas que promueven la agregación de las partículas de caseína superan levemente a las que promueven la repulsión de las micelas. Estas condiciones dan como resultado la formación de agregados hidratados, porosos y relativamente

sueltos de micelas de caseína, que son solo un poco más densos que la fase sérica en la que están dispersos. Debido al gradiente de densidad relativamente pequeño entre los agregados y la fase sérica, los agregados tienen suficiente tiempo para unirse, a través de la formación de hebras, para formar una red continua de caseína, que atrapa físicamente la fase sérica (suero) y los glóbulos de grasa (Fox et al., 2017). Por el contrario, una rápida acidificación con agitación constante y elevada temperatura, conduce a la elaboración de caseína isoelectrica, permitiendo la precipitación sobre la gelificación de la caseína. Estas condiciones conducen a una rápida agregación, un grado muy alto de fusión entre las superficies de las partículas de caseína que se encuentran cercanas y su posterior contracción. Esto permite la formación de agregados más pequeños y menos porosos e hidratados. Debido a su alta densidad, sedimentan como precipitado.

Comparado con un gel de caseína, el precipitado tiene muy baja capacidad de retención de agua y ocupa menor volumen específico. Es por ello que a pesar de que las características de elaboración de una caseína ácida y de una cuajada ácida fresca (por ejemplo, queso Quark), conlleva llegar hasta pH 4,6, las condiciones de acidificación difieren marcadamente. Por tanto, a pesar de que la concentración de proteína de un gel o un precipitado sea la misma, la estructura, es diferente (Figura 15) (Fox et al., 2017).

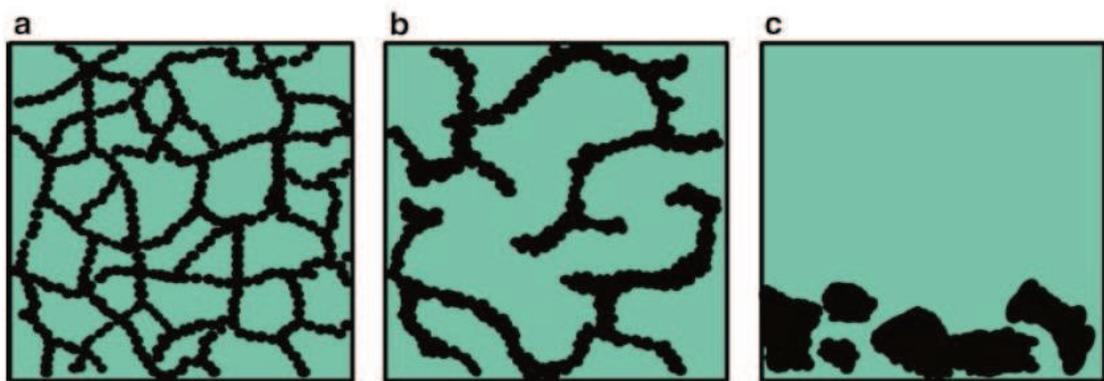


Figura 15. Representación esquemática de un gel de estructura fina (a), estructura gruesa (b) y un precipitado (c).

El proceso de formación de una cuajada ácido-enzimática puede dividirse en varias etapas, según Schulz-Collins y Senge (2004):

- i. Adaptación del fermento y acidificación hasta el pH de coagulación deseado.
- ii. Fase primaria de coagulación enzimática (hidrólisis enzimática de κ -caseína).

- iii. Inicio de la fase secundaria de coagulación (agregación y formación del gel), donde incrementa la viscosidad compleja.
- iv. Transición desde un gel tipo enzimático a un gel ácido y microsinéresis concomitante (ocurre si el gel está quieto y no puede contraerse), produciéndose poros más anchos, donde decrece la viscosidad compleja.
- v. Predomina la coagulación ácida, formación final del gel ácido enzimático. Ocurres un segundo incremento de la viscosidad compleja.
- vi. Sinéresis: Contracción de las hebras de caseína, microsinéresis (no visible), seguida de macro sinéresis (suero visible). Decrece la viscosidad compleja nuevamente.

Se asume que la viscosidad compleja disminuye debido a la desmineralización ocasionada por el descenso del pH durante la formación del gel, la cual es completada a pH 5,3-5,1 (Figura 16).

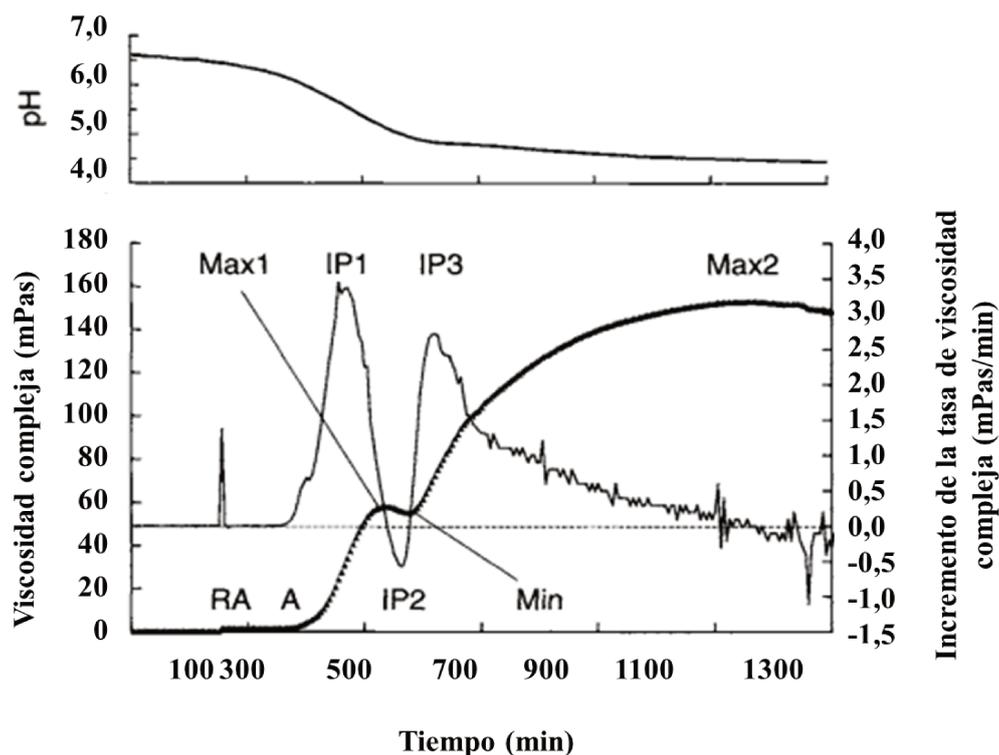


Figura 16. Curva típica de viscosidad compleja con incremento en la tasa de viscosidad durante la coagulación ácido enzimática de leche descremada. RA adición de cuajo; A, agregación; IP1, IP2 e IP3, puntos de inflexión de la curva de viscosidad compleja; Max 1 y Max 2, máximos de la curva de viscosidad compleja/tiempo; Min, mínimo de la curva de viscosidad compleja/tiempo (adaptado de Schulz-Collins y Senge, 2004).

Las propiedades reológicas de los geles obtenidos por coagulación ácido-enzimática, a pH superior a 5,2, son iguales a los obtenidos por coagulación solamente enzimática, mientras que a pH menor a 5,2, las propiedades son parecidas a los geles ácidos de caseína.

1.5.2 Sinéresis del gel

La sinéresis de los productos a base de geles ácidos puede ser categorizada como inducida, cuando los geles son afectados por la aplicación de fuerzas que incrementan el contenido de materia seca en el producto final, o espontánea que ocurre como una expresión endógena del suero (desuerado) a partir del producto final, la cual es indeseable (Fox et al., 2017).

- a) En el caso de la sinéresis inducida, es necesario concentrar el contenido de caseína y grasa, con el fin de obtener el contenido de materia seca deseado, según el tipo de queso (alrededor del 14 % para Fromage frais o 45 % para queso crema). Esto se alcanza mediante la obtención del gel, seguido de la incubación, concentración (remoción del suero) por el corte, agitación, calentamiento, drenado de suero por fuerza centrífuga o gravitacional. La aplicación de estrés por estas acciones ocasiona la rotura de la estructura del gel en partículas, reordenamiento y contracción de la red del gel dentro de partículas individuales, y expulsión del suero. La rotura del gel mejora la sinéresis debido a:
 - El aumento en la superficie disponible para la salida del suero.
 - La reorganización y la contracción de la red de proteínas, a medida que las hebras de gel rotas se acercan más y se vuelven a unir en una disposición más compacta.
 - El desarrollo concomitante de una presión sobre el suero atrapado dentro de la red, lo cual fuerza la liberación de este a través de los poros de la red.

Como se observó en la Figura 15, la estructura del gel formado es importante en la etapa de desuerado. Una red menos porosa, retiene mayor cantidad de suero, por tanto, hay una menor sinéresis. Según Fox et al. 2017), existen varios factores que retardan la sinéresis inducida de los geles de leche ácidos:

- Reducir el tratamiento térmico de la leche previo a la fermentación.
- La adición de una pequeña cantidad de cuajo a la leche (0,5-1 ml 100 L⁻¹), (~2 h) previo al inicio de la fermentación, cuando el pH es alrededor de 6,3.
- Reducir la firmeza del gel en la rotura y separación del suero.
- Incrementa la tasa de acidificación durante la gelificación a través de la optimización de la temperatura, para favorecer el crecimiento del fermento.
- Reducir el pH lo más cercano al punto isoeléctrico antes de la separación del suero.
- Incrementar la temperatura de rotura del gel previo al desuerado.
- Incrementar la fuerza centrífuga y la temperatura durante el desuerado.

Los factores antes descritos ejercen efecto sobre la sinéresis, principalmente porque inducen la agregación de las proteínas y la permeabilidad del gel (tamaño de poro). Por el contrario, la sinéresis inducida puede ser afectada por la reducción de la relación proteína-grasa de la leche, el tratamiento de alta temperatura de la leche (95 °C durante 2–5 min), la elevada firmeza del gel al corte, el aumento del pH del gel y la presencia de materiales que aumentan la viscosidad de la fase acuosa (uso de hidrocoloides, producción de exopolisacáridos por los fermentos).

- b) En el caso de la sinéresis espontánea, los geles ácidos que son empacados in situ (símil yogur set), y en el caso de que no sean perturbados, tienen menor tendencia a presentar sinéresis. Sin embargo, durante el almacenamiento puede presentarse esta sinéresis espontánea, la cual es considerada como un defecto. En algunos casos, una leve presencia de suero en la superficie, puede ser considerado adecuado o apreciado, debido a que da a entender que el producto no fue elaborado con aditivos, como en los quesos frescos de alta humedad, debido al elevado ratio de agua/proteína (6,5 g de H₂O / g de proteína). A diferencia de las cuajadas enzimáticas, este tipo de cuajadas ácidas, presentan una menor contracción, lo cual ocasiona que exista una descontrolada agregación de las proteínas luego de la elaboración y deshidratación debido a la reorganización de la red de caseína, especialmente

en el transporte y distribución. El incremento en el grado de agregación de las caseínas genera un estrés interno dentro del gel y un reordenamiento de la matriz de caseína, induciendo así sinéresis. La sinéresis, junto con la sensación arenosa/granulosa, son los principales defectos sensoriales. Una tendencia en la agregación de las proteínas y la presentación de estos defectos, pueden verse acentuadas por la reducción del pH, un incremento en la temperatura del producto y fluctuaciones en la temperatura de almacenamiento. Se cree además que la hidrólisis de las caseínas por acción de las enzimas del fermento también puede influir en la sinéresis.

Además, pueden presentarse otros factores que promuevan la sinéresis

- El contenido excesivo de lactosa, que puede ocasionar diferencias en el nivel de ácido láctico, la relación lactato/proteína y el pH del producto final.
- Variación en la composición (pH y sales).
- Protocolo y proceso de manufactura, pH del gel en el momento del desuerado, concentración del gel y condiciones de enfriamiento.

1.6 FUNCIONALIDAD DE LOS QUESOS.

Existen más de 1000 variedades de queso reconocidas mundialmente, las cuales varían en su composición, apariencia, *flavor* y textura. Dicha diversificación permite satisfacer las necesidades de los distintos consumidores. Hoy en día, el queso es ampliamente utilizado en el hogar, en el sector gastronómico e incluso el sector industrial. En conjunto con otros ingredientes, es usado para ensamblar alimentos (ej. pizzas), alimentos formulados (ej. quesos procesados) y también en la preparación de ingredientes a base de queso. Es por lo que la funcionalidad del queso es mayor cuando este sufre un segundo procesado, lo cual permite generar una amplia gama de alimentos a base de queso listos para consumir, como el caso de quesos rallados, procesados, picados, modificados enzimáticamente, etc. Se estima que el 35-50% del total del queso es consumido como ingrediente en otros alimentos y esta tendencia ha aumentado en los últimos años (Feng et al., 2023; Feng et al. 2025; Guinee, 2016; Garofalo, Gaglio y Settani, 2025). Los quesos como ingredientes han presentado una demanda creciente, especialmente cuando el giro de negocio tiene una modalidad “business-to-business”, es decir de empresa a empresa, en la cual la particularidad del producto elaborado tiene determinada especificidad, como

por ejemplo la capacidad para desgranarse, estabilidad a cierta temperatura, propiedades de cocción o enfriamiento, características de sabor, untabilidad, entre otras propiedades de acuerdo a su posterior uso. Dicha funcionalidad está influenciada directamente por la micro y macroestructura, las cuales están íntimamente relacionadas con factores como el proceso de producción y la composición. El tipo y las propiedades fisicoquímicas como grado de agregación de las proteínas, hidratación, distribución y tamaño de la grasa emulsificada son las principales determinantes de la reología y la funcionalidad (Masotti et al. 2018). En términos generales, los quesos de muy alta humedad, frescos, se caracterizan por tener la capacidad de extenderse fácilmente cuando se someten a un esfuerzo cortante, son blandos, no madurados y sin corteza (Fox et al., 2017; Guinee, 2016).

Según Guinee (2016), las principales funcionalidades de los quesos se deben a las características físicas y propiedades reológicas que presentan cuando éstos no son sometidos a tratamientos térmicos. Entre ellas, una de las propiedades muy apreciadas es la untabilidad, debido a que permite que el queso se mezcle con otros alimentos y, por ende, la elaboración de salsas y fondues, característica que no todos los quesos otorgan. El mismo autor menciona que existe muy poca información sobre las propiedades funcionales (untable, rebanable, triturable) de los quesos no tratados térmicamente y los factores que las afectan, sin embargo, en base a las propiedades inherentes a la reología del queso, estima que son influenciadas por los mismos factores: macro y microestructura, composición, temperatura y tratamiento mecánico.

1.6.1 Untabilidad.

La untabilidad y la textura son de los parámetros de calidad más importantes cuando se formulan quesos untables (Banes et al. 2014). La untabilidad es el esfuerzo requerido para crear una distribución uniforme sobre una superficie y representa un atributo de textura clave de los alimentos semisólidos ya que afecta su calidad y aceptación (Pompei et al., 1988; Rohm y Raaver, 1990). Según Tan (2019), la untabilidad de un alimento semisólido es el resultado del comportamiento reológico, donde la viscosidad es el parámetro más importante. A medida que se incrementa la viscosidad, la untabilidad decrece debido al aumento de la resistencia al flujo. Adicionalmente, un incremento en el contenido de grasa en algunos alimentos semisólidos de base lipídica, como los untables,

margarina, crema, queso y manteca, puede causar un incremento en la dureza y un decrecimiento en la untabilidad.

Entre los principales factores que afectan la untabilidad del producto, la temperatura, composición, pH y adición de hidrocoloides son los más importantes (Guinee et al., 1993; Daubert et al., 1998).

Al aumentar la temperatura, disminuye la firmeza del queso, por lo tanto, el esfuerzo requerido para distribuirlo uniformemente sobre una superficie. Esto se debe a que se produce la fusión de la grasa atrapada en la matriz proteica, siendo este efecto más marcado en los quesos con alto contenido graso (Brighenti et al., 2008). Además, la fusión de la grasa aumenta el movimiento térmico de moléculas, partículas y hebras, se produce una relajación de los enlaces proteína-proteína y una disminución de la fuerza de los enlaces de hidrógeno, lo que también resulta en una disminución de la firmeza del queso y como consecuencia, en un aumento de la untabilidad (Lucey et al., 2003; Brighenti et al., 2008). Los quesos untables suelen tener valores de pH próximos al punto isoeléctrico de la caseína, donde se ven favorecidas las interacciones atractivas hidrofóbicas y electrostáticas que ayudan a evitar que la estructura exhiba un debilitamiento excesivo (Brighenti et al., 2008).

La adición de hidrocoloides a los quesos untables brinda una gran oportunidad para diferenciar las características reológicas y texturales del producto, dentro de las cuales se destaca la untabilidad y tienen un impacto importante en la calidad del producto final (Guinee et al. 1993; Ruiz Hernández, 2007).

1.6.2 Procesos productivos de quesos untables.

Existen distintos procesos productivos para el desarrollo de quesos untables, uno de los cuales se basa en lo abordado anteriormente en la sección 1.4.1.

Luego de la formulación, mezcla y tratamiento térmico, la homogenización es una práctica común en los distintos procesos de obtención de quesos untables ya que influye favorablemente en la textura y propiedades sensoriales del mismo, otorgándole uniformidad a la masa, suavidad superficial y brillo (Vega Hernández, 2016). Consiste en un tratamiento mecánico de alta presión que, dependiendo de la presión, disminuye el tamaño de los glóbulos de grasa de la leche y, por ende, aumenta el área interfacial de los mismos (Berton et al., 2012). Estos glóbulos grasos más pequeños son recubiertos por

una capa de proteína que consiste en micelas de caseína, sub-micelas y, en menor medida, proteínas de suero, denominada membrana de glóbulo graso. Esta membrana permite que los glóbulos de grasa emulsionados participen en la formación de la red de caseína, aumentando así la concentración efectiva de proteína formadora de gel y proporcionando una cuajada más suave, lo que es especialmente importante para la calidad del queso untable (Fox et al., 2017).

Otra forma de obtener quesos untables consiste en la aplicación de tecnología de recombinación o lo que hoy en día se conoce como procesados o fundidos, es decir, combinar una base de queso con sales emulsionantes, suero de leche en polvo e hidrocoloides, seguido de la pasteurización, homogeneización y envasado en caliente de la mezcla (Schulz-Collins y Senge, 2004; Fox et al., 2017). Los quesos obtenidos mediante este proceso se encuentran en el CAA (2019) bajo la denominación de quesos procesados o fundidos y en su formulación deben estar presentes:

- Ingredientes obligatorios: quesos de una o más variedades, agentes emulsificantes autorizados.

- Ingredientes opcionales: crema, manteca, grasa anhidra de leche o butteroil, leche, agua, queso procesado, leche en polvo, caseinatos, queso en polvo, otros sólidos de origen lácteo, NaCl, condimentos, especias, otras sustancias alimenticias, edulcorantes nutritivos, almidones o almidones modificados, aire, nitrógeno, dióxido de carbono, gases inertes, todos ellos de calidad alimentaria. Los ingredientes opcionales que no formen parte de la base láctea, excepto el agua, solos o combinados no deberán superar el 30% (p/p) del producto final y los almidones o almidones modificados no deberán superar el 3% (p/p) del producto final.

- Aditivos: en su elaboración se admitirá el uso de los aditivos autorizados en el artículo 605 del CAA, entre los cuales se encuentran cúrcuma, betacarotenos, nisina, ácido sórbico, carragenina, goma guar y almidones modificados.

Por otro lado, el CAA (2019) establece que los quesos procesados deberán responder a los siguientes requisitos para ser denominados como tales:

- Características sensoriales:
 - (i) Consistencia: firme, untable.
 - (ii) Textura: compacta, cerrada y fina.

(iii) Formato: variable; rallado o feteado (en fetas o en rodajas) y otras.

(iv) Color, olor y sabor: similar al queso o mezcla de quesos utilizados o acorde con los colorantes, saborizantes/aromatizantes y/u otras sustancias alimenticias utilizadas en su elaboración.

• Características fisicoquímicas:

(i) Humedad máxima 70%

(ii) Materia grasa sobre extracto seco mínimo 35%

Por último y en lo que concierne al presente trabajo, es posible desarrollar quesos análogos o sustitutos untables, en donde se puede remplazar la grasa láctea, adicionar sólidos lácteos y no lácteos, hidrocoloides, agua y a su vez el proceso de elaboración también puede variar (Bachmann, 2001; Guinee et al., 2004; Phadungath, 2005; Liu et al., 2008; Fox et al., 2017). Es importante considerar que este tipo de quesos representa una matriz con amplia posibilidad de estudiar las variables de formulación y de proceso y su efecto en los diferentes parámetros de calidad.

1.7 QUESOS ANÁLOGOS.

1.7.1 Definición y ventajas de su producción.

Los quesos análogos son matrices alimenticias complejas, elaboradas por calentamiento de una mezcla de materias primas, principalmente agua, grasa y proteína, en una masa homogénea, que, al aplicárseles energía mecánica, proporcionan un producto similar al queso, tanto en composición como en apariencia y usos (Chavan y Jana, 2007; Agudelo Chaparro et al., 2015). Además, cabe destacar que el producto obtenido no es inferior desde el punto de vista nutricional respecto al queso que imita (Guinee et al., 2004).

En lo que respecta a la microestructura, los quesos análogos consisten en una emulsión concentrada de gotitas de grasa redondeadas y discretas de tamaño variable en una matriz de proteína hidratada, donde la floculación o coalescencia de glóbulos de grasa es menor que en el queso natural (Guinee et al., 2004). En consecuencia, el tamaño medio de los glóbulos de grasa tiende a ser generalmente más pequeño, aunque varía con las condiciones de procesamiento tales como velocidad de cizallamiento, temperatura y tiempo (Guinee et al., 2004; Fox et al., 2017).

El éxito de los quesos análogos puede atribuirse a que su producción presenta numerosas ventajas, entre las cuales se destacan menores costos en comparación con el queso natural o procesado, simplicidad de fabricación y capacidad de formularse según los requerimientos nutricionales de grupos con necesidades dietéticas especiales (por ejemplo, sin lactosa, bajo en calorías, bajo en grasas saturadas, enriquecido con vitaminas, etc.) (Fox et al., 2017).

1.7.2 Clasificación.

Los quesos análogos pueden clasificarse arbitrariamente como lácteos, lácteos parciales o no lácteos, dependiendo de si los componentes de grasa y/o proteína provienen de fuentes lácteas o vegetales (Figura 17) (Fox et al., 2017).

Los análogos más comunes son los parcialmente lácteos, donde la grasa es principalmente aceite vegetal (por ejemplo, aceite de soja, aceite de palma, colza y sus equivalentes hidrogenados) y la proteína es de base láctea (generalmente caseína de cuajo y/o caseinato) (Guinee et al., 2004). En cambio, el mercado de quesos análogos no lácteos, en los que tanto las grasas como las proteínas son de origen vegetal, es muy pequeño, pero ofrece una oportunidad para producir quesos veganos, aunque cabe destacar que la sustitución de la caseína por proteínas vegetales da lugar a productos con una textura desfavorable. Por último, los análogos lácteos no se producen en grandes cantidades porque por lo general el costo es más alto que el de los demás quesos (Fox et al., 2017). De todos modos, lo enunciado anteriormente no corresponde a una generalización y es posible buscar distintas alternativas para reducir costos, como por ejemplo utilizar lactosuero (subproducto de la industria láctea) como materia prima (Motta-Correa y Mosquera, 2015).

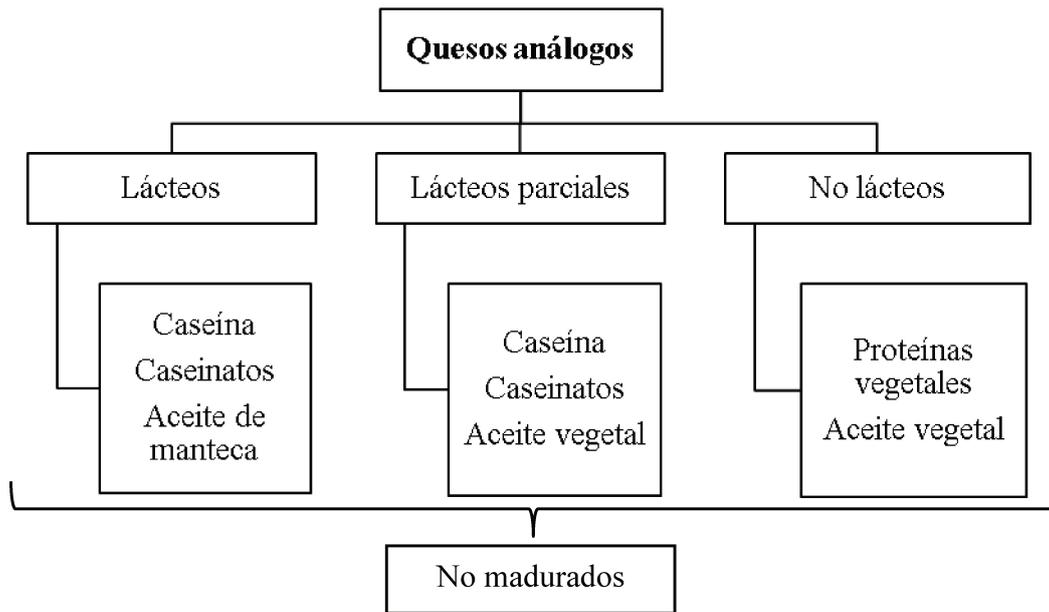


Figura 17. Clasificación de quesos análogos (Fox *et al.*, 2017).

1.7.3 Proceso de producción.

La producción de quesos análogos es similar a la de quesos procesados e implica la formulación, procesamiento y envasado del producto en caliente, pero se diferencia en que normalmente no se incluye queso (Fox *et al.*, 2017). Si bien los métodos de producción varían, un procedimiento típico implica los siguientes pasos (Figura 18): adición simultánea de las cantidades requeridas de agua e ingredientes secos (por ejemplo, caseína), incorporación de la grasa y realización del tratamiento térmico a 85°C mientras se cizalla continuamente hasta obtener una masa fundida homogénea; adición de aromatizantes y regulador de la acidez (por ejemplo: ácido láctico, ácido cítrico, etc.), envasado en caliente y almacenamiento a temperaturas de refrigeración hasta el momento de su distribución y consumo (Guinee *et al.*, 2004; Rojas Espinosa, 2009; Fox *et al.*, 2017). El agregado de aromatizantes prácticamente al final de la fabricación en lugar de al principio minimiza la pérdida, por altas temperaturas de procesamiento, de las sustancias volátiles responsables del *flavor* (Guinee *et al.*, 2004).

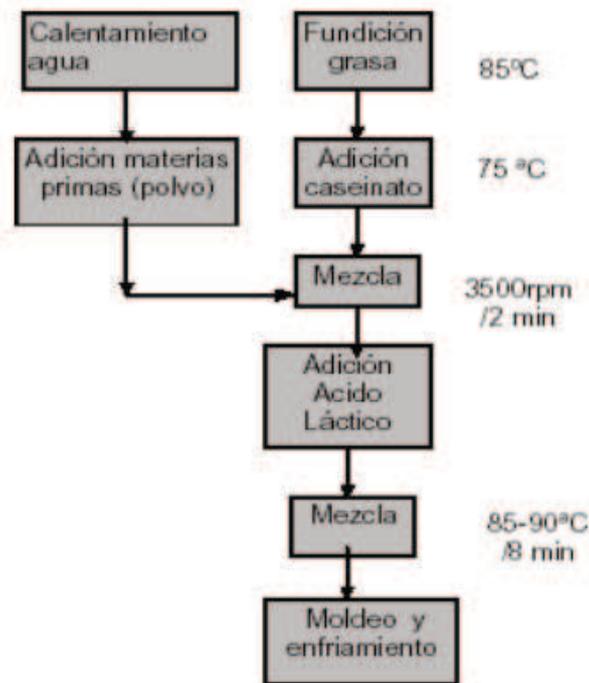


Figura 18. Diagrama de proceso de elaboración de queso análogo (Rojas Espinosa, 2009).

1.7.4 Ingredientes.

1.7.4.1 Propiedades funcionales de WPC

Los WPC han sido usados como ingredientes alimentarios gracias a su valor nutricional, y, a más de ello, por las propiedades funcionales que éstos reúnen, a través de las cuales se puede mejorar la calidad y la aceptabilidad de los alimentos en los que son utilizados. En este sentido, las propiedades funcionales más comunes reconocidas en los WPC son: solubilidad, viscosidad, capacidad emulsificante y espumante, absorción de agua, gelificación y formación de fibras (Zall et al.,1992):

- a) Solubilidad:** las proteínas de suero son altamente solubles, sobre todo cuando se las compara con caseinato de sodio y con la proteína de soja. La solubilidad de la proteína de suero depende de su capacidad para ligar agua y además de su estado físico. Esta propiedad funcional es un requisito primordial para la formación de espumas, emulsiones, así como también para su inclusión en bebidas y otras aplicaciones. Pelegrine y Gasparetto (2005), estudiaron el efecto del pH y la temperatura sobre la solubilidad de la proteína de suero y determinaron que estas dos variables tienen gran interacción, siendo así, que la solubilidad mínima es

cuando el pH es 4,5. Además es más insoluble a medida que aumenta la temperatura (Figura 19).

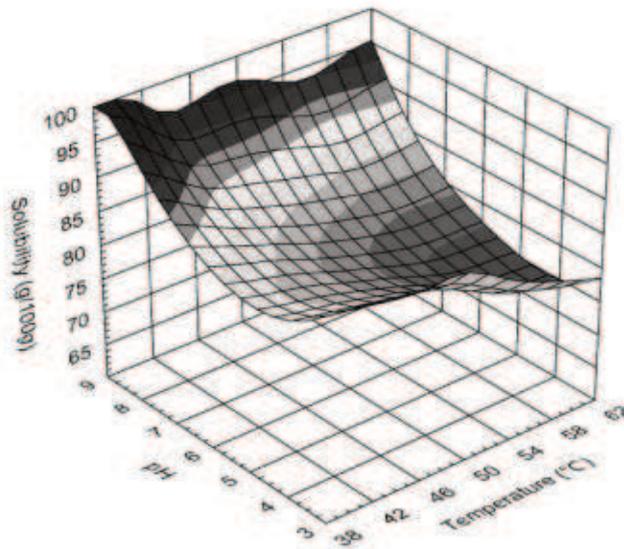


Figura 19. Gráfico de superficie de respuesta para la solubilidad de proteína de suero afectada por el pH y temperatura (Pelegri y Gasparetto, 2005).

- b) Capacidad emulsificante:** Al igual que las caseínas, las seroproteínas son cadenas poli-iónicas, es decir que en su estructura primaria contienen residuos polares y no polares, cuya distribución no es uniforme. Este desbalance hace que la molécula presente regiones hidrofóbicas e hidrofílicas, lo cual le confiere la propiedad de disponerse en la interfase grasa/agua y, por ende, le permite formar emulsiones macroscópicas estables. Cabe señalar que una desnaturalización parcial favorece esta propiedad, dado que puede incrementar el número de grupos activos expuestos (Fox et al., 2015a).
- c) Viscosidad y capacidad de ligación de agua:** La viscosidad es la propiedad por la cual los fluidos ofrecen resistencia a deformarse (fluir) cuando se los somete a un esfuerzo de corte. Esta magnitud depende del tamaño, forma y carga eléctrica de las moléculas y, en el caso de las soluciones, también está influenciada por la concentración, el pH y el medio ambiente iónico. La capacidad de ligar agua y la viscosidad están directamente relacionadas; cuando se calienta la proteína, se rompen los enlaces que mantienen la estructura globular, generándose puntos de unión, lo que favorece la capacidad de ligar agua (Page et al., 2014). En general, los WPC exhiben baja viscosidad a una concentración del 45%, sin embargo, a medida

que aumenta la concentración de proteína, la viscosidad aumenta considerablemente (Figura 20) (Akhtar et al., 2006).

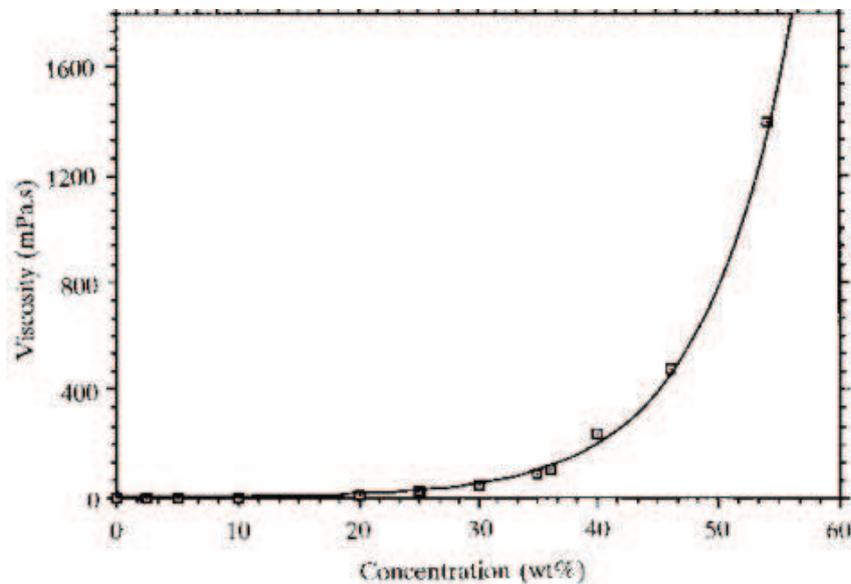


Figura 20. Efecto de la concentración de proteína sobre la viscosidad ($T=20^{\circ}\text{C}$, $\dot{\gamma} = 500, \text{ l s}^{-1}$ y $\text{pH} = 6.5$) (Akhtar et al., 2006)..

- d) Espumado:** Esta propiedad es similar a la capacidad emulsionante, pero en este caso la función de las proteínas es estabilizar burbujas de aire. Los factores que influyen en esta propiedad son: la presencia de sacarosa añadida, el contenido de grasa residual, el tiempo de batido, el nivel de sólidos, el pH, la desnaturalización térmica, la fuerza iónica, la adición de surfactantes y el potencial redox. El WPC se usa, pero no es tan estabilizante como el caseinato. El almacenamiento en frío perjudica las propiedades de batido. Esta propiedad es muy dependiente del grado de desnaturalización (Fox et al., 2017; Jovanovic y Barác y Macej, 2005; Page et al. 2014).
- e) Gelificación.** La capacidad de formar geles es una de las propiedades más interesantes de los WPC, por su capacidad de retener el agua tras una desnaturalización. La concentración óptima para gelificar de los WPC es 15% (mínimo 50% de sólidos como proteína), mientras que por debajo del 10% la formación del gel no se produce. Asimismo, se ha demostrado que, a pH neutro y alcalino, se obtienen geles con mayor firmeza. Generalmente, el WPC tiene la capacidad de gelificar a $60\text{--}90^{\circ}\text{C}$ en concentraciones de $80 - 120 \text{ g L}^{-1}$. El proceso de gelificación está influenciado por la temperatura y por el tiempo de

calentamiento, pH y fuerza iónica, concentraciones de sales, lípidos y azúcares (Jovanovic y Barác y Macej, 2005; Page et al, 2014).

1.7.4.2 Grasa.

La grasa brinda las características deseadas de composición, textura y fusión. Como fuente de grasa se puede utilizar manteca, grasa láctea anhidra, aceite de soja nativo o parcialmente hidrogenado, aceite de maíz o aceite de palmiste (Guinee *et al.*, 2004).

1.7.4.3 Proteína.

Como fuente proteica pueden utilizarse caseinatos, proteínas de suero y caseína. Los caseinatos (especialmente de sodio) son ampliamente utilizados en quesos untables donde su alta capacidad de retención de agua y sus buenas propiedades emulsionantes promueven el efecto cremoso deseado (Guinee *et al.*, 2004). Las proteínas de suero proporcionan firmeza y son utilizadas en quesos donde es importante que los mismos presenten resistencia al flujo (Chavan y Jana, 2007). Por último, la caseína obtenida por coagulación inducida por cuajo de la leche descremada se prefiere para los productos en forma de bloques semiduros donde imparte fibrosidad y capacidad de estiramiento (Fox *et al.*, 2017).

1.7.4.4 Agente acidificante.

El agente acidificante ayuda a controlar el pH del producto final y comprende los ácidos orgánicos de grado alimenticio, por ejemplo, ácido láctico, acético, cítrico y fosfórico (Guinee *et al.*, 2004).

1.7.4.5 Conservante.

El agregado de un aditivo conservante retrasa el crecimiento de moho, permitiendo prolongar la vida útil del queso. Ejemplo de estos son: nisina, sorbato de potasio, propionato de calcio o de sodio (Guinee et al., 2004).

1.7.4.6 Hidrocoloides.

Los hidrocoloides son macromoléculas utilizadas como estabilizantes en la producción de quesos (Ruiz Hernández, 2007). La principal función de estos es retener agua, proporcionando viscosidad/espesamiento apropiado al producto, mejorando su sensación en la boca y evitando la separación del suero de la masa (sinéresis) (Ruiz Hernández, 2007; Kapoor y Metzger, 2008).

El CAA (2019) establece un gran número de hidrocoloides que pueden ser utilizados para la elaboración de quesos untables tales como carrageninas, gomas de algarrobo, xántica y guar. No obstante, teniendo en cuenta la legislación, los costos, dispersabilidad, solubilidad, comportamiento de hidratación, rango óptimo de pH y compatibilidad con los componentes del queso, se seleccionó almidón modificado y gelatina para que sean evaluados durante el desarrollo de la tesis (Kapoor y Metzger, 2008; Rakes y Laaman, 2011).

1.7.5 Gelatina.

- Definición.

La gelatina es uno de los hidrocoloides o polímeros solubles en agua que se pueden utilizar en la industria alimentaria como agente gelificante, espesante o estabilizante. Se diferencia de otros hidrocoloides porque la mayoría de ellos son polisacáridos, como carragenina y pectinas, mientras que la gelatina es una proteína totalmente digerible (Poppe, 1992).

La gelatina contiene todos los aminoácidos esenciales excepto el triptófano y consiste en grandes secuencias de glicina, prolina e hidroxiprolina, siendo la glicina el aminoácido más abundante (Poppe, 1992; Raja Mohd Hafidz et al., 2011).

Se obtiene por hidrólisis parcial del colágeno derivado de la piel, tejido conectivo blanco y de huesos de animales (Morrison et al., 1999).

- Mecanismo de gelificación.

Cuando la gelatina se coloca en agua fría se hincha absorbiendo de 5 a 10 veces su propio volumen de agua y al proceder al calentamiento a temperaturas superiores al punto de fusión, la gelatina hinchada se disuelve y forma un gel cuando se enfría (Poppe, 1992). Esto es posible porque las cadenas polipéptidicas ricas en grupos imino (prolina-hidroxiprolina) adoptan una conformación helicoidal al enfriarse, que se estabiliza mediante enlaces de puentes de hidrógeno, formando la estructura del gel tridimensional. Este mecanismo es reversible y cabe destacar que la gelatina es el único agente gelificante que a concentraciones tan bajas como el 1% puede formar un gel termorreversible a 30-40°C, provocando una liberación intensa del sabor y aroma, deseable en muchos alimentos (Poppe, 1992; Salvador Alcaraz, 1998; Karim y Bhat, 2008).

- Propiedades funcionales.

Las propiedades funcionales de la gelatina se pueden dividir en dos grupos. El primero tiene propiedades asociadas con la gelificación, por ejemplo, fuerza del gel, viscosidad y temperaturas de fusión y gelificación. El segundo grupo se relaciona con el comportamiento superficial de la gelatina, por ejemplo, función coloide protectora (Karim y Bhat, 2008).

- Viscosidad:

La viscosidad de una solución de gelatina depende de la temperatura; por encima de 40°C la viscosidad disminuye exponencialmente con el aumento de temperatura. Depende del pH siendo mínima en el punto isoeléctrico. Con el incremento de la concentración y la fuerza del gel, mayor es la viscosidad. También depende del tipo de gelatina (Poppe, 1992; Salvador Alcaraz, 1998).

1.7.6 Almidón.

- Definición.

El almidón es un polisacárido producido por las plantas como reserva de energía, encontrándose en granos de cereales, raíces, tubérculos, médulas del tallo, hojas, semillas, frutas y polen, bajo la forma de gránulos de tamaño y forma variable según la fuente botánica (Appelqvist y Debet, 1997; Abbas et al., 2010).

En términos generales, todos están compuestos por dos macromoléculas: amilosa y amilopectina (Appelqvist y Debet, 1997).

- Amilosa:

La amilosa es una cadena lineal de unidades de α -D-glucopiranosilo unidas por enlaces (1-4), aunque existen también moléculas (alrededor de una cada 180-320 unidades) que poseen unas pocas ramificaciones en posición (1-6) (Figura 21) (BeMiller y Whistler, 1996).

La mayoría de los almidones contienen alrededor del 25% de amilosa, aunque comercialmente existen almidones con un contenido superior entre 52% y 75% (BeMiller y Whistler, 1996).

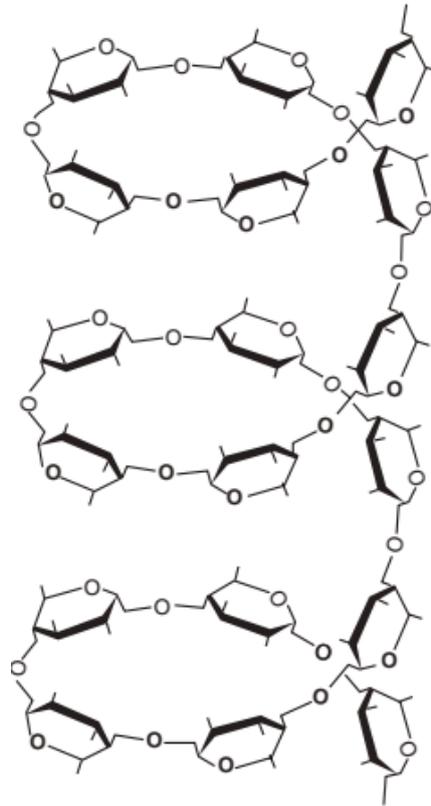


Figura 21. Enrollamiento helicoidal de la amilosa (Valdés Martínez, 2006).

– Amilopectina.

La amilopectina es una molécula muy grande y altamente ramificada con enlaces α -D-(1,6), localizados cada 15-25 unidades lineales de glucosa (Figura 22) (BeMiller y Whistler, 1996; Valdés Martínez, 2006). Dichas ramificaciones le dan a la amilopectina una forma molecular similar a la de un racimo (BeMiller y Whistler, 1996).

La mayoría de los almidones contienen alrededor del 75% de amilopectina, aunque existen almidones denominados *céreos* que están formados exclusivamente por esta macromolécula (BeMiller y Whistler, 1996; Valdés Martínez, 2006).

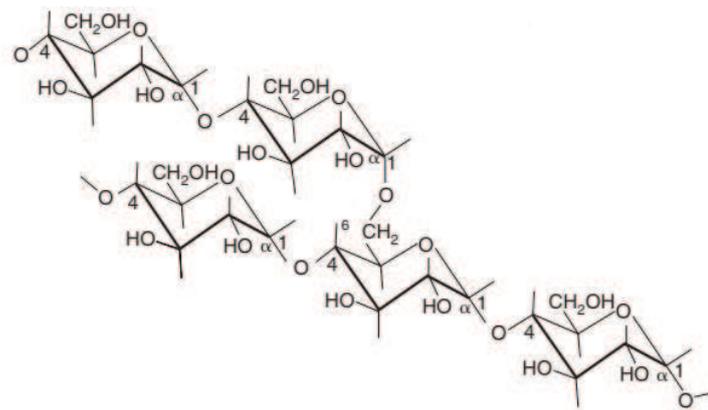


Figura 22. Estructura química de la molécula de amilopectina (Valdés Martínez, 2006).

- Gránulo de almidón.

Los gránulos de almidón consisten en moléculas de amilosa y/o amilopectina ordenadas de forma radial, con regiones cristalinas y amorfas alternadas (BeMiller y Whistler, 1996).

- Gelatinización.

Los gránulos de almidón son insolubles en agua fría debido a que su estructura está altamente organizada ya que presenta una gran estabilidad por las múltiples interacciones que existen con sus dos polisacáridos constituyentes. Sin embargo, cuando se calientan empieza un proceso lento de absorción de agua en las zonas amorfas, que son las menos organizadas y las más accesibles, ya que los puentes de hidrógeno no son tan numerosos ni rígidos como en las áreas cristalinas (Valdés Martínez, 2006). A medida que se incrementa la temperatura se retiene más agua, el gránulo empieza a hincharse y la estructura cristalina inicia un proceso semejante al de la zona amorfa hasta que se alcanzan ciertas temperaturas, intervalo donde se produce la gelatinización, es decir, la disrupción de la estructura ordenada de los gránulos, lo que se evidencia por el hinchamiento irreversible y la pérdida de birrefringencia y cristalinidad de los mismos (Figura 23) (BeMiller y Whistler, 1996; Valdés Martínez, 2006).

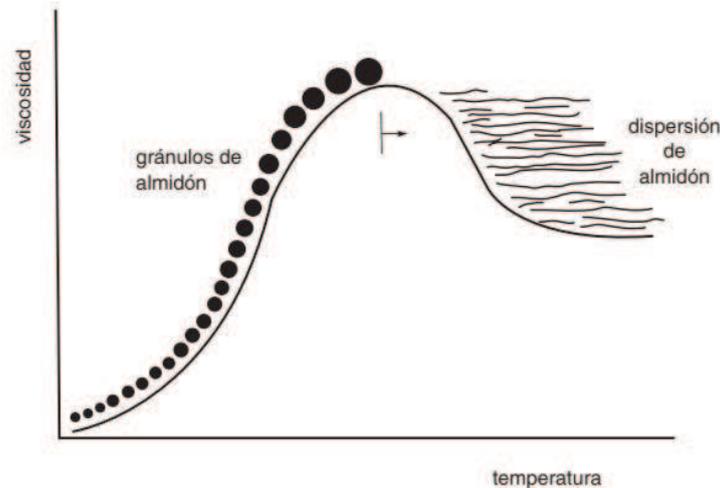


Figura 23. Gelatinización del almidón; los gránulos se hinchan y retienen un máximo de agua hasta que se rompen y producen una dispersión de moléculas de amilosa y amilopectina (Valdés Martínez, 2006).

– Retrogradación.

La retrogradación se define como la insolubilización y la precipitación espontánea, principalmente de las moléculas de amilosa, debido a que sus cadenas lineales se orientan de forma paralela y reaccionan entre sí por puentes de hidrógeno a través de sus múltiples hidroxilos. Esto se puede llevar a cabo por diversas rutas, según la concentración y la temperatura del sistema (Figura 24). Si una solución concentrada de amilosa se calienta y se enfría rápidamente hasta alcanzar la temperatura ambiente se forma un gel viscoelástico, firme, rígido y reversible, pero si una solución diluida se deja reposar y enfriar lentamente se vuelve opaca y precipita, siendo este material insoluble cada vez más difícil de redissolver por calentamiento (BeMiller y Whistler, 1996; Valdés Martínez, 2006).

La velocidad de retrogradación depende de diversas variables, entre las que se encuentran la relación molecular amilosa/amilopectina, las estructuras de las moléculas de amilosa y amilopectina determinadas por la fuente botánica del almidón, la temperatura, la concentración de almidón, y la presencia y concentración de otros ingredientes como surfactantes y sales (BeMiller y Whistler, 1996).

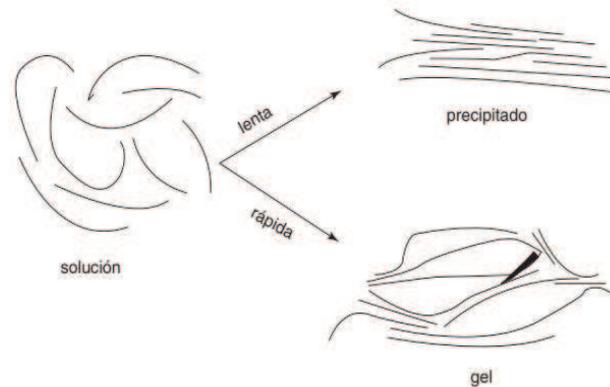


Figura 24. Mecanismos de retrogradación del almidón (Valdés Martínez, 2006).

– Almidones modificados.

Los almidones nativos presentan limitaciones en cuanto a sus propiedades funcionales, razón por la cual se modificaron enzimática, física y químicamente (Tabla 6), de manera que los productos resultantes puedan resistir diferentes condiciones de procesamiento de alimentos como calor, fuerza y ácidos (BeMiller y Whistler, 1996; Valdés Martínez, 2006; Abbas et al., 2010). Por lo tanto, los almidones modificados pueden definirse como ingredientes funcionales, útiles y abundantes en los alimentos procesados (BeMiller y Whistler, 1996).

Tabla 6 Clasificación de almidones modificados.

| Tipo de modificación | | Productos |
|-------------------------|----------------------------------|--|
| Modificación química | Entrecruzamiento | Fosfato de dialmidón, etc |
| | Substitución | Ésteres de almidón: almidón acetilado, almidón fosfato, almidón tratado con octenilsuccinato. Éter de almidón: almidón hidroxipropilado, almidón carboximetilado, almidón cationizado, etc. |
| | Conversión | Almidón convertido en ácido, almidón oxidado, almidón blanqueado. Dextrinización: dextrina. |
| Modificación física | Pregelatinización | Almidón pregelatinizado. |
| | Tratamiento térmico Radiación | Almidón tratado con calor-humedad, almidón recocado. Almidón tratado con radiación. |
| Modificación enzimática | | Maltodextrina, ciclodextrina, amilosa, etc. |

Nota. Fuente: (Abbas *et al.*, 2010)

– Entrecruzamiento:

La mayoría de los almidones modificados son entrecruzados. Puede utilizarse como espesante y estabilizante, no retrograda ni gelifica y su sinéresis es mínima (Valdés Martínez, 2006).

– Esterificación:

Los almidones sustituidos de interés industrial son principalmente producidos por esterificación, siendo esta la reacción que involucra la sustitución de grupos hidroxilos por grupos éster (Tupa Valencia, 2019).

Como resultado de la esterificación se obtienen almidones con menor temperatura de gelatinización y estables frente a la retrogradación y ciclos de congelamiento-descongelamiento. Además, se hidratan más fácilmente y sus pastas son más claras y viscosas que las correspondientes a los almidones nativos (BeMiller y Whistler, 1996; Valdés Martínez, 2006).

– Eterificación:

El principal producto obtenido por eterificación es el hidroxipropil almidón que posee propiedades similares al almidón acetilado ya que ambos provocan una reducción en la temperatura de gelatinización y en la tendencia a la retrogradación y tienen protuberancias laterales a lo largo de la cadena de polímero, lo que quiere decir que son almidones estabilizados (BeMiller y Whistler, 1996; Valdés Martínez, 2006). Sin embargo, el hidroxipropil almidón se destaca por ser más estable frente a ciclos de congelamiento-descongelamiento y, además, es más popular en la industria láctea ya que el acetilado causa desestabilización de las proteínas y granulosis por la liberación hidrolítica de grupos acetilo (Mason, 2009).

1.7.7 Interacción almidón-gelatina.

La estructura y las propiedades reológicas y fisicoquímicas de muchos alimentos procesados están determinadas en gran medida por el comportamiento de proteínas y polisacáridos. Por esto es de gran interés considerar las interacciones entre estos biopolímeros (Appelqvist y Debet, 1997).

En muchos alimentos se utilizan combinaciones de agentes gelificantes para lograr propiedades distintas a las obtenidas con la utilización individual de los mismos (Poppe, 1992). Por ejemplo, el uso de gelatina disminuye la tendencia a la sinéresis y mejora la textura incrementando la firmeza de geles lácteos, efecto atribuido a su interacción con la matriz de caseína (Ares, 2007). Sin embargo, un producto estabilizado solo con gelatina presenta propiedades mecánicas que son muy sensibles a las variaciones térmicas y, aun a una temperatura constante, dependen del tiempo y de la historia térmica previa (Olivares, 2007). Por otro lado, la utilización individual del almidón aumenta la viscosidad de los alimentos y mejora la sensación en la boca, pero tiene el inconveniente de que cuando el gel es enfriado y mantenido en reposo manifiesta la pérdida de agua contenida en la red tridimensional de la amilosa y la retracción del gel, producto de un incremento en la asociación de tipo cristalino procedente de la amilosa (Ares, 2007; Tupa Valencia, 2019). Al utilizar conjuntamente gelatina y almidón se forma un gel mixto donde los gránulos de almidón están presentes como partículas dispersas en una matriz de gelatina, el mismo presenta una mayor estabilidad frente a la temperatura y menor riesgo de sinéresis (Poppe, 1992). Por esta razón, los sistemas mixtos son de gran

importancia tecnológica y se pueden utilizar como uno de los enfoques para modular las características de los geles obtenidos (Karim y Bhat, 2008).

Por último, cabe destacar que Simionescu et al. (2013) estudiaron sistemas mixtos de almidón y gelatina llegando a la conclusión que es posible obtener geles con grandes variedades texturales, siendo aptos para la preparación de diferentes tipos de alimentos. Además, concluyeron que las temperaturas de fusión de dichos geles mixtos son muy cercanas a las temperaturas de fusión de los geles de gelatina.

1.8 PARÁMETROS DE CALIDAD.

1.8.1 Reología.

1.8.1.1 Definición e importancia.

La reología es la ciencia que estudia la deformación y el flujo de los materiales cuando se someten a una fuerza externa (Gunasekaran y Ak, 2003; Fox et al., 2017). Además, permite caracterizar el flujo y las propiedades viscoelásticas de materiales que van desde líquidos de baja viscosidad hasta sólidos rígidos (Paroline, 2016).

Fox et al. (2017), sostienen que las propiedades reológicas del queso son de considerable importancia ya que afectan:

- Las características de manipulación, servido y envasado.
- La textura y calidad de consumo.
- Las operaciones de procesado, como el mezclado/cizallamiento.

En resumen, las propiedades reológicas del queso son atributos de calidad que son importantes para el fabricante, envasador, distribuidor, minorista, usuario industrial y consumidor (Fox et al., 2017).

1.8.1.2 Conceptos básicos.

Los alimentos pueden exhibir distintos comportamientos reológicos, los cuales serán descritos a continuación (Velasquez, 2006).

1.8.1.3 Fluidos Newtonianos.

Los fluidos Newtonianos, comúnmente denominados “líquidos ideales”, se caracterizan por ser incompresibles dado que su volumen no cambia con la fuerza aplicada, isotrópicos porque sus propiedades son iguales en todas las direcciones, estructuralmente homogéneos y por tener una viscosidad constante, es decir, que no varía

con la velocidad de deformación y el tiempo de aplicación de la cizalla (Figura 25) (Bourne, 2002; Zheng, 2019).

1.8.1.4 Fluidos no Newtonianos.

Los fluidos no Newtonianos, suelen ser también denominados “líquidos no ideales” y se caracterizan por tener una viscosidad que varía en función de la velocidad de deformación o con el tiempo de cizalla. Por lo tanto, la viscosidad es referida como viscosidad aparente y se suele representar con la letra griega η (Bourne, 2002; García Quesada, 2008).

- Variación de la viscosidad con la velocidad de deformación.
- Comportamiento pseudoplástico:

Muchos materiales muestran este tipo de comportamiento en mayor o menor grado y es el más común. Se manifiesta como un decrecimiento en la viscosidad aparente a medida que aumenta el gradiente de deformación (Figura 25) y comúnmente es referido como "*shear thinning*" (Bourne, 2002; Miri, 2011).

- Comportamiento dilatante:

Este tipo de comportamiento es menos común que el pseudoplástico y se manifiesta por un incremento en la viscosidad aparente a medida que aumenta el gradiente de deformación (Figura 25) y normalmente es referido como "*shear thickening*" (Miri, 2011).

- Comportamiento plástico:

La plasticidad es un fenómeno que muestran ciertos materiales que se comportan como sólidos elásticos debido al almacenamiento de cierta cantidad de energía cuando estos materiales son sometidos a esfuerzos menores que cierto valor umbral. Mientras que con un esfuerzo superior al umbral se deforman continuamente como un fluido, siendo el esfuerzo de corte una función lineal (plástico ideal) o no (plástico real) de la velocidad de deformación (Figura 25) (Miri, 2011).

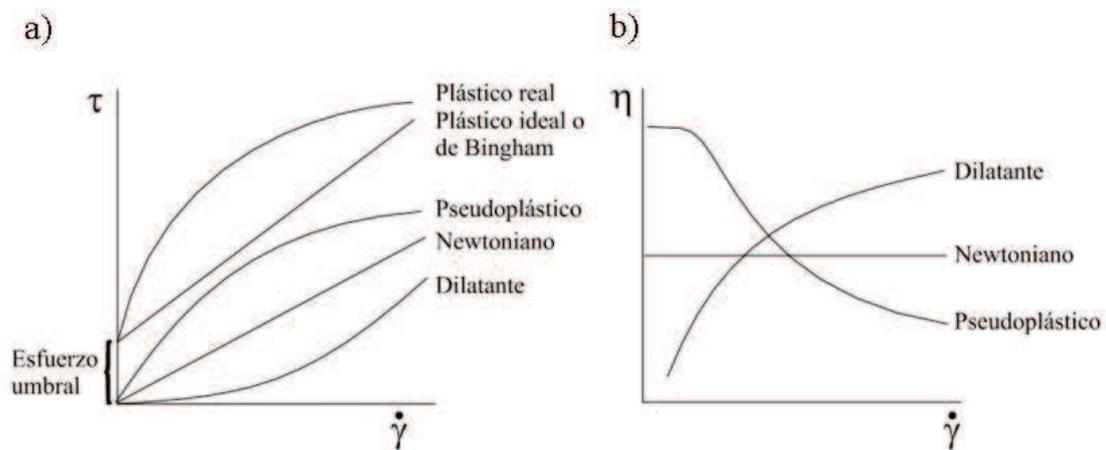


Figura 25. a) Curvas de flujo para los distintos tipos de comportamientos en un gráfico de esfuerzo de corte vs gradiente de deformación. b) Curvas de flujo para los distintos tipos de comportamientos en un gráfico de viscosidad vs gradiente de deformación.

- Variación de la viscosidad con el tiempo de aplicación de la cizalla.
- Comportamiento reopéctico:

El comportamiento reopéctico es un fenómeno difícil de encontrar en la industria alimentaria y comprende un aumento de la viscosidad aparente conforme aumenta el tiempo de aplicación de la deformación (Miri, 2011; Bourne, 2002). Una de las razones más importantes que explica este comportamiento es la formación de agregados como consecuencia del aumento de las colisiones entre partículas (Miri, 2011).

- Comportamiento tixotrópico:

El comportamiento tixotrópico comprende una disminución de la viscosidad aparente conforme aumenta el tiempo de aplicación de la deformación. Este fenómeno puede ser consecuencia de la ruptura de los enlaces débiles de los agregados que componen el alimento, y de la alineación y/o deformación de las moléculas en la dirección del flujo, ofreciendo así menos resistencia a éste. Además, cabe destacar que la tixotropía puede ser irreversible (rheomalaxia) o contrariamente, una vez que la fuerza de corte es removida los agregados pueden reestructurarse con el tiempo a medida que las partículas colisionan unas con otras debido al movimiento Browniano (Gahona, 2004).

El efecto de la tixotropía en una muestra puede ser visualizado en la Figura 26, donde se observa histéresis (separación entre curva superior e inferior), cuándo a un mismo gradiente de deformación la viscosidad obtenida de la curva superior es mayor que la viscosidad de la curva inferior.

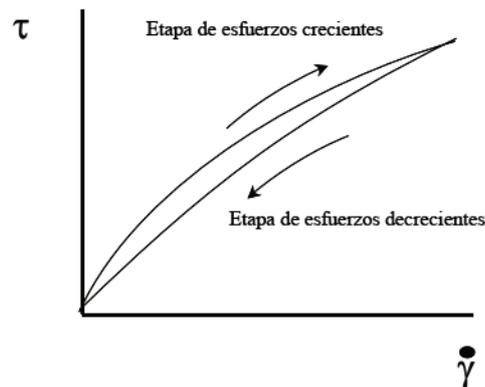


Figura 26. Ciclo de histéresis observado para un fluido tixotrópico.

1.8.1.5 Reometría.

La reometría comprende las técnicas experimentales y las herramientas utilizadas para determinar las propiedades reológicas de los materiales (Paroline, 2016).

Existe una gran variedad de instrumentos de laboratorio para medir las propiedades reológicas de los materiales, estos pueden ser viscosímetros rotacionales, capilares y de cuerpo móvil, siendo los primeros los más utilizados (Miri, 2011; Bourne, 2002).

1.8.1.6 Viscosímetro de cilindros concéntricos.

Uno de los equipos más adecuados para estudiar el flujo de los materiales es mediante la geometría de cilindros concéntricos, la cual consta de dos cilindros, uno interno (llamado "bob") colocado dentro de un cilindro externo (llamado "copa"), formándose un espacio anular (gap) entre ambos que es donde está contenida la muestra. Este instrumento puede operar de tal forma que el cilindro móvil sea el interno (viscosímetro de tipo Searle) o el externo (viscosímetro de tipo Couette). En los viscosímetros de cilindros concéntricos la velocidad de deformación es idéntica en toda la muestra, siempre y cuando se minimicen todos los efectos de extremo; permiten modificar, de modo controlado, la velocidad de deformación tangencial variando la velocidad de giro y el tiempo que a cada una de ellas se está operando. Durante el ensayo, primero se aumenta la velocidad por etapas regulares y luego se disminuye del mismo modo (Bourne, 2002).

1.8.1.7 Modelos y parámetros reológicos.

Muchos modelos empíricos se han propuesto para el tratamiento de los datos experimentales para describir el comportamiento reológico de un fluido no newtoniano. Sin embargo, es muy posible que un único modelo no correlacione satisfactoriamente el comportamiento de una determinada sustancia. Por lo cual, dependiendo del producto se

establece el mejor modelo o el uso combinado de los mismos, entre los que pueden estar el de la ley de la potencia o su modificación, Casson, Herschel y Bulkley, etc. (García Quesada, 2008).

Dos de los modelos más comúnmente utilizados son los modelos de Casson modificado y Herschel y Bulkley

$$\tau^{0,5} = \tau_0^{0,5} + K_c \times \dot{\gamma}^{0,5}$$

donde:

K_c : constante de Casson

τ_0 : umbral de fluencia que es la fuerza mínima requerida para iniciar el flujo y es una medida de la resistencia de la red formada, por interacción entre partículas (Vanegas Pérez, 2009).

$$\tau = \tau_0 + K \times \dot{\gamma}^n$$

donde:

K : índice de consistencia: medida de la consistencia del producto, se relaciona directamente con la viscosidad del sistema.

n : índice de comportamiento: relaciona la dependencia del comportamiento de flujo con el gradiente de deformación $\dot{\gamma}$.

Cuando $n = 1$, el fluido es newtoniano, cuando $0 < n < 1$ el fluido es pseudoplástico y cuando $n > 1$ el fluido es dilatante (Steffe, 1996).

Al no ser lineal la ecuación anterior se presenta la dificultad para calcular los parámetros K y n a partir de la misma. Este inconveniente se puede superar realizando su linealización utilizando logaritmos en base 10, aplicados miembro a miembro y calculando K y n a partir de la ordenada al origen y la pendiente de la recta obtenida, respectivamente.

$$\log (\tau - \tau_0) = \log K + n \cdot \log \dot{\gamma}$$

1.8.2 Textura.

1.8.2.1 Definición.

Según Bourne (2002), las propiedades texturales de un alimento son un grupo de características físicas que surgen de los elementos estructurales del alimento, se perciben principalmente a través del sentido del tacto, están relacionadas con la deformación, desintegración y flujo del alimento bajo una fuerza, y se miden objetivamente mediante funciones de masa, tiempo y distancia. Cabe destacar que, si bien no existe una sola definición de textura, hay varias características en común:

- Es un grupo de propiedades físicas que derivan de la estructura del alimento.
- Pertenece a la categoría de propiedades mecánicas o reológicas de las propiedades físicas. Las propiedades ópticas, eléctricas y magnéticas, así como las propiedades de temperatura y térmicas, son propiedades físicas que se excluyen de la definición de textura.
- Consiste en un conjunto de propiedades, no en una sola propiedad.
- La textura se percibe principalmente a través del sentido del tacto, usualmente en la boca, aunque otras partes del cuerpo (frecuentemente las manos) también pueden estar involucradas.
- No está relacionada con los sentidos químicos del gusto o el olfato.

1.8.2.2 Medición de textura.

Los métodos instrumentales son más fáciles de realizar, estandarizar, reproducir y requieren el uso de menos personas capacitadas, como es el caso de un panel de evaluadores sensoriales. Por lo tanto, gran parte del esfuerzo de investigación se ha centrado en la medición de propiedades texturales utilizando métodos instrumentales (Fox *et al.*, 2017).

1.8.2.3 Clasificación de técnicas instrumentales.

Según Gunasekaran y Ak (2003), las técnicas instrumentales se pueden clasificar en tres grupos según el tipo de información que brindan:

- Técnicas fundamentales: comprenden técnicas reológicas rigurosas y los datos son analizados utilizando teorías y modelos reológicos, estructurales y moleculares bien definidos (Gunasekaran y Ak, 2003; Rustagi, 2020). Las dificultades asociadas con este enfoque surgen de la estructura generalmente compleja y con frecuencia no uniforme de la mayoría de los alimentos

naturales y manufacturados ya que muy pocos exhiben un verdadero comportamiento elástico, viscoso o plástico (Cazzaniga, 2019). Algunas pruebas fundamentales que se utilizan popularmente para la evaluación de textura incluyen pruebas de compresión, flexión y torsión uniaxiales (Gunasekaran y Ak, 2003).

- Técnicas empíricas: son aquellas pruebas que relacionan una variable medida con una propiedad del material sin bases científicas rigurosas (Gunasekaran y Ak, 2003; Rustagi, 2020). Los problemas con este tipo de ensayo son la definición deficiente de lo que se está midiendo, la arbitrariedad de la prueba y su limitación solo a un pequeño número de productos (Cazzaniga, 2019). Las pruebas de penetrómetro, punción y compresión de bola son buenos ejemplos de mediciones empíricas (Gunasekaran y Ak, 2003; Rustagi, 2020; Bourne 2002).
- Técnicas imitativas: son sistemas de medición que tratan de imitar la evaluación sensorial humana simulando el proceso de masticación. Un ejemplo de técnica imitativa es el TPA (análisis de perfil de textura) (Gunasekaran y Ak, 2003; Rustagi, 2022; Bourne, 2002).

1.8.2.4 Ensayo de penetración.

La evaluación de textura mediante un penetrómetro (por ejemplo, una aguja, como una sonda), implica la medición de la fuerza a determinada profundidad a la que puede ser introducida una sonda o probeta en un queso bajo una tensión constante durante un tiempo determinado. En esta prueba se introduce una sonda cónica o cilíndrica en el queso bajo condiciones controladas de velocidad y profundidad. La fuerza necesaria para penetrar en el queso refleja la dureza y otras características texturales (Stable Micro Systems, 2021). El avance de la sonda se retarda en cierta medida en función de la dureza/firmeza del queso a su paso, la adherencia del queso a su superficie y la superficie de contacto con el queso (Fox et al., 2017). En esta prueba, tanto las fuerzas de compresión como las de corte están involucradas, causando un cambio irreversible en la muestra. Además, el producto que se analice debe tener un área mayor que el área de contacto de la sonda en uso, de lo contrario solo asumiría principios de compresión (Bourne, 2002).

1.8.3 Color.

1.8.3.1 Definición.

El color es uno de los atributos que afectan la percepción del consumidor sobre la calidad. Junto con el sabor y la textura se consideran atributos importantes que contribuyen a la calidad general de los productos. Por ello, en la industria alimentaria, la evaluación del color se ha convertido en una parte importante de la gestión de la calidad de los productos y procesos (Burrows, 2009).

El color en los productos lácteos influye significativamente en la aceptación del consumidor ya que está asociado con las características sensoriales y fresca (Milovanovic et al., 2020). Según Figura y Teixeira (2007), el color no es solamente un fenómeno psíquico o psicológico, sino que es el resultado de la evaluación de la energía radiante (una magnitud física) en términos de una correlación visual (psicológica) y que está basada en las propiedades del ojo humano (fisiológicas).

1.8.3.2 Medición del color.

Las mediciones de color pueden ser realizadas de forma visual (con el ojo humano), instrumental con un colorímetro/espectrofotómetro o utilizando visión digital (Mathias-Rettig y Ah-Hen, 2014).

1.8.3.3 Sistema CIELAB.

El espacio de color CIELAB, también referido como espacio CIEL*a*b*, es actualmente uno de los sistemas más populares y uniformes usados para evaluar el color en el área de alimentos, ya que permite correlacionar los valores numéricos de color con la percepción visual humana (Talens Oliag, 2017).

El sistema CIELAB consiste en un sistema tridimensional esférico formado por tres ejes, un eje vertical (L^*) y dos ejes horizontales (a^* y b^*) (Figura 27). El eje vertical L^* representa la medida de luminosidad de un color, variando desde 0 para un negro hasta 100 para un blanco. Las coordenadas colorimétricas a^* y b^* forman un plano perpendicular a la coordenada L^* . La a^* define la desviación del punto acromático correspondiente a la luminosidad hacia el rojo si a^* es positiva, y hacia el verde si a^* es negativa. Análogamente la coordenada b^* define la desviación hacia el amarillo si b^* es positiva, y hacia el azul si b^* es negativa (Milovanovic et al., 2020; Talens Oliag, 2017).

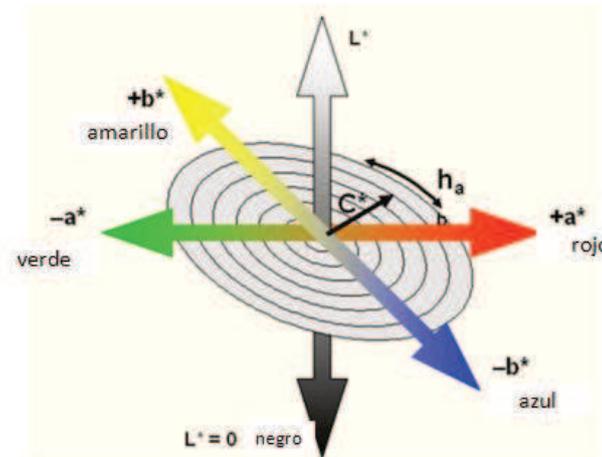


Figura 27. Representación gráfica de los parámetros de color $L^*a^*b^*$ y $L^*C^*_{ab}$ hab.

Los colorímetros o instrumentos para la medición de color están basados en la visión del ojo humano y consisten en dispositivos triestimulares que miden la intensidad de las longitudes de onda transmitidas a través de cada uno de los tres filtros rojo, verde y azul. De esta forma la medición simula la respuesta del ojo humano al color y la luz (Figura y Teixeira, 2007). Para ello, existe una gran variedad de equipos tales como los colorímetros Hunter Lab, Gardner, Color Eye, Color Master, Momcolor, Dr. Lange y Minolta (Mathias-Rettig y Ah-Hen, 2014).

1.8.4 Calidad sensorial.

1.8.4.1 Definición.

La calidad sensorial de un alimento no es una característica propia de este, es un concepto muy amplio debido a que es el resultado de la interacción alimento-hombre y se puede definir como la sensación humana provocada por determinados estímulos (agentes químicos o físicos) procedentes del alimento que depende no sólo de la clase e intensidad del estímulo, sino también de las condiciones del ser humano. Sobre la base de reconocer que la calidad sensorial depende de las sensaciones humanas es imprescindible la correcta planificación de la evaluación sensorial (Clark et al., 2009; Espinosa Manfugás, 2007).

1.8.4.2 Evaluación sensorial.

La evaluación sensorial es una disciplina científica que estudia la forma en cómo percibimos las diferentes propiedades de los alimentos a través de los sentidos, como el sabor, el olor, la textura y el aspecto visual. Este análisis es común tanto en el desarrollo e innovación de alimentos como en el control de calidad, lo cual permite evaluar y mejorar la aceptabilidad de los alimentos según las preferencias del consumidor. Las técnicas más comunes incluyen la evaluación descriptiva sensorial y las pruebas de aceptación del consumidor. La primera se basa en paneles entrenados que describen y cuantifican características específicas del alimento como perfiles de sabor y textura, mientras que la segunda se centra en la respuesta hedónica de consumidores evidenciando la satisfacción general respecto de los productos (Yang & Lee, 2020)

Con respecto a las pruebas sensoriales que pueden ser utilizadas, Clark et al. (2009) establecen que existen dos grandes grupos: pruebas analíticas y pruebas afectivas, en ambos casos las pruebas pueden ser discriminatorias y descriptivas (Figura 28). Las pruebas sensoriales analíticas tienen como objetivo la evaluación comparativa o descriptiva de la calidad mediante un grupo reducido de catadores experimentados, adiestrados o expertos, mientras que las afectivas, por el contrario, brindan información acerca de la preferencia o aceptación que tienen los consumidores por el producto que se evalúa, para lo que se debe trabajar con un gran número de degustadores no entrenados representativos de la población (Torricella Morales, 2008).

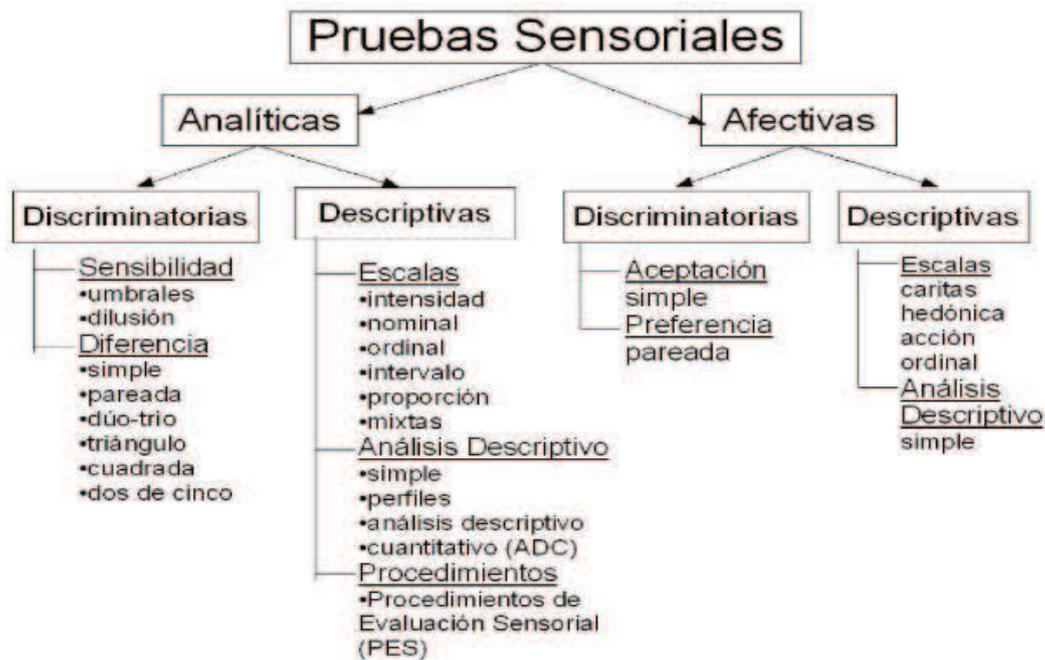


Figura 28. Clasificación de las pruebas sensoriales según su objetivo (Torricella Morales, 2008).

1.8.4.3 Análisis descriptivo cuantitativo.

El análisis cuantitativo descriptivo (QDA, por sus siglas en inglés) es un método estandarizado de la ciencia sensorial que cuantifica y describe de manera muy precisa las características sensoriales de los alimentos. El QDA permite identificar y medir atributos específicos como el sabor, la textura y el aroma, usando escalas de intensidad y paneles sensoriales entrenados para asegurar datos objetivos y reproducibles. A diferencia de otros métodos, el QDA permite que cada panelista registre observaciones de manera individual, lo que facilita la recopilación de datos más detallados y diversos (Bleibaum et al., 2020).

El QDA tiene como objetivo identificar y cuantificar todas las características sensoriales de un producto, brindando información completa sobre la calidad sensorial del mismo (Clark et al., 2009; Torricella Morales, 2008). El método es ampliamente utilizado y permite establecer Gráficamente patrones que pueden utilizarse en cualquier momento para describir y analizar un producto. Además, es importante que se requiere de un panel sensorial entrenado capaz de reproducir sus juicios, percibir diferencias y trabajar en grupo. Según Sidel et al. (2018), los objetivos del método QDA incluyen:

- Proporcionar un procedimiento científicamente riguroso con resultados cuantificables

- Producir resultados que se puedan generalizar directamente a los consumidores
- Emplear un líder de panel que sea un facilitador de debates, no un profesor
- Involucrar todas las modalidades sensoriales y su interacción
- Ser rentable
- Seleccionar y capacitar a los sujetos en menos de dos semanas
- Proporcionar múltiples aplicaciones en el desarrollo de productos, control de calidad, y marketing.

1.8.4.4 Propiedades sensoriales del queso.

Las características sensoriales de un queso untable están relacionadas con aspectos clave como sabor, textura, apariencia y aroma, los cuales son esenciales para su aceptación entre los consumidores.

- **Textura:** un queso untable normalmente es cremoso, suave y fácil de esparcir. Esta característica se evalúa mediante parámetros como la cohesividad y adhesividad que indican que tan homogéneo y uniforme es el queso cuando se esparce sobre una superficie. Además, las propiedades reológicas, como la viscosidad, son importantes para asegurar que el queso mantenga una consistencia deseable tanto en refrigeración como a temperatura ambiente (Lemes et al., 2020; Giri et al., 2020).

- **Apariencia:** debe ser homogénea y atractiva, ya que el color y la uniformidad pueden influir en la percepción de frescura y calidad del producto. En evaluaciones sensoriales, los consumidores suelen preferir quesos sin partículas visibles o grumos y que mantengan un color blanco o ligeramente amarillo, típico de los productos lácteos (Hanaei et al., 2020).

- **Flavor:** percepción integrada de los estímulos olfativos, gustativos y trigéminales. La percepción comienza antes del consumo del queso, es decir, cuando un consumidor puede olerlo, pero finalmente se percibe cuando los compuestos que estimulan el sistema olfativo en la nariz, el sistema del gusto en la boca y el sistema trigeminal en la boca y la nariz se liberan del queso y están disponibles para los receptores. Las características típicas de *flavor* de los quesos untables incluyen sabor a crema, sabor salado y sabor ácido. Los quesos untables suelen tener un sabor más suave, ligeramente ácido y a veces salado, dependiendo de los ingredientes y procesos de fermentación. Un aroma láctico

fresco, sin olores intensos, es preferido por los consumidores (Giri et al., 2020; Hanaei et al., 2020).

1.9 IMPORTANCIA DEL TEMA DE INVESTIGACIÓN

El desarrollo de un queso de muy alta humedad con adición de lactosuero es una propuesta innovadora, debido a que actualmente se considera un producto lácteo de consumo masivo, por encima incluso de los quesos duros. El desarrollo de esta tesis está enfocado en que la industria pueda utilizar un efluente que esta subvalorado y que con la adición de este se puedan obtener productos con mayor valor agregado que, a más de ser un aporte al cuidado del medio ambiente, permitirá el agregado de compuestos con efecto benéfico para la salud. El principal desafío es poder obtener un producto con características similares a los productos existentes en el mercado, y con características sensoriales y aceptabilidad apropiadas, de manera de poder transferir el proceso y las formulaciones al sector productivo.

Además, la fortificación de productos alimenticios con hierro se ha considerado como una estrategia clave para combatir la deficiencia de este mineral, el cual, es uno de los problemas nutricionales más prevalentes a nivel mundial, ya que genera anemia ferropénica. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS) se estima que más del 30% de la población mundial sufre de anemia (WHO, 2021). La fortificación de alimentos, incluidos los productos lácteos, es una forma efectiva de mejorar la ingesta de hierro en poblaciones vulnerables, principalmente mujeres en edad fértil, embarazadas, niños y adolescentes (Bailey, West y Black, 2015; Sabatier et al., 2017).

También se ha observado en niños que la deficiencia de hierro está asociada con retrasos en el desarrollo cognitivo y motor. Algunos estudios han demostrado que la fortificación de alimentos con hierro mejora el rendimiento cognitivo y el crecimiento en poblaciones infantiles (Singh y Park, 2024).

Además, en adultos se ha visto que la anemia por deficiencia de hierro reduce la capacidad de trabajo y la productividad. Por lo que la fortificación podría mejorar la salud y productividad de las poblaciones (Stefos et al., 2024).

1.10 OBJETIVOS

1.10.1 Objetivo General

“Desarrollar quesos con características funcionales de muy alta humedad, con adición de lactosuero”.

1.10.2 Objetivos específicos

- Estudiar el efecto de distintos hidrocoloides sobre las propiedades fisicoquímicas, mecánicas y sensoriales de quesos de muy alta humedad (untables), tipo clásico, utilizando diseños estadísticos experimentales.
- Modelar los sistemas en estudio a través de la metodología de regresión múltiple, con variables codificadas, y el uso de superficies de respuesta.
- Optimizar las variables estudiadas obteniendo una formulación específica, de un producto con características que se asemejen a las de un producto marca líder en el mercado, con costo mínimo de formulación.
- Validar los modelos obtenidos a través de la elaboración de muestras de queso untable con las condiciones obtenidas al optimizar múltiples respuestas, y con otra/s condición/es dentro del rango tecnológico investigado.
- Incrementar la funcionalidad de la formulación optimizada mediante la adición de distintos compuestos o ingredientes funcionales (hierro) y comparar sus principales características fisicoquímicas, mecánicas y sensoriales, con productos similares de primera marca, del mercado argentino.
- Realizar el análisis de los distintos productos obtenidos durante el tiempo de almacenamiento y cuantificar la variabilidad de sus características principales.

2 MATERIALES Y MÉTODOS:

2.1 CARACTERIZACIÓN DEL QUESO CASANCREM CLÁSICO.

Primeramente, se establecieron las condiciones operativas y de formulación de acuerdo con la caracterización y relevamiento de información de un producto similar existente en el mercado (Queso CasanCrem Clásico). Para esto, se realizó una caracterización fisicoquímica (pH, acidez titulable, sólidos totales, grasa, proteína, cenizas, actividad de agua y sinéresis), colorimétrica, reológica y textural. Los mismos análisis fueron los que posteriormente se realizaron a cada uno de los tratamientos realizados y que se muestran en el presente estudio.

2.2 PRODUCCIÓN DE QUESO UNTABLE.

2.2.1 Materias Primas.

Para la formulación de los quesos análogos untables se utilizaron las siguientes materias primas adquiridas principalmente de proveedores locales:

- Agua
- Lactosuero en polvo desmineralizado al 40 % (DEMI 40 - Lácteos La Cristina S.A”).
- Crema de leche (Manfrey).
- WPC-35 (Milkaut S.A.).
- Leche en polvo entera (“Milkaut S.A.).
- Leche en polvo descremada (Milkaut S.A.).
- Gelatina (PB Leiner).
- Almidón modificado (Glutal S.A.).
- Cloruro de Calcio (CaCl_2 , Agrolac).
- Sorbato de Potasio ($\text{C}_6\text{H}_7\text{KO}_2$, Agrolac).
- Cuajo (Chymax Chr-Hansen).

2.2.2 Etapa de producción.

Conforme a lo detallado en la Figura 29, se propuso la elaboración de una cantidad de 2.700 g de producto, misma que alcanzará para todos los análisis a realizar, incluyendo el análisis sensorial con el panel semi entrenado. Para obtener esta cantidad de queso

untable, se pesaron y se rotularon 720-780 g de crema de leche, 90-110 g de suero en polvo desmineralizado, 1500-1550 g de agua, 130-150 g de leche en polvo entera, 60-80 g de leche en polvo descremada, 60-80 g de WPC-35 y cantidades variables de gelatina y almidón modificado según el diseño experimental (Tabla 7). Luego del pesaje, se reconstituyó el suero en polvo y se procedió a calentarlo a 45 °C junto con la crema. Posteriormente, se agitó con un agitador mecánico y se incorporaron la leche en polvo entera y descremada sin generar grumos, WPC-35, gelatina y almidón modificado, previamente mezclados; y se continuó con la agitación aumentando progresivamente la temperatura hasta alcanzar 75 °C, manteniendo esta temperatura durante 5 min. Luego se enfrió hasta 45 °C en un baño con agua y hielo, se pesó y se añadió, mientras se agitaba la masa, $C_6H_7KO_2$, $CaCl_2$ y ácido láctico hasta alcanzar un pH de 4,8-5 y 4 mL de cuajo. Luego se realizó la homogeneización del queso obtenido utilizando un homogeneizador (Simes) a una presión de 50 bar. Finalmente, se procedió al envasado en envases plásticos para finalmente almacenar el producto a una temperatura de 5-6 °C.

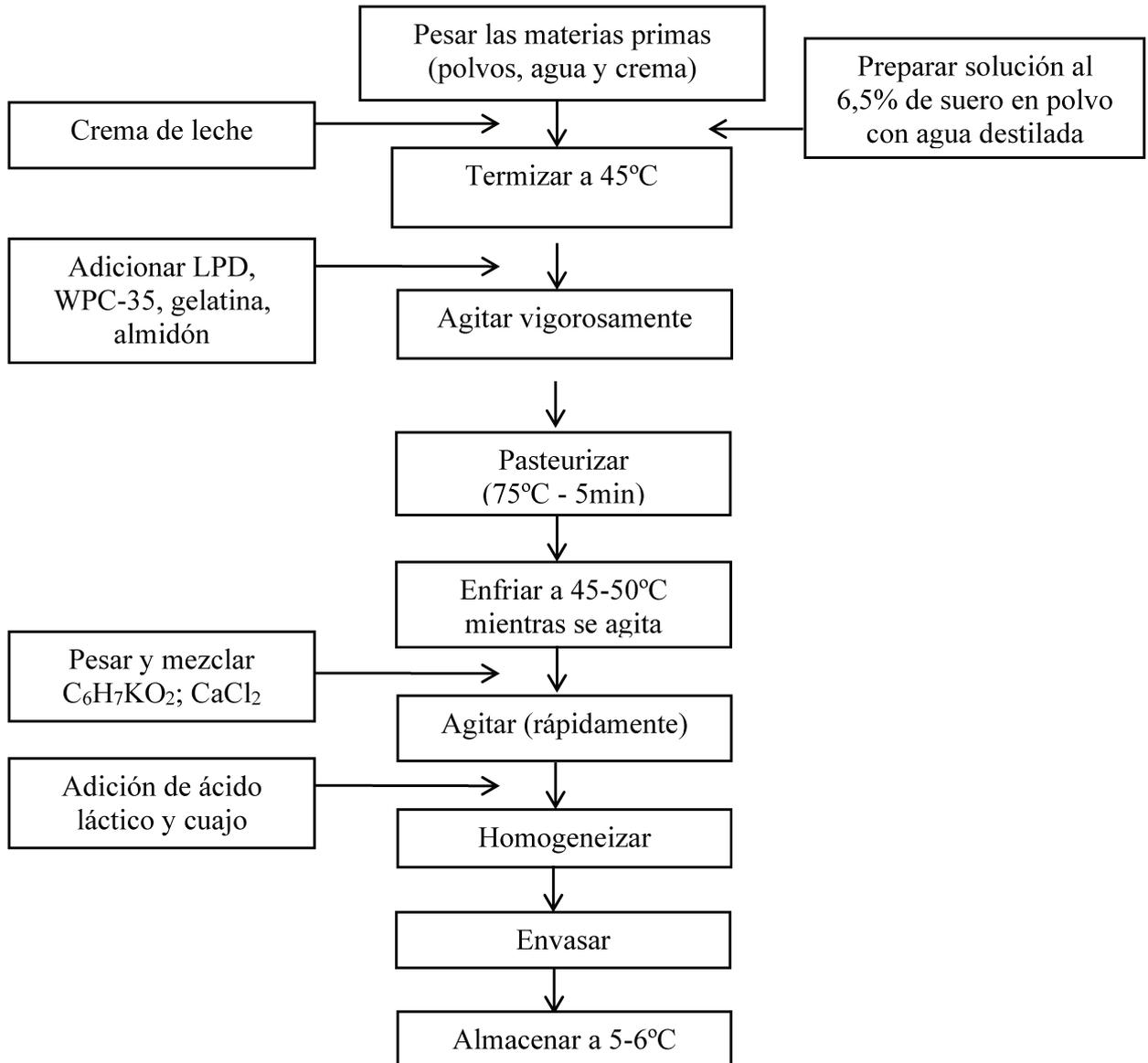


Figura 29. Diagrama de flujo del proceso de elaboración de queso untable con agregado de lactosuero.

2.2.3 Diseño experimental y análisis estadístico.

2.2.3.1 Diseño experimental Box-Behnken (BB)

Los ensayos se efectuaron siguiendo un diseño Box-Behnken, el cual permite estudiar la influencia de 3 variables en 3 niveles. Las variables serán: X1, el porcentaje de gelatina (G) a 0,5, 0,7 y 0,9 %; X2, el porcentaje de almidón modificado (AM) a 0,5, 0,7 y 0,9 %) y X3, el porcentaje de materia grasa (MG) a 10, 15 y 20 %, todos en la mezcla inicial.

Tabla 7 Concentraciones y codificación de las variables independientes utilizadas para la formulación de quesos untables.

| %ALMIDON | %GELATINA | % GRASA | ALMIDON COD | GELATINA COD | GRASA COD |
|----------|-----------|------------|----------------|-----------------|--------------|
| 0,7 | 0,7 | 15 | 0 | 0 | 0 |
| 0,7 | 0,9 | 20 | 0 | 1 | 1 |
| 0,5 | 0,5 | 15 | -1 | -1 | 0 |
| 0,7 | 0,5 | 10 | 0 | -1 | -1 |
| 0,5 | 0,7 | 10 | -1 | 0 | -1 |
| 0,9 | 0,7 | 20 | 1 | 0 | 1 |
| 0,7 | 0,5 | 20 | 0 | -1 | 1 |
| 0,9 | 0,9 | 15 | 1 | 1 | 0 |
| 0,5 | 0,9 | 15 | -1 | 1 | 0 |
| 0,7 | 0,9 | 10 | 0 | 1 | -1 |
| 0,9 | 0,7 | 10 | 1 | 0 | -1 |
| 0,5 | 0,7 | 20 | -1 | 0 | 1 |
| 0,7 | 0,7 | 15 | 0 | 0 | 0 |
| 0,9 | 0,5 | 15 | 1 | -1 | 0 |
| 0,7 | 0,7 | 15 | 0 | 0 | 0 |

COD: Codificado

Las respuestas analizadas fueron:

- Parámetros composicionales expresados en porcentaje.
 - Sólidos totales.
 - Grasa.
 - Proteína.
 - Cenizas.
 - Hidratos de carbono.
- Parámetros fisicoquímicos.
 - pH.
 - Acidez titulable (%).
 - a_w = actividad de agua.
 - Sinéresis (%).
- Parámetros de color.
 - L^* = Luminosidad.
 - a^* = parámetro de color a^* .
 - b^* = parámetro de color b^* .

- Parámetros texturales.
 - Firmeza (g).
 - Consistencia (g.s).
 - Cohesividad (g).
 - Adhesividad (g.s).
- Parámetros reológicos.
 - μ_{50} = viscosidad a gradiente de deformación $50s^{-1}$ (cP).
 - μ_{100} = viscosidad a gradiente de deformación $100s^{-1}$ (cP).
 - μ_{150} = viscosidad a gradiente de deformación $150s^{-1}$ (cP).
 - μ_{200} = viscosidad a gradiente de deformación $200s^{-1}$ (cP).
 - τ_0 : esfuerzo de corte inicial
 - K= índice de consistencia.
 - n= índice de comportamiento.
- Atributos sensoriales.
 - Color.
 - Brillo.
 - Sinéresis.
 - Consistencia.
 - Aspereza.
 - Untabilidad.
 - Uniformidad de la masa.
 - Adherencia.
 - Cremosidad.
 - Gusto salado.
 - Gusto ácido.
 - Sabor a polvo.
 - Sabor lácteo.
 - Sabor a cocido.
 - Sabor oxidado.
 - Sabor a crema.
 - *Flavor* residual.
 - Puntaje global.

Se estableció un modelo matemático de segundo orden (cuadrático), para cada respuesta (Y_{ki}), en relación con las dos variables independientes (codificadas) a estudiar, que permitió predecir y describir el comportamiento de los sistemas. La ecuación propuesta para los modelos del diseño Box Behnken fue:

$$Y_{ki} = \beta_i \cdot X_i + \beta_j \cdot X_j + \beta_k \cdot X_k + \beta_{ij} \cdot X_i X_j + \beta_{ik} \cdot X_i X_k + \beta_{jk} \cdot X_j X_k \quad i, j, k = 1, 2 \text{ y } 3$$

Evaluando la significación estadística de los coeficientes β_i , β_j , β_k , β_{ij} , β_{ik} , β_{jk} , de las regresiones (es aceptable hasta $\alpha < 0,1$), el coeficiente de regresión / determinación (R^2), el R^2 ajustado por grados de libertad y la falta de ajuste del modelo (*lack of fit*), y otros parámetros estadísticos, se seleccionarán los modelos que mejor ajusten los valores experimentales.

El análisis cuali-cuantitativo de los coeficientes lineales (β_1 , β_2 y β_3) permitió determinar la influencia de cada factor en estudio sobre cada respuesta, y el análisis de la interacción (β_{123}) determinar si ésta es antagónica o sinérgica.

2.2.3.2 Optimización de respuesta múltiples

Una vez desarrollados los modelos matemáticos para cada respuesta (y_{ki}), se determinaron las condiciones de proceso más adecuadas para lo cual se utilizó la metodología de optimización de repuestas múltiples (Derringer y Suich, 1980), que permite la optimización simultánea de las respuestas estudiadas y determina los valores de los factores experimentales que satisfacen las características deseadas para más de una respuesta, simultáneamente.

En este trabajo se adoptaron como valores deseables los obtenidos como respuestas en los análisis del producto similar de primera marca del mercado argentino (CasanCrem Clásico).

Esto se hace por la construcción de la función de deseabilidad, basada en los valores de las variables respuesta, (y_{ki}), la cual se maximiza, minimiza o se pone un valor objetivo de acuerdo con la respuesta.

Para usar este procedimiento, primero se deben construir los modelos para cada respuesta en función de las variables independientes en forma individual (polinomio de segundo orden). Luego se define una función de deseabilidad para cada respuesta. La

función de deseabilidad $d(y)$ varía entre 0, para una respuesta completamente indeseable y 1 para una respuesta completamente deseable. Esta función toma diferentes formas, dependiendo si la respuesta debe ser maximizada, minimizada o debe alcanzar un valor objetivo (Statgraphics, 2006).

Para combinar las deseabilidades de m respuestas, se crea una sola función compuesta D de deseabilidad. Si todas las variables respuestas son consideradas igualmente importantes entonces la función compuesta es la media geométrica de las deseabilidades individuales, calculada por:

$$D = (d_1 \cdot d_2 \cdot \dots \cdot d_m)^{1/m}$$

Si alguna de las respuestas es considerada más importante que otra, se puede definir un coeficiente de impacto I_j para cada respuesta, donde: $1 \leq I_j \leq 5$

El valor más alto de I_j , corresponde a la respuesta más importante. La función deseabilidad global D entonces será definida como el producto de las deseabilidades individuales elevada al coeficiente de impacto como se presenta en la siguiente ecuación:

$$D = (d_1^{I_1} \cdot d_2^{I_2} \cdot \dots \cdot d_m^{I_m})^{1/\sum I_j}$$

Un valor D diferente de cero implica que todas las respuestas están simultáneamente en un rango deseable; para un valor de D cercano a 1, la combinación de los diferentes criterios es globalmente óptima.

2.2.4 Análisis estadístico

Se usó el programa estadístico Statgraphics Centurion XV para el análisis de los datos a través del análisis de varianza (ANOVA) y para comprobar la idoneidad de los modelos propuestos. Se consideraron diferencias significativas aquellas con $p < 0,05$. Asimismo, permitió ajustar los datos experimentales a las ecuaciones polinomiales de 2° orden y Graficar las superficies predichas a partir de los modelos y realizar operaciones de optimización en los rangos experimentales ensayados.

2.2.5 Validación de los modelos obtenidos

La validación de los modelos obtenidos para cada respuesta se realizó para valores de las variables independientes coincidentes con los valores óptimos obtenidos.

Una vez obtenidas las condiciones que optimizaron las respuestas según el objetivo planteado, se realizaron elaboraciones, en dichas condiciones.

Además de ello, a la formulación optimizada y validada, se la fortificó con diferentes fuentes de hierro (hierro amino quelado y pirofosfato férrico), ambos provistos por la empresa Nutralia S.R.L., los cuales son formulados con otros componentes como Zn, ácido ascórbico entre otros. Los códigos de los premix son 11-COLOO1 y 1-CNPIOIVP, respectivamente. Las dosis de fortificación se calcularon en base a la ingesta diaria admisible.

Las respuestas evaluadas son las mismas utilizadas para la optimización, es decir, aquellas que corresponden a cada escenario planteado y cuyos modelos fueron significativos.

Los resultados experimentales y los valores predichos por los modelos se compararon estadísticamente para determinar diferencias significativas a través de un t-test.

2.3 DETERMINACIONES ANALÍTICAS

2.3.1 pH.

La determinación de pH se realizó por duplicado según el método de análisis FIL 115A:1989 (1989), utilizando un pHmetro HANNA-HI8424 (EE.UU) (Figura 30).

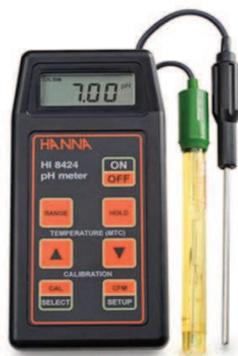


Figura 30. pHmetro HANNA-HI8424.

2.3.2 Acidez titulable.

La determinación de acidez se realizó por duplicado según el método 920.124 de la AOAC (2000), utilizando solución Dornic (NaOH 1/9N) (Figura 31). La cantidad de muestra pesada fue de 10 g.

El cálculo de la acidez titulable se efectuó a partir de la aplicación de la siguiente fórmula:

$$^{\circ}D = \frac{Vol_{NaOH} \times factor}{g_{muestra}} \times 100$$

Donde es importante tener en cuenta que:

- 0,1 mL de NaOH 1/9N gastado = 1 °D.
- 1 °D = 0,01 % de ácido láctico.



Figura 31. Determinación de acidez por titulación.

2.3.3 Sólidos totales.

La determinación de sólidos totales se realizó por duplicado según el método de análisis FIL 4A:1982 (1982) que consiste en un análisis gravimétrico.

El cálculo de los sólidos totales se efectuó a partir de la aplicación de la siguiente fórmula:

$$\%ST = \frac{m_f - m_c}{m_m} \times 100$$

donde:

- m_f = masa final (cápsula + sólidos).
- m_c = masa cápsula (tara).
- m_m = masa muestra.

2.3.4 Grasa.

La determinación de grasa se realizó por duplicado según el método de análisis FIL 105:1981 (1981), que consiste en el análisis butirométrico de Gerber (Figura 32). Para lo cual se colocan 5 g de muestra en la copa del butirómetro, posteriormente se añaden 10 mL de ácido sulfúrico concentrado (90-91%) y finalmente se añaden 1 mL de alcohol amílico. Se centrifuga en centrífuga gerber por 5 min a 1100 rpm y finalmente se sumergen los butirómetros en baño maría a 65-70 °C. La lectura se realiza de manera directa de la escala del butirómetro.



Figura 32. Método Gerber.

2.3.5 Proteína.

La determinación de proteína se realizó por duplicado según el método 16.036 de la AOAC (1984), que corresponde al método Kjeldhal (Figura 33).

El cálculo de nitrógeno total se efectuó a partir de la aplicación de la siguiente fórmula

$$\%NT = \frac{(V_{ac} \times N_{ac} \times f_{ac} - V_g \times N_{ba} \times f_{ba}) \times F_c \times 100}{M_m \times 1000}$$

donde:

- ac = ácido sulfúrico
- ba = hidróxido de sodio.
- N = normalidad
- V_{ac} = volumen de la solución de ácido sulfúrico.
- V_g = volumen gastado.
- f = factor de la valoración del ácido o la base.
- F_c = factor de conversión de meq a mg de nitrógeno = 14.
- M_m = masa de la muestra.
- $\%NT$ = porcentaje de nitrógeno total.

Para calcular el contenido de proteínas se realizó la siguiente ecuación:

$$\% \text{Proteínas} = \% \text{NT} \times F_p$$

donde:

$$F_p = \text{factor de conversión de nitrógeno a proteína de la leche} = 6,38.$$

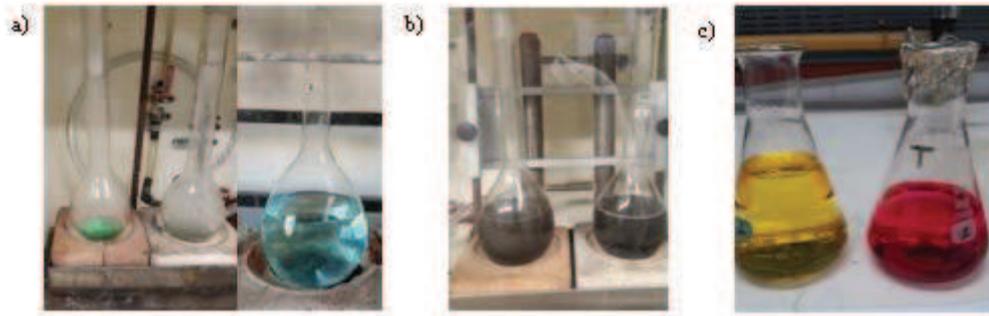


Figura 33. Etapas de digestión a), destilación b) y titulación c), para la determinación de proteínas por el método Kjeldhal.

2.3.6 Cenizas.

La determinación de cenizas se realizó según el método 16.035 de la AOAC (1984) que corresponde a una determinación gravimétrica, utilizando un horno mufla (Dalvo, Argentina) (Figura 34).

Para calcular el contenido de cenizas se aplicó la siguiente ecuación:

$$\% \text{Cenizas} = \frac{m_f - m_c}{m_m} \times 100$$

donde:

- m_f = masa final (crisol + cenizas).
- m_c = masa crisol (tara).
- m_m = masa muestra.



Figura 34. a) Etapa de calcinación; b) Horno Mufla.

2.3.7 Actividad de agua (a_w).

Para determinar la a_w se utilizó el equipo Aqualab CX2 (Estados Unidos) (Figura 35), por triplicado.



Figura 35. Equipo Aqualab CX2.

2.3.8 Sinéresis.

La capacidad de retención de agua del queso untable expresada como sinéresis, fue determinada por centrifugación, utilizando una centrífuga de alta velocidad HealForce modelo Nefuge 18R (China) (Figura 36) a 2000 rpm durante 20 min (Kalab *et al.*, 1976).

Para calcular el porcentaje de sinéresis se aplicó la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Sinéresis} = \frac{m_{\text{suero}}}{m_{\text{muestra}}} \times 100$$

donde:

- m_{suero} = masa de suero separado.
- m_{muestra} = masa de muestra.



Figura 36. Centrífuga de alta velocidad HealForce modelo Nefuge 18R

2.4 ANÁLISIS REOLÓGICOS.

Los ensayos reológicos fueron realizados en un viscosímetro rotacional, modelo Rheolab QC (Anton Paar, Alemania), con geometría de medición de cilindros concéntricos CC27/SS/QC-LTD (Figura 37). Los análisis se realizaron a temperatura

promedio de góndola de productos lácteos ($10 \pm 0,5$ °C), siendo las muestras previamente termostalizadas a la temperatura deseada durante 30 min. Se realizó una rampa ascendente-descendente de gradiente de deformación (de 0 a 200 s^{-1}), la cual permitió obtener los valores experimentales de viscosidad aparente (μ_a), esfuerzo de corte (τ) y gradiente de deformación ($\dot{\gamma}$). Posteriormente se realizaron los diagramas de τ vs $\dot{\gamma}$. Luego, a partir de los modelos reológicos, se determinaron los siguientes parámetros reológicos:

- μ_{50} = viscosidad a gradiente de deformación 50 s^{-1} = viscosidad de Kokini.
- μ_{100} = viscosidad a gradiente de deformación 100 s^{-1} .
- μ_{150} = viscosidad a gradiente de deformación 150 s^{-1} .
- μ_{200} = viscosidad a gradiente de deformación 200 s^{-1} .
- K = índice de consistencia.
- τ_0 = esfuerzo de corte inicial
- n = índice de comportamiento.



Figura 37. Viscosímetro rotacional, Modelo Rheolab QC, Marca Anton Par.

2.5 ANÁLISIS TEXTURALES.

Las propiedades texturales de los quesos untables se evaluaron mediante un ensayo de penetración utilizando un texturómetro TA.XT Plus Stable Microsystem (Godalming, Surrey, Reino Unido), equipado con una sonda cilíndrica de 10 mm de diámetro (P/10) (Figura 38).



Figura 38. Texturómetro TA.XT Plus Stable Microsystems con sonda P/10.

Las determinaciones se realizaron por triplicado. La distancia de penetración fue de 30 mm, a una velocidad de 1 mm/s, registrándose la fuerza de penetración durante el desplazamiento de la punta sensora (Figura 39).

A partir de cada curva de penetración, se calcularon los siguientes parámetros definidos por Liu *et al* (2007), usando el software específico del analizador de textura (Exponent Texture Analyser software v. 6.1.4.0, Stable Micro Systems, R.U.):

- Firmeza (F): corresponde a la fuerza positiva máxima de la curva de fuerza (g) vs tiempo (s). Cuanto más alto es este valor, más firme/dura es la muestra.
- Cohesividad (Coh): corresponde a la fuerza negativa máxima de la curva fuerza (g) vs tiempo (s). Cuanto más negativo es este valor, más cohesiva es la muestra.
- Consistencia (C): corresponde al área positiva de la curva fuerza (g) vs tiempo (s). Cuanto más alto es este valor, más espesa la muestra.
- Adhesividad (Ad): corresponde al área negativa de la curva fuerza (g) vs tiempo (s). Cuanto más negativo es el valor, más resistente a la separación del elemento penetrante es la muestra (más se pega el alimento al paladar y dientes).

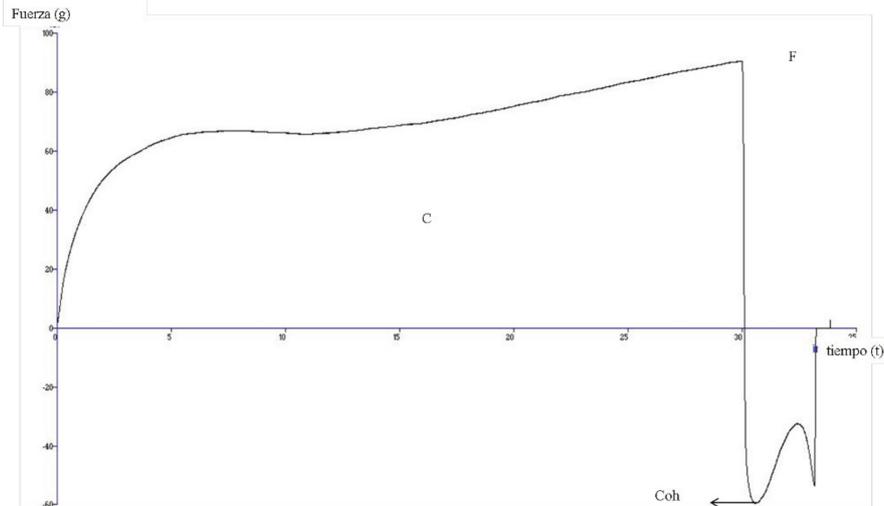


Figura 39. Curva de penetración fuerza (g) vs tiempo (s) y parámetros derivados: firmeza (F), cohesividad (Coh), consistencia (C) y adhesividad (Ad).

2.6 ANÁLISIS COLORIMÉTRICO.

La medición del color se realizó utilizando un espectrofotómetro Minolta CM 508-d (Japón) a 10° de ángulo del observador con iluminante D65 y SCE (Figura 40). La medición se realizó sobre 10 muestras, y se evaluaron los parámetros de acuerdo con sistema CIE L^* , a^* y b^* (Milovanovic et al., 2020). La luminosidad varía de $L^*= 100$ (blanco) a $L^*= 0$ (negro); el parámetro a^* indica el grado de componente rojo o verde ($a^* > 0$ rojo y $a^* < 0$ verde) y b^* determina el grado de componente amarillo o azul ($b^* > 0$ amarillo y $b^* < 0$ azul) (Figura 41).



Figura 40. Espectrofotómetro Minolta

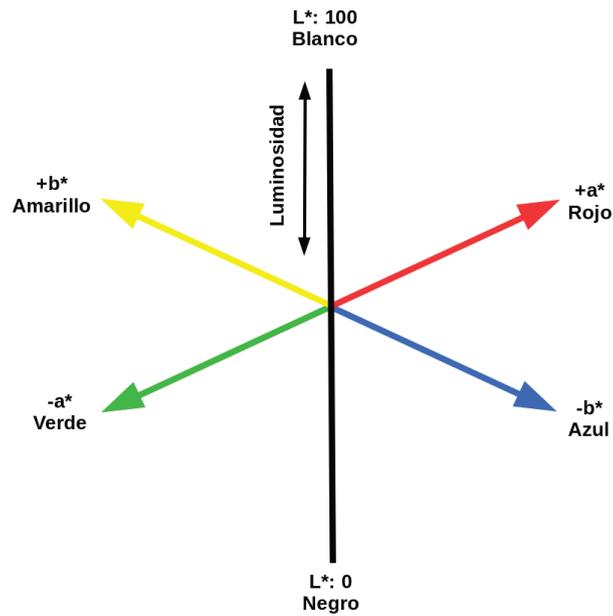


Figura 41. Representación gráfica de los parámetros de color $L^*a^*b^*$

2.7 ANÁLISIS SENSORIAL.

La evaluación sensorial se realizó a través de un análisis descriptivo cuantitativo (QDA) realizado por un panel conformado por 10 evaluadores entrenados. Cada panelista evaluó las muestras identificadas con números aleatorios de tres cifras y completó una planilla de evaluación (Figura 42). El análisis QDA se realizó a muestras con los tratamientos optimizados y que fueron fortificados con diferentes fuentes de hierro. Se estableció una escala lineal no estructurada, con términos ancla ubicados a 1cm de cada extremo de la línea de 10cm. La cuantificación de las respuestas se realizó midiendo la distancia desde el extremo izquierdo hasta la marca señalada por el panelista, estableciendo en la escala una valoración de 100 puntos para su respectivo análisis. Finalmente, se realizó, un *test* de aceptabilidad con consumidores.

| ANÁLISIS SENSORIAL DE QUESO UNTABLE (QDA) | |
|--|---|
| Nombre..... | Fecha..... |
| Color | Blanco Amarillo |
| Brillo | Poco Brilloso Muy Brilloso |
| Sinéresis | Poca Elevada |
| Consistencia | Fluida Firme |
| Aspereza | Suave Muy Áspero |
| Untabilidad | Muy Poco Mucho |
| Uniformidad de la masa | Poca Mucha |
| Adherencia | Baja Alta |
| Cremosidad | Baja Elevada |
| Gusto Salado | Bajo Elevado |
| Gusto Ácido | Bajo Elevado |
| Sabor a Polvo | Bajo Elevado |
| Sabor Lácteo | Bajo Elevado |
| Sabor a Cocido | Bajo Elevado |
| Sabor Oxidado | Bajo Elevado |
| Sabor a Crema | Bajo Elevado |
| Flavor Residual | Bajo Elevado |
| ↓ Descriptores Asociados | <input type="checkbox"/> Cocido <input type="checkbox"/> Crema <input type="checkbox"/> Suero <input type="checkbox"/> Leche en Polvo |
| Puntaje Global | Bajo Alto |
| Otros Comentarios | |

Figura 42. Panilla de evaluación sensorial para análisis sensorial descriptivo de quesos untables a base de lactosuero.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 CARACTERIZACIÓN DE UN QUESO UNTABLE MARCA LÍDER

En primer lugar, se caracterizó el queso CasanCrem Clásico debido a que luego de realizar una encuesta no publicada, tanto con consumidores como con algunos productores, resultó que este producto es uno de los más elegidos dentro del mercado argentino. Este queso según su etiqueta presenta los siguientes ingredientes y composición nutricional (Tabla 8).

Tabla 8 Descripción de los ingredientes y composición nutricional del queso CasanCrem Clásico.

| | |
|-------------------|--|
| | Ingredientes: leche entera pasteurizada, crema, proteínas lácteas concentradas, leche en polvo descremada, almidón modificado, cloruro de sodio, gelatina, cultivos lácticos y sorbato de potasio. |
| CasanCrem Clásico | Por cada 30 g: carbohidratos (1,8 g), proteína (1,8 g), grasas totales (6,2 g), grasas saturadas (4,1 g), grasas trans (0,2 g), grasas monoinsaturadas (1,6 g), grasas poliinsaturadas (0,2 g), colesterol (17 mg), sodio (57 mg). |

3.1.1 Características fisicoquímicas.

En la Tabla 9 se mencionan los parámetros fisicoquímicos del CasanCrem Clásico caracterizado.

Tabla 9 Parámetros fisicoquímicos del queso CasanCrem Clásico.

| Parámetro fisicoquímico | Queso CasanCrem Clásico |
|--------------------------------|--------------------------------|
| pH | 5,05 ± 0,00 |
| Acidez Titulable (°D) | 80 ± 2 |
| Solidos Totales (%) | 31,52 ± 0,00 |
| Grasa (%) | 22,00 ± 0,00 |
| Proteína (%) | 6,3 ± 0,2 |
| Cenizas (%) | 1,19 ± 0,00 |
| Carbohidratos (%) | 2,1 ± 0,2 |
| Actividad de agua (aw) | 0,98 ± 0,00 |
| Sinéresis | No detectada |
| Valor Energético (Kcal) | 231,31 ± 0,03 |

3.1.2 Características reológicas.

En la Tabla 10 se describen los parámetros reológicos del CasanCrem Clásico. En el caso de valores de n , se observaron valores negativos, pero esto fue debido a que la muestra tiende a patinar entre los cilindros concéntricos.

Tabla 10 Parámetros reológicos del queso CasanCrem Clásico.

| Parámetro reológico | Queso CasanCrem Clásico |
|----------------------------|--------------------------------|
| μ_{50} (cP) | 9000 ± 2000 |
| μ_{100} (cP) | 4000 ± 500 |
| μ_{150} (cP) | 2500 ± 200 |
| μ_{200} (cP) | 1800 ± 200 |
| K | 700 ± 300 |
| n | -0,12 ± 0,1 |

Como se observa en la Tabla 10, la viscosidad disminuye con el aumento de la velocidad de corte, por lo que no presenta un comportamiento newtoniano.

3.1.3 Características texturales.

En la Tabla 11 se describen los parámetros texturales del CasanCrem Clásico caracterizado. Estos valores muestran que no es un producto muy firme, pero consistente, y a su vez tiene valores bajos de cohesividad y adhesividad.

Tabla 11 Parámetros texturales del queso CasanCrem Clásico.

| Parámetro de textura | CasanCrem Clásico |
|----------------------|-------------------|
| Dureza/Firmeza (g) | 67,6 ± 0,6 |
| Consistencia (g.s) | 1580 ± 40 |
| Cohesividad (g) | -60 ± 3 |
| Adhesividad (g.s) | -143 ± 3 |

3.1.4 Características colorimétricas.

En la Tabla 12 se describen los parámetros colorimétricos del queso untable comercial caracterizado.

Tabla 12 Parámetros colorimétricos del queso CasanCrem Clásico.

| Parámetro colorimétrico | Queso CasanCrem Clásico |
|-------------------------|-------------------------|
| L* | 92,9 ± 0,2 |
| a* | 1,01 ± 0,03 |
| b* | 16,2 ± 0,1 |

Como se observa, el queso CasanCrem Clásico presentó una alta luminosidad (muestra clara) y un tono ligeramente amarillo, dado que los valores obtenidos de b* fueron positivos.

3.2 MODELADO DE LOS EFECTOS EN LAS PROPIEDADES FÍSICOQUÍMICAS Y MECÁNICAS DE QUESOS OBTENIDOS POR LA VARIACIÓN DEL PORCENTAJE DE ALMIDÓN, GELATINA Y GRASA EN SU FORMULACIÓN

Para el desarrollo de los modelos predictivos se usó la metodología de superficie de respuesta.

Primeramente, se comprobó la idoneidad del modelo elegido para cada una de las respuestas, a partir de los *test* de diagnóstico, los mismos que se basan en el análisis de los residuos. Los resultados de dichas pruebas (no mostrados) indicaron que se cumple adecuadamente con las suposiciones de homogeneidad de la varianza, independencia y normalidad de los errores. Por lo tanto, se pudo aplicar ANOVA para los modelos propuestos de cada una de las respuestas.

3.2.1 Efectos en el pH

Los resultados obtenidos de pH para los días 1, 7, 14 y 21 de almacenamiento se presentan en la Tabla 13. Asimismo, en la Tabla 14 se presentan los valores de suma de cuadrados de los ANOVA correspondientes para el mismo parámetro en los diferentes días de análisis.

Como se observa en la Tabla 13, el valor de pH en cada uno de los tratamientos se mantuvo constante durante el tiempo de almacenamiento (día 21 respecto al día 1), lo cual es un indicativo de una buena estabilidad del producto en el tiempo. Dependiendo del tratamiento, se observó un rango de pH entre 4,7 y 5,3. Dichos valores coinciden con los reportados por Fox et al. (2017a) para diferentes quesos tipo fresco.

Tabla 13 Valores promedio y desvío estándar obtenidos para pH.

| ALMIDON COD | GELATINA COD | GRASA COD | pHd1 | pHd7 | pHd14 | pHd21 |
|----------------|-----------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 0 | 0 | 0 | 4,75 ± 0,00 | 4,73 ± 0,01 | 4,79 ± 0,01 | 4,76 ± 0,00 |
| 0 | 1 | 1 | 5,25 ± 0,01 | 5,26 ± 0,01 | 5,25 ± 0,01 | 5,27 ± 0,02 |
| -1 | -1 | 0 | 4,89 ± 0,00 | 4,99 ± 0,01 | 4,97 ± 0,01 | 4,83 ± 0,01 |
| 0 | -1 | -1 | 5,12 ± 0,01 | 5,12 ± 0,01 | 5,18 ± 0,01 | 5,15 ± 0,01 |
| -1 | 0 | -1 | 5,16 ± 0,01 | 5,16 ± 0,01 | 5,17 ± 0,01 | 5,18 ± 0,01 |
| 1 | 0 | 1 | 5,23 ± 0,02 | 5,28 ± 0,02 | 5,28 ± 0,02 | 5,28 ± 0,03 |
| 0 | -1 | 1 | 5,14 ± 0,01 | 5,15 ± 0,01 | 5,14 ± 0,01 | 5,15 ± 0,01 |
| 1 | 1 | 0 | 4,80 ± 0,01 | 4,76 ± 0,00 | 4,81 ± 0,00 | 4,79 ± 0,00 |
| -1 | 1 | 0 | 4,77 ± 0,00 | 4,84 ± 0,00 | 4,83 ± 0,00 | 4,82 ± 0,00 |
| 0 | 1 | -1 | 5,08 ± 0,01 | 5,11 ± 0,01 | 5,11 ± 0,02 | 5,13 ± 0,01 |
| 1 | 0 | -1 | 5,11 ± 0,00 | 5,11 ± 0,00 | 5,11 ± 0,00 | 5,13 ± 0,01 |
| -1 | 0 | 1 | 5,22 ± 0,02 | 5,28 ± 0,01 | 5,28 ± 0,01 | 5,29 ± 0,00 |
| 0 | 0 | 0 | 5,03 ± 0,00 | 5,04 ± 0,01 | 4,97 ± 0,01 | 5,03 ± 0,01 |
| 1 | -1 | 0 | 4,94 ± 0,00 | 4,92 ± 0,01 | 4,92 ± 0,00 | 4,94 ± 0,00 |
| 0 | 0 | 0 | 5,03 ± 0,00 | 5,04 ± 0,01 | 4,97 ± 0,01 | 5,03 ± 0,01 |

Tabla 14 Análisis de varianza de los modelos obtenidos para pH durante los días de análisis.

| Fuente | G.L | pH1 | pH7 | pH14 | pH 21 |
|--|-----|-----------|------------|-------------|------------|
| A:ALMIDON COD | 1 | 0,00005 | 0,01152 | 0,00545 | 0,00000 |
| B:GELATINA COD | 1 | 0,00481 | 0,00648 | 0,00800 | 0,00000 |
| C:GRASA COD | 1 | 0,0486*** | 0,08402*** | 0,06101*** | 0,06000*** |
| AA | 1 | 0,01291 | 0,00234 | 0,00014 | 0,01218 |
| AB | 1 | 0,00045 | 0,00005 | 0,00031 | 0,01051 |
| AC | 1 | 0,00301 | 0,00163 | 0,00270 | 0,00141 |
| BB | 1 | 0,0516*** | 0,04134*** | 0,01838*** | 0,0703*** |
| BC | 1 | 0,01688 | 0,01080 | 0,031083*** | 0,01541 |
| CC | 1 | 0,6654*** | 0,67522*** | 0,78891*** | 0,82485*** |
| Error puro | 27 | 0,11957 | 0,14789 | 0,05287 | 0,11565 |
| Coefficiente de determinación (R ²) | | 83,1 | 80,5 | 91,5 | 87,1 |

G.L: grados de libertad; *** $p \leq 0,001$, valores sin * no presentan diferencias significativas.

Para el día 1, el modelo logró explicar el 83,11 % de variabilidad de los datos. Para el día 7, el modelo logró explicar el 80,50 % de variabilidad de los datos. En el caso del día 14, el modelo explicó el 91,54 % de variabilidad de los datos. Para el día 21, el modelo logró explicar el 87,06 % de variabilidad de los datos.

Asimismo, como se observa en la Tabla 13, el porcentaje de grasa fue la variable que influyó mucho más que las demás en el pH ($p < 0,05$), lo cual se observó en todos los días de análisis. Dicho efecto se le atribuye a la formulación, la cual al mantener el contenido de sólidos fijo aproximadamente al 30 %, cuando disminuye el contenido de grasa en la formulación, para alcanzar el contenido de sólidos, normalmente se suele incrementar el porcentaje de azúcares y proteína, siendo esta última importante en la variación del pH de la mezcla, es decir, al aumentar el contenido de grasa, el contenido de sólidos lácteos, principalmente leche en polvo, se agregan en menor cantidad, por ende menor cantidad de compuestos que actúan como buffer el momento de acidificar, como caseínas, fosfatos, entre otros (Kumar y Smith, 2023).

En la Figura 43 (a y b), se presentan los gráficos de superficie de respuesta para el efecto de la concentración de almidón y gelatina (manteniendo la variable % grasa en un valor constante e igual al punto medio del rango experimental) sobre el pH de los quesos untables desarrollados con lactosuero, donde se observa el efecto del término cuadrático de gelatina (curvatura), mientras que el almidón presentó un efecto significativo mucho menor (Tabla 14). Asimismo, en la Figura 43 (c y d), se presentan los gráficos de superficie de respuesta para el efecto de la concentración de gelatina y porcentaje de grasa (manteniendo el % almidón constante e igual al punto medio del rango experimental) sobre el pH, observándose en este caso la influencia mucho mayor de la concentración de grasa (Tablas 13 y 14).

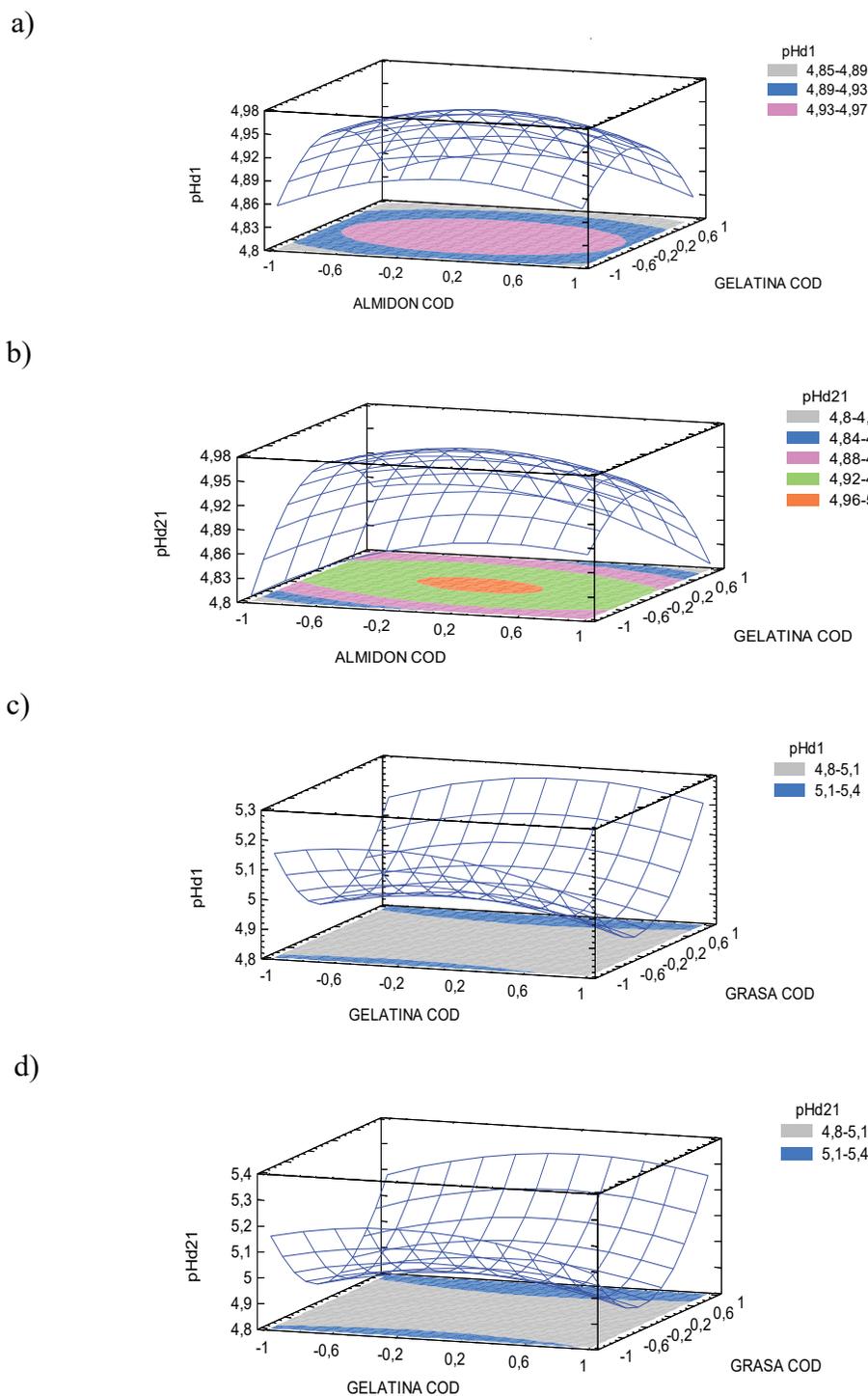


Figura 43. Gráficos de superficie de respuesta estimada para los valores de pH de quesos untables elaborados con lactosuero en función de la concentración de almidón y gelatina para día 1(a) y 21 (b), y en función de la concentración de gelatina y grasa a día 1(c) y 21 (d)

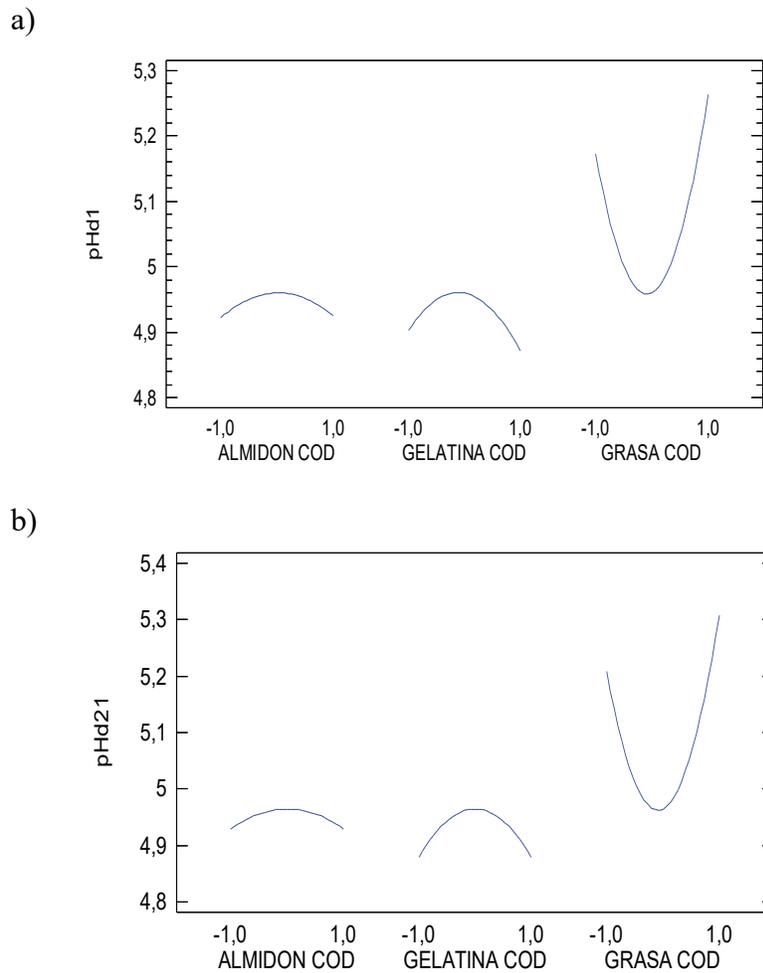


Figura 44. Gráficos de efectos principales para pH al día 1 (a) y día 21 (b), para quesos untables.

Como se observa en los gráficos de efectos principales presentados en la Figura 44, en los días de análisis se observa una tendencia similar, siendo el porcentaje de grasa la variable que más influye en la respuesta pH.

A continuación, se presentan los modelos reducidos obtenidos para los valores de pH para el día 1, 7, 14 y 21, en función de las variables gelatina y grasa codificadas.

- $\text{pHd1} = 4,938 - 0,0155xA + 0,045xC - 0,066xA^2 + 0,2575xC^2$
- $\text{pHd7} = 4,94938 - 0,018xB + 0,0591667xC - 0,0625xB^2 + 0,265208xC^2$
- $\text{pHd14} = 4,9235 + 0,0504167xC - 0,0445xB^2 + 0,0508333xBxC + 0,286667xC^2$
- $\text{pHd21} = 4,94362 + 0,0001xB + 0,05xC - 0,0785xB^2 + 0,293125xC^2$

Como se observa en cada uno de los modelos obtenidos para pH a diferentes días de análisis, en la primera semana de almacenamiento (pHd1 y pHd7) la gelatina presenta un efecto negativo, es decir que, a medida que se incrementa el porcentaje de gelatina, el pH tiende a disminuir. Por el contrario, el pH se incrementa a medida que aumenta el porcentaje de grasa. Si bien el término lineal de gelatina no presentó un efecto estadísticamente significativo sobre el pH, en algunos casos se observó que los términos cuadráticos si presentaron significancia ($p < 0,05$). Aún así, se optó incluir los términos lineales, aunque no sean estadísticamente significativos. En el caso del día 14, solamente el término lineal del porcentaje de grasa fue significativo, mientras que al día 21 el porcentaje de gelatina y grasa tuvieron un efecto positivo sobre el pH.

En el caso del presente estudio, a pesar de existir diferencias estadísticas significativas, no hubo efectos importantes en la disminución del pH debido a que no se usó fermentos, sino que la regulación del pH fue con ácido láctico, lo que permitió mantener el pH estable en el tiempo como se observa en la Tabla 13. Perveen et al. (2020), estudiaron los efectos del pH en el tiempo de almacenamiento en distintos quesos tipo crema con fermento y, si bien encontraron ligeros cambios en el pH, estos no fueron importantes. La concentración de grasa influye 2,9, 4,5, 4,2 y 5,5 veces más que la gelatina para pH1, pH7, pH14 y pH21, respectivamente, siendo la concentración de grasa la que más influye significativamente.

3.2.2 Efectos en la acidez

Los resultados experimentales obtenidos de acidez para los días 1, 7, 14 y 21 de almacenamiento se presentan en la Tabla 15. Asimismo, en la Tabla 16 se presentan los valores de suma de cuadrados correspondientes al ANOVA en los diferentes días de análisis.

Tabla 15 Valores promedio y desvío estándar obtenidos para la acidez.

| ALMIDON COD | GELATINA COD | GRASA COD | Acidez d1 | | Acidez d7 | | Acidez d14 | | Acidez d21 | |
|----------------|-----------------|--------------|-----------|--------|-----------|--------|------------|--------|------------|--------|
| 0,0 | 0,0 | 0,0 | 81,2 | ± 0,2 | 81,0 | ± 0,6 | 80,1 | ± 0,1 | 81,3 | ± 0,5 |
| 0,0 | 1,0 | 1,0 | 36,83 | ± 0,02 | 35,5 | ± 0,3 | 36 | ± 1 | 35,4 | ± 0,7 |
| -1,0 | -1,0 | 0,0 | 79,8 | ± 0,8 | 70,0 | ± 0,6 | 74 | ± 1 | 77,28 | ± 0,01 |
| 0,0 | -1,0 | -1,0 | 88,6 | ± 0,9 | 89,2 | ± 0,3 | 90 | ± 1 | 89 | ± 1 |
| -1,0 | 0,0 | -1,0 | 90 | ± 2 | 87 | ± 1 | 89,5 | ± 0,3 | 88,7 | ± 0,6 |
| 1,0 | 0,0 | 1,0 | 35,4 | ± 0,7 | 36,5 | ± 0,7 | 35,5 | ± 0,3 | 36 | ± 1 |
| 0,0 | -1,0 | 1,0 | 34,89 | ± 0,08 | 36,93 | ± 0,02 | 36,1 | ± 0,4 | 37,4 | ± 0,7 |
| 1,0 | 1,0 | 0,0 | 83,5 | ± 0,5 | 82,1 | ± 0,9 | 79,5 | ± 0,1 | 83,3 | ± 0,6 |
| -1,0 | 1,0 | 0,0 | 69,8 | ± 0,3 | 70,41 | ± 0,05 | 70,9 | ± 0,7 | 70,50 | ± 0,04 |
| 0,0 | 1,0 | -1,0 | 90,5 | ± 0,9 | 85,6 | ± 0,4 | 74 | ± 1 | 77,67 | ± 0,01 |
| 1,0 | 0,0 | -1,0 | 86,9 | ± 0,7 | 91,0 | ± 0,3 | 89,8 | ± 0,4 | 87,6 | ± 0,9 |
| -1,0 | 0,0 | 1,0 | 34 | ± 2 | 37,7 | ± 0,5 | 38,00 | ± 0,00 | 36,4 | ± 0,8 |
| 0,0 | 0,0 | 0,0 | 69 | ± 2 | 66,8 | ± 0,1 | 68,3 | ± 0,6 | 66,1 | ± 0,8 |
| 1,0 | -1,0 | 0,0 | 80,5 | ± 0,3 | 85,4 | ± 0,6 | 74,9 | ± 0,3 | 80,5 | ± 0,6 |
| 0,0 | 0,0 | 0,0 | 69 | ± 2 | 66,8 | ± 0,1 | 68,3 | ± 0,6 | 66,1 | ± 0,8 |

Tabla 16 Análisis de varianza de los modelos obtenidos para acidez.

| Fuente | G.L | Acidez d1 | Acidez d7 | Acidez d14 | Acidez d21 |
|--|-----|-------------|------------|------------|------------|
| A:ALMIDON COD | 1 | 39,1278 | 216,896*** | 14,251 | 52,5607 |
| B:GELATINA COD | 1 | 2,39158 | 15,979 | 54,9615* | 77,4391 |
| C:GRASA COD | 1 | 11472,7*** | 10683,5*** | 9826,87*** | 9810,62*** |
| AA | 1 | 36,2519 | 83,9201 | 80,3976* | 147,758* |
| AB | 1 | 85,3811* | 6,99904 | 27,5501 | 46,3916 |
| AC | 1 | 7,25557 | 13,2414 | 3,99102 | 0,171962 |
| BB | 1 | 81,3263* | 32,2075 | 4,05778 | 37,1126 |
| BC | 1 | 0,000871531 | 2,2959 | 126,325 | 46,5101 |
| CC | 1 | 1342,99*** | 1034,55*** | 1124,78*** | 1341,71*** |
| Error puro | 27 | 222,596 | 374,934 | 195,709 | 315,489 |
| Coefficiente de determinación (R ²) | | 97,6 | 95,8 | 96,9 | 96,3 |

G.L: grados de libertad; *p ≤ 0,05; **p ≤ 0,01; *** p ≤ 0,001, valores sin * no presentan diferencias significativas.

Algunos estudios en quesos procesados y untables muestran que el porcentaje de grasa contribuye a una menor actividad de los iones de hidrógeno libres, lo que ayuda a suavizar la acidez percibida y a mantener una textura más cremosa y homogénea durante el almacenamiento, especialmente en refrigeración (Meleti et al., 2024; Dimitreli & Thomareis, 2007). Dicha estabilidad es deseable en quesos de alta humedad, donde el contenido graso ayuda a reducir la sinéresis y mejora la percepción del sabor y la cremosidad del queso. Como se observa en la Tabla 15, la acidez en los diferentes días de análisis mayormente permanece constante en todas las experiencias. Esto es debido a que, al no usar fermentos, el producto obtenido tiene una mayor estabilidad, por no haber producción microbiana de ácido láctico (Perveen et al., 2011).

Para el día 1, el modelo logró explicar el 97,64 % de variabilidad de los datos. Para el día 7, el modelo explicó el 95,8 % de variabilidad de los datos. En el caso del día 14, el modelo logró explicar el 96,9 % de variabilidad de los datos y para el día 21 el modelo explicó el 96,4 % de variabilidad de los datos.

Como se observa en la Figura 45 y en concordancia con las variables significativas de acuerdo con el ANOVA (Tabla 16), se observa que el porcentaje de grasa tiene una elevada influencia sobre la acidez de los quesos untables.

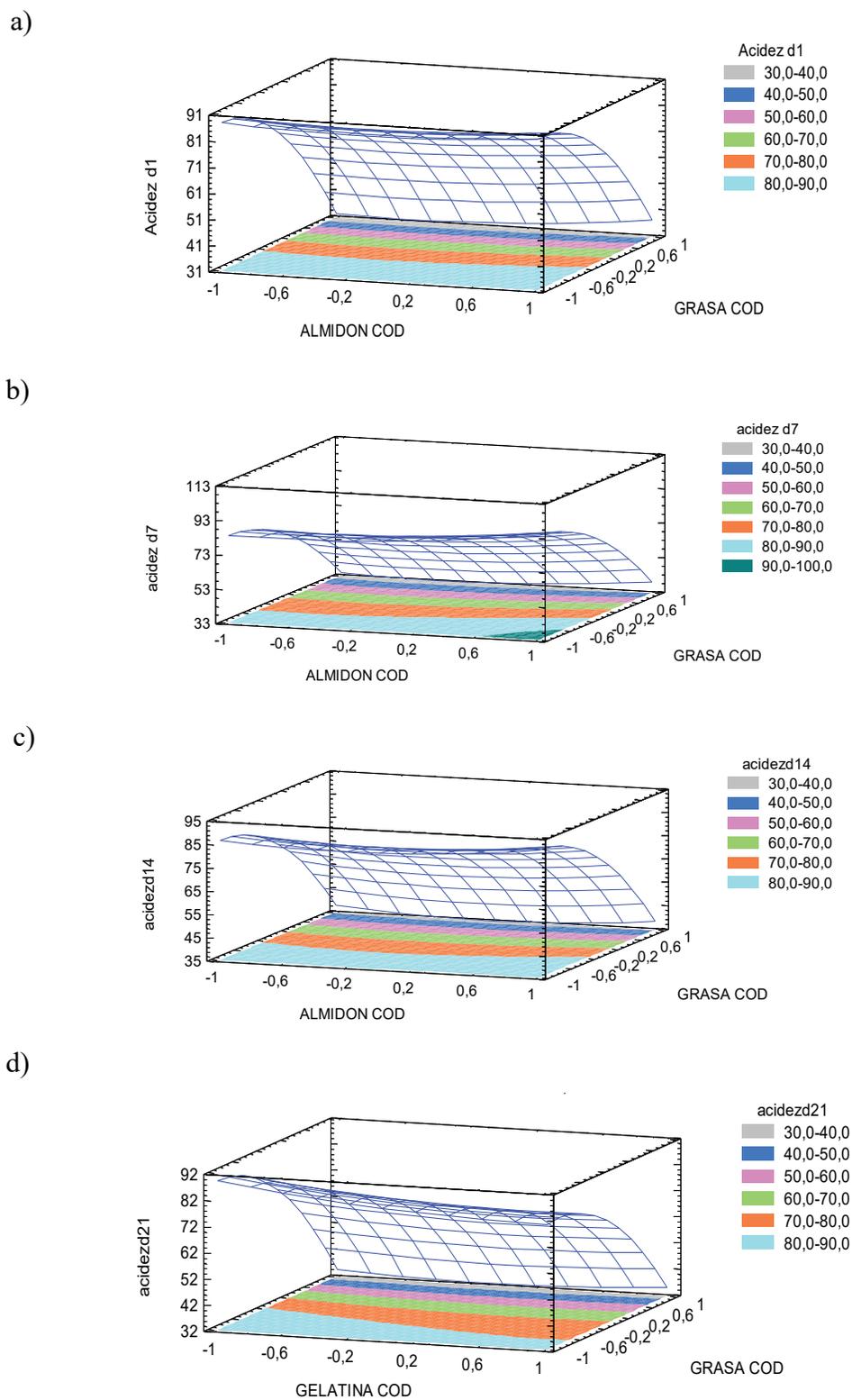
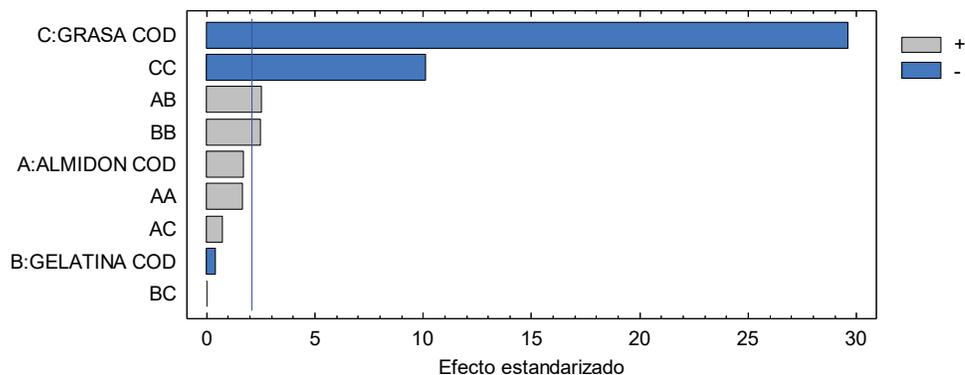


Figura 45. Gráfico de superficie de respuesta estimada para los valores de acidez Dornic de los quesos untables con lactosuero para día 1(a), 7(b), 14(c) y 21 (d)

Se evidencia que, a medida que el porcentaje de grasa se incrementa, la acidez Dornic disminuye. Esto es debido a que las formulaciones para la presente investigación tienen el objetivo de alcanzar un contenido de sólidos de aproximadamente 30 %, por lo cual, a medida que aumenta el porcentaje de grasa en la formulación para alcanzar el contenido de sólidos deseado, los demás componentes disminuyen.

Por ende, el contenido de proteína en quesos untables influye en la acidez de estos productos. Las proteínas, como la caseína, pueden actuar como amortiguadores, ayudando a estabilizar el pH y minimizando los efectos en la acidez percibida. En productos fermentados con alto contenido proteico, se observa una mayor capacidad de buffering que mantiene la acidez en niveles controlados y contribuye a una textura uniforme y agradable, debido a que las proteínas fijan parte de los iones de hidrógeno liberados durante la fermentación, lo que suaviza la acidez sin alterar drásticamente el pH (Fox et al., 2017).

a)



b)

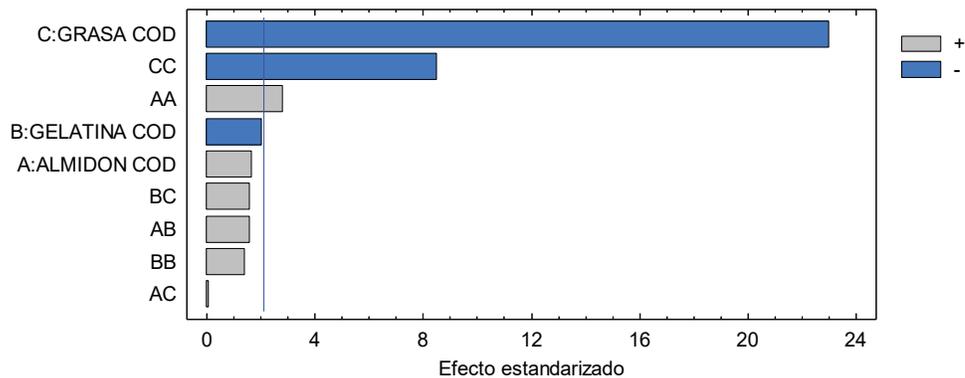


Figura 46. Diagramas de Pareto estandarizado para la acidez al día 1 (a) y día 21 (b).

Como se mencionó anteriormente, el porcentaje de grasa fue el factor que más influyó en la acidez de los quesos untables observándose un efecto negativo, es decir, mientras mayor es el porcentaje de grasa, menor es la acidez del producto (Figura 46), tal como se observa en los diagramas de Pareto y en los gráficos de superficie de respuesta.

A continuación, se presentan los modelos reducidos obtenidos para los valores de la acidez para los días 1, 7, 14 y 21. Como se observa, los modelos son bastante parecidos a diferente día de análisis, lo cual es un indicador de la estabilidad del producto con lo que respecta a acidez.

$$\text{acidez d1} = 76,0493 - 26,7777xC - 13,881xC^2$$

$$\text{acidez d7} = 74,6456 - 25,8402xC - 12,2261xC^2$$

$$\text{acidezd14} = 73,7003 - 24,7826xC - 12,5243xC^2$$

$$\text{acidezd21} = 72,5579 + 1,81247xA - 24,7621xC + 4,3007xA^2 - 13,6517xC^2$$

En los modelos de acidez, se observa que la grasa tiene mucha mayor influencia que el almidón cuando ambas variables están presentes. En los días 1, 7 y 14, solo la grasa afecta la acidez, por lo que su impacto es absoluto. En el d21, la comparación entre las variables muestra que la concentración de grasa tiene un impacto mucho mayor en términos lineales, la grasa influye 13,7 veces más que el almidón.

Cuando se aumenta la concentración de almidón en quesos untables, se diluye la fase acuosa láctea, la cual contiene ácidos libres. Esto puede provocar una ligera elevación del pH, ya que se reduce la concentración efectiva de protones (H^+) por efecto de dilución. En el caso de Martínez et al. (2023), observaron que formulaciones con 4% de almidón presentaban pH ligeramente mayor que aquellas con 1%, bajo condiciones controladas en mezclas proteína-almidón.

3.2.3 Efecto en los parámetros de color.

3.2.3.1 Efecto en el parámetro L^* .

Los resultados experimentales obtenidos de el parámetro de color Luminosidad (L^*) para los días 1, 7, 14 y 21 se presentan en la Tabla 17. Asimismo, en la Tabla 18 se presentan los valores de suma de cuadrado ANOVA correspondientes para el mismo parámetro en los diferentes días de análisis.

Tabla 17 Valores promedio obtenidos para Luminosidad L*.

| ALMIDON COD | GELATINA COD | GRASA COD | Ld1 | Ld7 | Ld14 | Ld21 |
|----------------|-----------------|--------------|------------|------------|------------|------------|
| 0 | 0 | 0 | 90,5 ± 0,6 | 90,1 ± 0,1 | 89,8 ± 0,8 | 89 ± 1 |
| 0 | 1 | 1 | 89,5 ± 0,4 | 89,8 ± 0,4 | 88,9 ± 0,8 | 89 ± 2 |
| -1 | -1 | 0 | 89,9 ± 0,3 | 90,1 ± 0,3 | 87 ± 2 | 89,5 ± 0,3 |
| 0 | -1 | -1 | 88,6 ± 0,2 | 87,9 ± 0,2 | 88,3 ± 0,3 | 86,8 ± 0,9 |
| -1 | 0 | -1 | 89 ± 1 | 89 ± 1 | 88,6 ± 0,6 | 87,6 ± 0,8 |
| 1 | 0 | 1 | 89,8 ± 0,1 | 89,9 ± 0,1 | 89,5 ± 0,1 | 88,3 ± 0,2 |
| 0 | -1 | 1 | 89,8 ± 0,3 | 89,8 ± 0,2 | 89,4 ± 0,2 | 89,2 ± 0,1 |
| 1 | 1 | 0 | 89,3 ± 0,1 | 91,8 ± 0,2 | 87,3 ± 0,1 | 86,2 ± 0,9 |
| -1 | 1 | 0 | 89,6 ± 0,4 | 89,2 ± 0,4 | 90 ± 1 | 89,5 ± 0,7 |
| 0 | 1 | -1 | 88,3 ± 0,1 | 87,7 ± 0,2 | 88,0 ± 0,6 | 86 ± 1 |
| 1 | 0 | -1 | 88,3 ± 0,3 | 88,7 ± 0,1 | 88,8 ± 0,2 | 87,7 ± 0,4 |
| -1 | 0 | 1 | 90,1 ± 0,2 | 90,4 ± 0,3 | 89,9 ± 0,3 | 89,5 ± 0,1 |
| 0 | 0 | 0 | 88,6 ± 0,1 | 89,2 ± 0,2 | 88,2 ± 0,1 | 88,4 ± 0,1 |
| 1 | -1 | 0 | 90,7 ± 0,2 | 90 ± 2 | 89,9 ± 0,6 | 89,8 ± 0,2 |
| 0 | 0 | 0 | 88,6 ± 0,1 | 89,2 ± 0,2 | 88,2 ± 0,1 | 88,4 ± 0,1 |

Tabla 18 Análisis de varianza de los modelos obtenidos para L*.

| Fuente | G.L | L*d1 | L*d7 | L*d14 | L*d21 |
|---|------------|-------------|-------------|--------------|--------------|
| A:ALMIDON COD | 1 | 1,38*** | 3,52*** | 1,61 | 21,10*** |
| B:GELATINA COD | 1 | 5,03*** | 0,36 | 0,02 | 25,99*** |
| C:GRASA COD | 1 | 28,29*** | 55,43*** | 21,26*** | 69,55*** |
| AA | 1 | 3,16*** | 21,30*** | 3,92*** | 2,66 |
| AB | 1 | 2,18*** | 18,41*** | 70,78*** | 32,91*** |
| AC | 1 | 0,06 | 0,05 | 1,15 | 3,73 |
| BB | 1 | 7,79*** | 0,18 | 1,16 | 2,23 |
| BC | 1 | 0,10 | 0,05 | 0,12 | 0,01 |
| CC | 1 | 4,21*** | 18,46*** | 2,01*** | 19,05*** |
| Falta de ajuste | 133 | 2,93*** | 17,60*** | 58,58 | 21,62*** |
| Error puro | 142 | 16,58 | 49,47 | 162,35 | 143,27 |
| Coefficiente de determinación (R ²) | | 75,4 | 64,3 | 63,9 | 51,9 |

G.L: grados de libertad; *p ≤ 0,05; **p ≤ 0,01; *** p ≤ 0,001, valores *sín* * no presentan diferencias significativas.

Para la la Luminosidad en el día 1, el modelo logró explicar el 75,48 % de variabilidad de los datos. Para el día 7, el modelo logró explicar el 64,34 % de variabilidad de los datos. En el caso del día 14, el modelo explicó el 63,91 % de variabilidad de los datos. para el día 21, el modelo logró explicar el 51,9 % de variabilidad de los datos.

Como se observa en la Tabla 17, durante luego de los 21 días de almacenamiento refrigerado, se obtuvo una disminución en la luminosidad en todos los tratamientos de hasta un 2 %, lo que significa que las muestras fueron menos claras. Aun así, este parámetro tiene una variación porcentual pequeña en todos los casos.

A continuación, se presentan los modelos reducidos obtenidos para los valores de la luminosidad para el día 1, 7, 14 y 21.

$$L^*d1 = 88,9408 + 0,169525xA - 0,282474xB + 0,692759xC + 0,344058xA^2 - 0,269988xAxB + 0,51281xB^2 - 0,383015xC^2$$

$$L^*d7 = 89,5029 + 0,209875xA + 0,06675xB + 0,832375xC + 0,754135xA^2 + 0,6785xAxB - 0,712365xC^2$$

$$L^*d14 = 88,5065 - 0,156355xA - 0,00725258xB + 0,5155xC + 0,359974xA^2 - 1,48721xAxB + 0,246479xC^2$$

$$L^*d21 = 88,7513 - 0,513625xA - 0,57xB + 0,932375xC - 0,907xAxB - 0,719911xC^2$$

En el caso de L*d1, el almidón y la gelatina tienen coeficientes de 0,1695 y -0,2825, respectivamente, la grasa influye 4.1 veces más que el almidón. Para L*d7: La grasa tiene un coeficiente de 0,8324, mayor que el almidón (0,2099) y la gelatina (0,0668), por lo que la grasa es casi 4 veces más influyente que el almidón. Para L*d14, la grasa tiene un coeficiente de 0,5155, mientras que el almidón y la gelatina tienen -0,1564 y -0,0073, respectivamente, por lo tanto, la grasa es más de 3,3 veces más influyente que el almidón. Finalmente, para L*d21, la grasa presenta un coeficiente de 0,9324, mientras que el almidón y la gelatina tienen -0,5136 y -0,57, respectivamente, es decir, la grasa tiene una influencia 1.8 veces mayor que el almidón.

Asimismo, como se observa tanto en los modelos obtenidos como en los resultados del ANOVA realizado (Tabla 18), el término que presentó un mayor efecto en todos los días de

análisis de la luminosidad, fue el porcentaje de grasa. Sin embargo, casi todos los términos del modelo fueron significativos, a excepción de AC y BC, es decir la interacción entre almidón y grasa y gelatina y grasa, respectivamente.

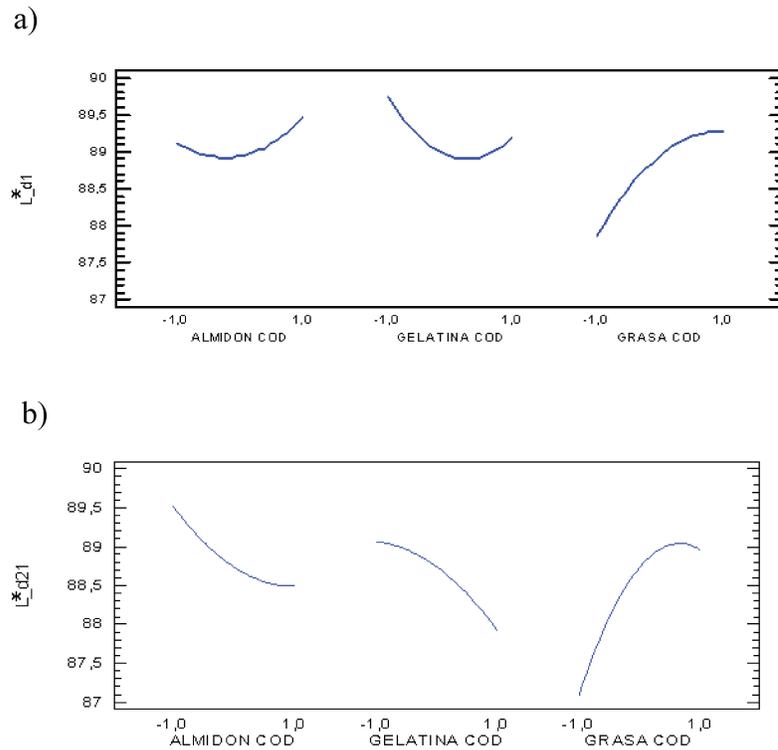
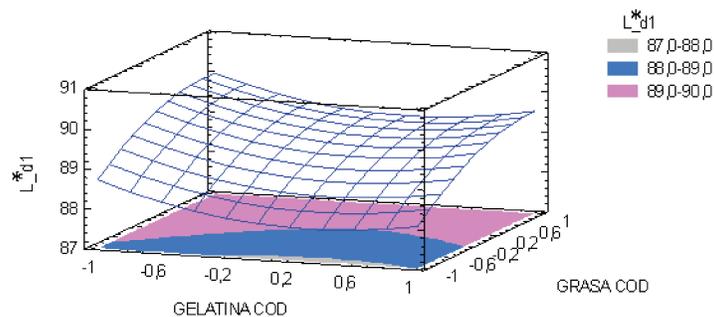


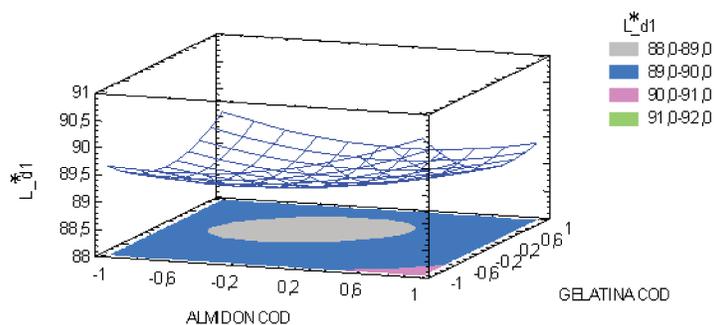
Figura 47. Gráficos de efectos principales para la Luminosidad L^* al día 1 (a) y día 21 (b), de quesos untables elaborados con lactosuero.

Tal como se observa en los gráficos de efectos principales, el contenido de grasa es importante para incrementar la luminosidad, lo cual es coincidente con los modelos obtenidos. Por ende, a medida que incrementa el contenido de grasa, los quesos untables son más claros. Esto se puede explicar debido a que una formulación con mayor porcentaje de grasa, requiere de mayor contenido de crema en su formulación. A nivel industrial, las cremas que se usan como materia prima suelen ser homogeneizadas, lo cual le da un color más blanco al producto terminado (debido al aumento de birrefringencia por disminución del tamaño del glóbulo graso). Por ende, el color de un producto a partir de cremas homogeneizadas tendería a ser más claro a medida que incremente su proporción en la mezcla.

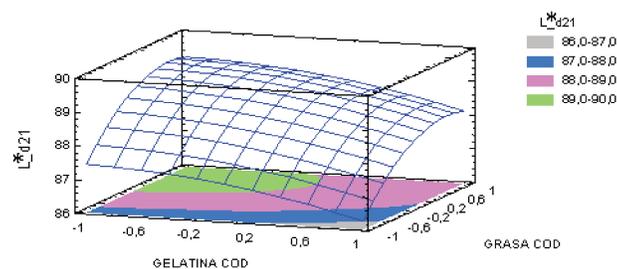
a)



b)



c)



d)

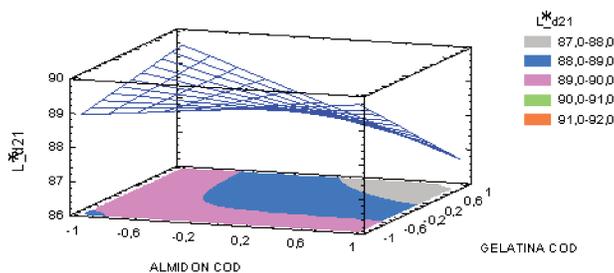


Figura 48. Gráficos de superficie de respuesta estimada para los valores de Luminosidad en función del contenido de grasa y gelatina en el día 1 a) y 21 c) y en función del contenido de gelatina y almidón en el día 1 b) y 21 d).

En la Figura 48, se muestran los gráficos de superficie de respuesta para la luminosidad en función del contenido de grasa y gelatina (a), y en función del contenido de almidón y gelatina al día 1 (b). Observándose que al día 1, a medida que el porcentaje de grasa aumenta las muestras son más claras, mientras que, cuando el porcentaje de gelatina incrementa, la luminosidad de los quesos untados son más bajas. Mientras que en el mismo día 1, si bien existe influencia de ambas variables (almidón y gelatina), los resultados no varían en gran medida. Asimismo, en la Figura 48 c y d, se presentan los gráficos de luminosidad en función del contenido de grasa y almidón, y almidón y gelatina para el día 21. En el primer caso se observa la misma tendencia que al día 1, mientras que, en el segundo caso, a los 21 días, las muestras con mayor contenido de almidón presentan una luminosidad más elevada que al día 1, y una luminosidad mucho más baja cuando el contenido de gelatina es más elevado. Estos efectos pueden deberse a que el almidón como materia prima es de color muy blanco, mientras que la gelatina es de color amarillo. No obstante, en todos los casos se obtuvo un color más claro respecto a los quesos procesados y análogos reportados por otros autores en distintos tipos de quesos untados (Cunha et al., 2010; Rubel et al., 2019).

3.2.3.2 Efecto en el parámetro de color a^*

Los resultados experimentales obtenidos de el parámetro de color a^* para los días 1, 7, 14 y 21 se presentan en la Tabla 19. Asimismo, en la Tabla 20 se presentan los valores de suma de cuadrados del ANOVA correspondientes para el mismo parámetro en los diferentes días de análisis.

Tabla 19 Valores promedio obtenidos para a*

| ALMIDON COD | GELATINA COD | GRASA COD | a*d1 | | a*d7 | | Ld14 | | Ld21 | |
|----------------|-----------------|--------------|-------|--------|-------|--------|------|--------|------|--------|
| 0 | 0 | 0 | 0,09 | ± 0,02 | 0,14 | ± 0,04 | 0,24 | ± 0,03 | 0,2 | ± 0,1 |
| 0 | 1 | 1 | 0,6 | ± 0,1 | 0,8 | ± 0,1 | 0,82 | ± 0,04 | 0,8 | ± 0,2 |
| -1 | -1 | 0 | -0,3 | ± 0,1 | -0,1 | ± 0,1 | -0,1 | ± 0,1 | -0,1 | ± 0,2 |
| 0 | -1 | -1 | 0,12 | ± 0,04 | 0,05 | ± 0,04 | 0,10 | ± 0,03 | 0,1 | ± 0,1 |
| -1 | 0 | -1 | -0,21 | ± 0,03 | -0,1 | ± 0,1 | -0,1 | ± 0,1 | -0,1 | ± 0,1 |
| 1 | 0 | 1 | 0,80 | ± 0,02 | 0,9 | ± 0,1 | 0,98 | ± 0,01 | 0,9 | ± 0,1 |
| 0 | -1 | 1 | 0,5 | ± 0,1 | 0,72 | ± 0,03 | 0,7 | ± 0,1 | 0,73 | ± 0,02 |
| 1 | 1 | 0 | 0,20 | ± 0,02 | 0,05 | ± 0,04 | 0,47 | ± 0,02 | 0,5 | ± 0,3 |
| -1 | 1 | 0 | -0,4 | ± 0,1 | -0,23 | ± 0,01 | -0,1 | ± 0,1 | -0,1 | ± 0,1 |
| 0 | 1 | -1 | -0,0 | ± 0,1 | 0,00 | ± 0,02 | 0,22 | ± 0,04 | 0,2 | ± 0,1 |
| 1 | 0 | -1 | -0,14 | ± 0,04 | -0,0 | ± 0,1 | 0,05 | ± 0,04 | 0,1 | ± 0,1 |
| -1 | 0 | 1 | 0,76 | ± 0,03 | 0,86 | ± 0,04 | 0,9 | ± 0,1 | 0,9 | ± 0,1 |
| 0 | 0 | 0 | 0,2 | ± 0,1 | 0,47 | ± 0,04 | 0,54 | ± 0,03 | 0,54 | ± 0,04 |
| 1 | -1 | 0 | -0,2 | ± 0,1 | 0,0 | ± 0,2 | -0,0 | ± 0,1 | -0,0 | ± 0,1 |
| 0 | 0 | 0 | 0,2 | ± 0,1 | 0,47 | ± 0,04 | 0,54 | ± 0,03 | 0,54 | ± 0,04 |

Tabla 20 Análisis de varianza de los modelos obtenidos para a*.

| Fuente | G.L | a*d1 | a*d7 | a*d14 | a*d21 |
|---|------------|-------------|-------------|--------------|--------------|
| A:ALMIDON COD | 1 | 0,73*** | 0,29*** | 0,70*** | 2,03*** |
| B:GELATINA COD | 1 | 0,043*** | 0,017*** | 0,59*** | 0,56*** |
| C:GRASA COD | 1 | 10,48*** | 13,46*** | 12,11*** | 9,68*** |
| AA | 1 | 0,91*** | 1,42*** | 1,165*** | 1,21*** |
| AB | 1 | 0,53*** | 0,10*** | 0,65*** | 0,04 |
| AC | 1 | 0,002 | 0,00*** | 0,00 | 0,00 |
| BB | 1 | 1,19*** | 1,83*** | 1,24*** | 0,41*** |
| BC | 1 | 0,197*** | 0,027*** | 0,00 | 0,018 |
| CC | 1 | 2,73*** | 2,30*** | 1,71*** | 5,78*** |
| Error puro | 142 | 0,35 | 1,31 | 1,07 | 5,26 |
| Coefficiente de determinación (R ²) | | 89,9 | 92,4 | 90,7 | 70,5 |

G.L: grados de libertad; *p ≤ 0,05; **p ≤ 0,01; *** p ≤ 0,001; valores sin * no presentan diferencias significativas.

El parámetro de color a^* para el día 1 el modelo logró explicar el 89,9 % de variabilidad de los datos. Para el día 7 el modelo logró explicar el 92,44 % de variabilidad de los datos. En el caso del día 14 el modelo logró explicar el 90,68 % de variabilidad de los datos. para el día 21 el modelo logró explicar el 70,54 % de variabilidad de los datos.

A continuación, se presentan los modelos reducidos obtenidos para los valores de a^* para el día 1, 7, 14 y 21.

$$a^*d1 = 0,182963 + 0,0972488xA + 0,0242077xB + 0,373048xC - 0,163314xA^2 + 0,118252xAxB - 0,186396xB^2 + 0,0743456xBxC + 0,282101xC^2$$

$$a^*d7 = 0,356333 + 0,0605xA - 0,014625xB + 0,410125xC - 0,196167xA^2 + 0,05025xAxB - 0,222917xB^2 + 0,249583xC^2$$

$$a^*d15 = 0,435333 + 0,093625xA + 0,086xB + 0,389125xC - 0,177667xA^2 + 0,12725xAxB - 0,183417xB^2 + 0,215333xC^2$$

$$a^*d21 = 0,319667 + 0,1595xA + 0,084xB + 0,348xC - 0,180833xA^2 - 0,105833xB^2 + 0,395667xC^2$$

Al igual que para la luminosidad, casi todos los términos del modelo fueron significativos, observándose que también el contenido de grasa es la variable que más influye en esta respuesta, seguida de los términos cuadráticos de grasa, durante todo el tiempo de almacenamiento, tanto en el día 1 como en el día 21 (Tabla 20). De la misma manera, se observan los efectos antes mencionados a través del diagrama de Pareto a día 1 y 21 (Figura 49), y en los gráficos de efectos principales para el primer y último día de análisis (Figura 50). Para el parámetro a^*d1 , la grasa es 3,8 veces mayor que el almidón. Mientras que a^*d7 , la grasa es 6,8 veces mayor que el almidón, Para a^*d15 , la grasa es 4,2 veces mayor que el almidón. Y para a^*d21 , la grasa es 2,2 veces mayor que el almidón.

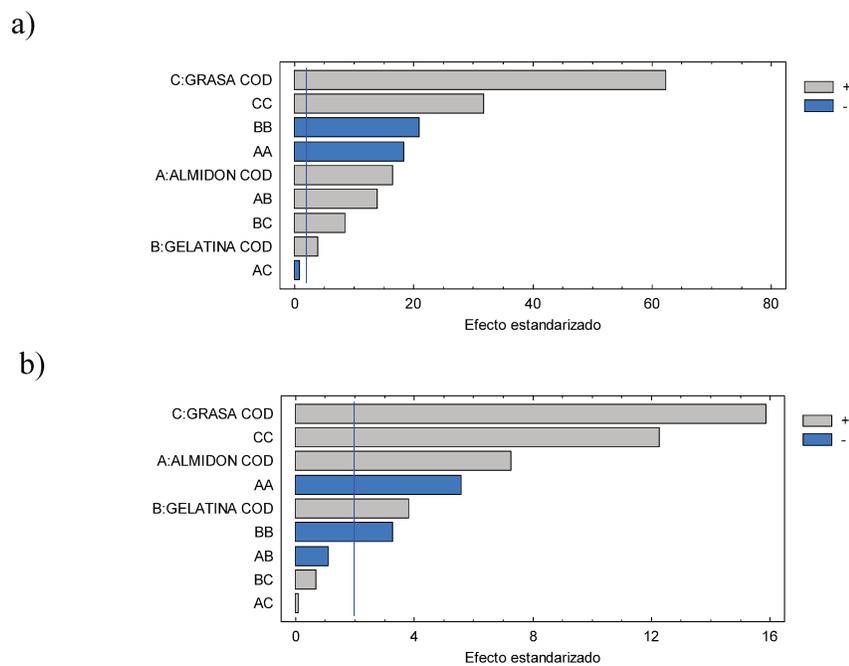


Figura 49. Diagramas de Pareto estandarizado para a^* al día 1 (a) y día 21 (b).

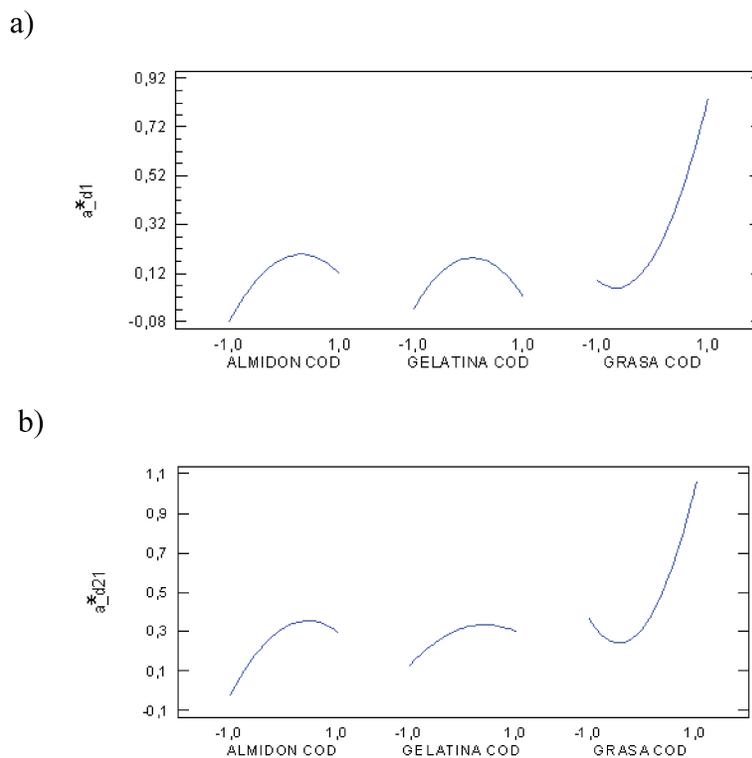
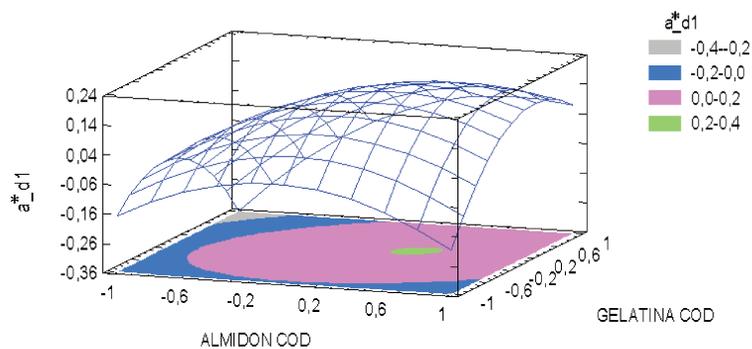


Figura 50. Gráficos de efectos principales para a^* al día 1 (a) y día 21 (b), para los valores de pH de quesos untables elaborados con lactosuero.

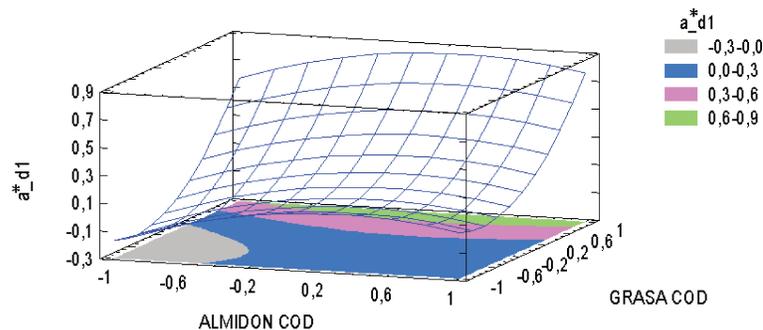
Como se observa en los gráficos de superficie de respuesta (Figura 51), a medida que incrementa el contenido de gelatina en la formulación, incrementa el valor de a^* a valores positivos, es decir el queso tendría un color con mayor tendencia a más rojizo. Esta última afirmación no puede ser apreciada de manera visual, debido a que, al ser los valores tan bajos, parecería no existir una presencia de este color. Por el contrario, a medida que aumenta el contenido de almidón, los valores de a^* tienden a ser bajos, inclusive negativos, es decir, colores más verdosos.

Pero al igual que los valores positivos, estos se encuentran tan cercanos a 0 que no es apreciable a la vista estas diferencias de colores. Valores similares fueron encontrados por Rubel et al. (2019) y por Cunha et al. (2010), en quesos procesados y análogos elaborados con ricotta.

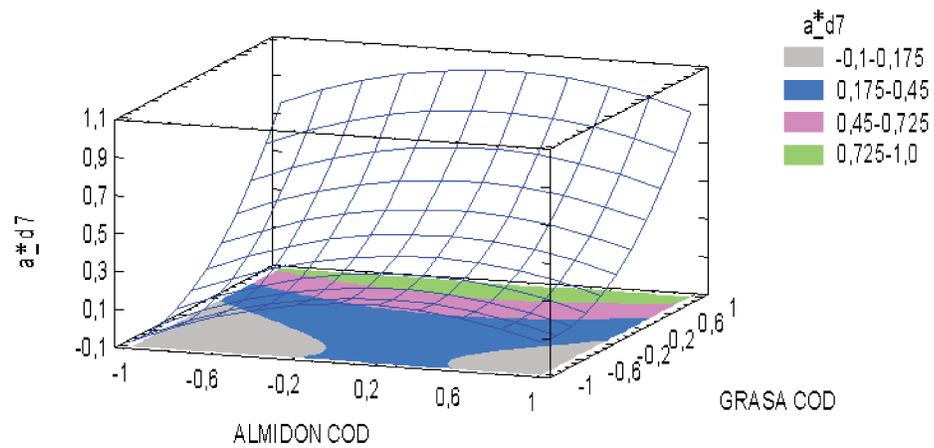
a)



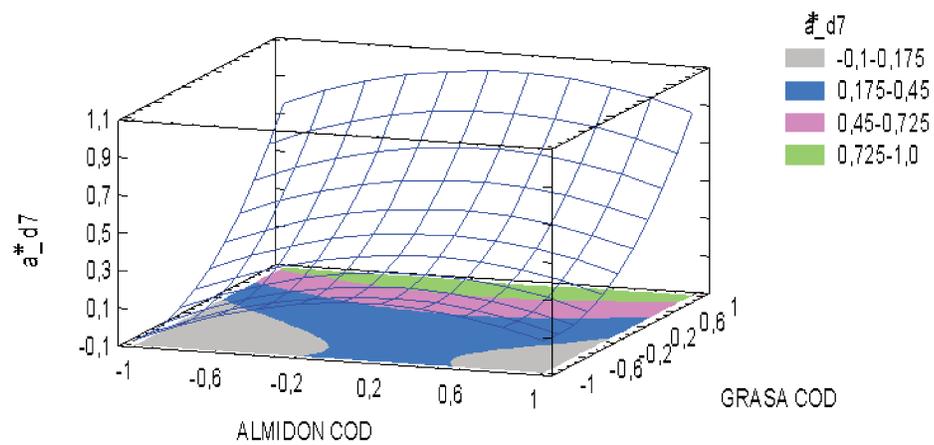
b)



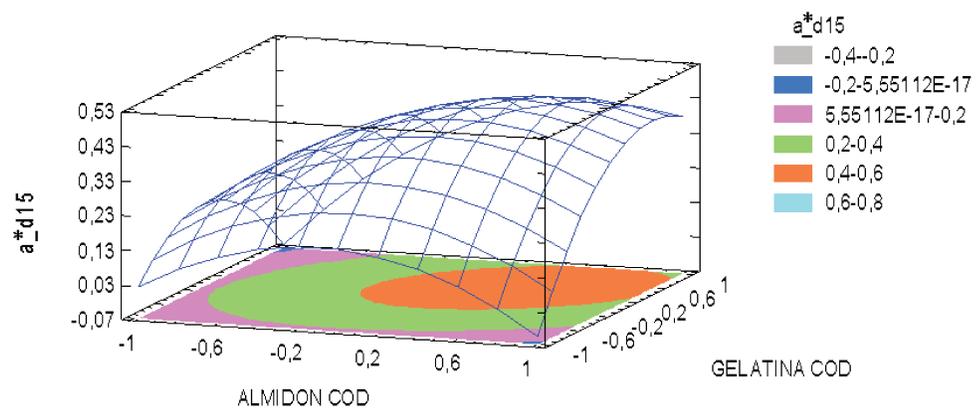
c)



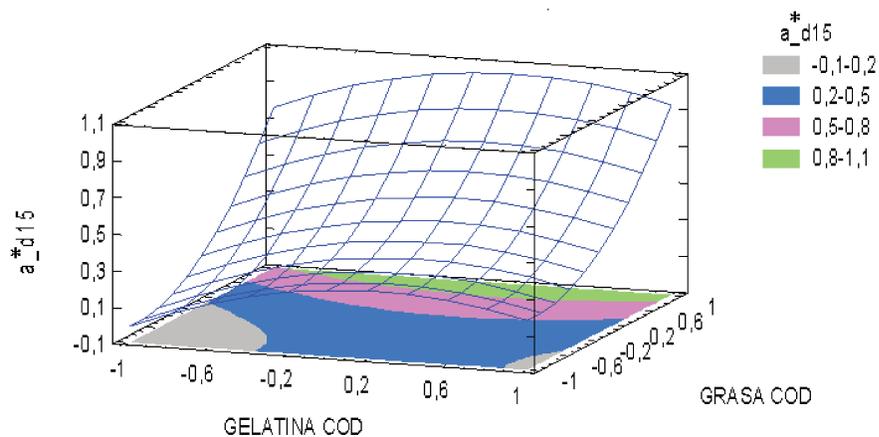
d)



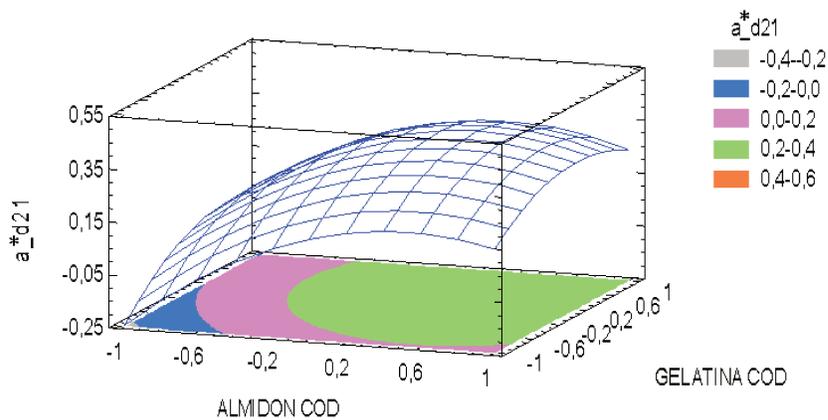
e)



f)



g)



h)

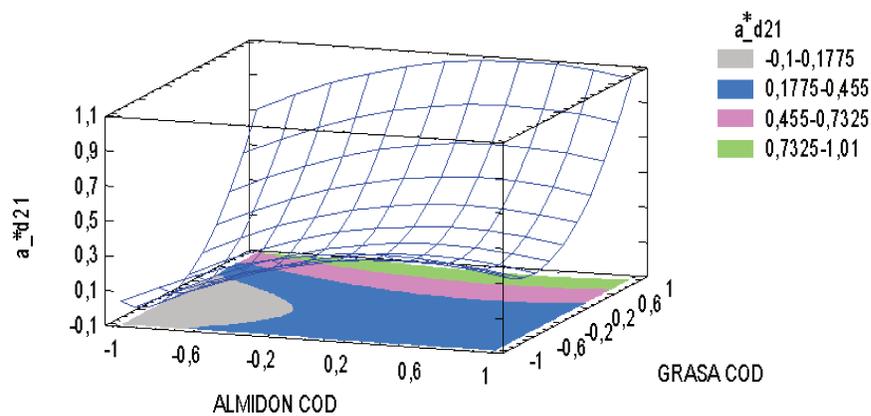


Figura 51. Gráficos de superficie de respuesta estimada para los valores de a^* en función del contenido de grasa y gelatina en el día 1 a), 7 c), 14 e) y 21 g) y en función del contenido de gelatina y almidón en el día 1 b) y 7 d), 14 f) y 21 h).

Como se observa en la Figura 51, cuando se estudia el efecto de la concentración de almidón y gelatina sobre el parámetro de color a^* en los diferentes días de estudio, se observa un comportamiento casi igual en los diferentes días, donde a medida que incrementa el contenido de gelatina, el color de a^* es más elevado, tiende a ser ligeramente más rojizo, y esto es debido al color propio que tiene la gelatina como ingrediente, que normalmente es bajo (Kosfaj et al., 2025). Asimismo, cuando se observa el efecto de la gelatina y el contenido de grasa, se puede evidenciar de la misma manera, una tendencia similar en los diferentes días de análisis, donde el contenido de grasa tiene un mayor efecto sobre a^* a medida que incrementa, dicha respuesta incrementa también. No obstante, los rangos obtenidos en el presente trabajo, se encuentran dentro de los valores normales para un producto lácteo (Milovanovic, et al., 2020).

3.2.3.3 Efecto en el parámetro de color b^* .

Los resultados experimentales obtenidos de el parámetro de color b^* para los días 1, 7, 14 y 21 se presentan en la Tabla 21. Asimismo, en la Tabla 22 se presentan los valores de suma de cuadrados del ANOVA correspondientes para el mismo parámetro en los diferentes días de análisis.

Tabla 21 Valores promedio obtenidos para b*.

| ALMIDON COD | GELATINA COD | GRASA COD | b*d1 | | b*d7 | | b*d14 | | b*d21 | |
|----------------|-----------------|--------------|-------|--------|------|-------|-------|--------|-------|--------|
| 0,0 | 0,0 | 0,0 | 17,8 | ± 0,2 | 17,8 | ± 0,1 | 17,7 | ± 0,2 | 21,0 | ± 0,5 |
| 0,0 | 1,0 | 1,0 | 18,0 | ± 0,2 | 17,3 | ± 0,6 | 17,7 | ± 0,2 | 17,6 | ± 0,2 |
| -1,0 | -1,0 | 0,0 | 17,1 | ± 0,1 | 16,6 | ± 0,2 | 17,0 | ± 0,3 | 16,5 | ± 0,2 |
| 0,0 | -1,0 | -1,0 | 17,9 | ± 0,1 | 18,3 | ± 0,1 | 18,2 | ± 0,1 | 17,7 | ± 0,1 |
| -1,0 | 0,0 | -1,0 | 18,3 | ± 0,2 | 18,2 | ± 0,3 | 18,1 | ± 0,1 | 18,3 | ± 0,2 |
| 1,0 | 0,0 | 1,0 | 17,85 | ± 0,04 | 17,6 | ± 0,1 | 17,67 | ± 0,04 | 17,9 | ± 0,2 |
| 0,0 | -1,0 | 1,0 | 17,7 | ± 0,1 | 17,3 | ± 0,2 | 17,3 | ± 0,1 | 17,1 | ± 0,1 |
| 1,0 | 1,0 | 0,0 | 18,7 | ± 0,1 | 17,5 | ± 0,1 | 18,6 | ± 0,1 | 18 | ± 2 |
| -1,0 | 1,0 | 0,0 | 16,2 | ± 0,1 | 16,2 | ± 0,1 | 15,6 | ± 0,1 | 15,5 | ± 0,1 |
| 0,0 | 1,0 | -1,0 | 18,3 | ± 0,1 | 18,2 | ± 0,1 | 17,9 | ± 0,2 | 18,0 | ± 0,5 |
| 1,0 | 0,0 | -1,0 | 18,3 | ± 0,1 | 18,0 | ± 0,1 | 17,9 | ± 0,1 | 18,3 | ± 0,1 |
| -1,0 | 0,0 | 1,0 | 17,5 | ± 0,1 | 17,1 | ± 0,1 | 17,2 | ± 0,1 | 17,1 | ± 0,1 |
| 0,0 | 0,0 | 0,0 | 18,2 | ± 0,1 | 17,6 | ± 0,1 | 17,86 | ± 0,04 | 17,5 | ± 0,1 |
| 1,0 | -1,0 | 0,0 | 17,1 | ± 0,2 | 16,7 | ± 0,3 | 16,9 | ± 0,1 | 16,79 | ± 0,02 |
| 0,0 | 0,0 | 0,0 | 18,2 | ± 0,1 | 17,6 | ± 0,1 | 17,86 | ± 0,04 | 17,5 | ± 0,1 |

Tabla 22 Análisis de varianza de los modelos obtenidos para b* durante los días de análisis.

| Fuente | G.L | b*d1 | b*d7 | b*d14 | b*d21 |
|--|------------|-------------|-------------|--------------|--------------|
| A:ALMIDON COD | 1 | 9,93*** | 3,71*** | 13,09*** | 20,03*** |
| B:GELATINA COD | 1 | 3,23*** | 0,25** | 0,14*** | 2,45 |
| C:GRASA COD | 1 | 3,77*** | 13,83*** | 6,30*** | 8,22*** |
| AA | 1 | 5,51*** | 8,75*** | 6,73*** | 23,59*** |
| AB | 1 | 16,13*** | 3,59*** | 23,16*** | 17,94*** |
| AC | 1 | 0,26*** | 0,76*** | 1,34*** | 1,55 |
| BB | 1 | 5,51*** | 6,98*** | 3,74*** | 44,27*** |
| BC | 1 | 0,05 | 0,04624 | 0,78*** | 0,1 |
| CC | 1 | 3,68*** | 10,92*** | 3,81*** | 0,00 |
| Error puro | 142 | 2,81 | 6,67 | 2,59 | 96,93 |
| Coefficiente de determinación (R ²) | | 85,2 | 85,4 | 84,3 | 56,2 |

G.L: grados de libertad; *p ≤ 0,05; **p ≤ 0,01; *** p ≤ 0,001; valores sin * no presentan diferencias significativas.

Para el parámetro de color b^* para el día 1 el modelo logró explicar el 85,2 % de variabilidad de los datos. Para el día 7 el modelo logró explicar el 85,44 % de variabilidad de los datos. En el caso del día 14 el modelo logró explicar el 84,27 % de variabilidad de los datos. Para el día 21 el modelo 52,16 % de variabilidad de los datos.

En ese sentido, se presentan los modelos reducidos obtenidos para los valores de b^* para el día 1, 7, 14 y 21.

$$\mathbf{b^*d1} = 18,0527 + 0,352375x_A + 0,201x_B - 0,217125x_C - 0,386208x_A^2 + 0,635x_Ax_B + 0,08075x_Ax_C - 0,386458x_B^2 + 0,315792x_C^2$$

$$\mathbf{b^*d7} = 17,652 + 0,21525x_A + 0,05625x_B - 0,41575x_C - 0,48675x_A^2 + 0,2995x_Ax_B + 0,1375x_Ax_C - 0,43475x_B^2 + 0,54375x_C^2$$

$$\mathbf{b^*d14} = 17,8 + 0,4045x_A + 0,041375x_B - 0,280625x_C - 0,426875x_A^2 + 0,761x_Ax_B + 0,183x_Ax_C - 0,318125x_B^2 + 0,13975x_Bx_C + 0,321375x_C^2$$

$$\mathbf{b^*d21} = 18,6971 + 0,500375x_A - 0,320625x_C - 0,799385x_A^2 + 0,66975x_Ax_B - 1,09513x_B^2$$

Como se observa en los modelos reducidos presentados para el parámetro de color b^* , y como se observa en los diferentes diagramas de Pareto (Figura 52), analizando los términos lineales, quien presentó mayor influencia sobre el parámetro de color generalmente fue el contenido de almidón, seguido del porcentaje de grasa y finalmente el contenido de gelatina. No obstante, estos términos no son los que tienen mayor influencia, sino la interacción almidón-gelatina en el día 1 y los términos cuadráticos de gelatina al día 21, como se observa en los resultados de ANOVA (Tabla 22).

En el modelo b^*d1 , el almidón fue la variable con mayor impacto, con un efecto 1.6 veces superior al de la grasa y 1.75 veces mayor que el de la gelatina. Para b^*d7 , la grasa resultó ser la variable más influyente, con un coeficiente 1.9 veces mayor que el del almidón y 7.4 veces superior al de la gelatina. En el modelo b^*d14 , el almidón volvió a destacar como la variable dominante, siendo su efecto 1.4 veces mayor que el de la grasa y 9.8 veces más alto que el de la gelatina. Finalmente, en el modelo b^*d21 (donde no se consideró gelatina como término lineal), el almidón presentó un impacto 1.56 veces superior al de la grasa. Estos resultados indican que, a diferencia de los modelos anteriores, el almidón tiende a ejercer una mayor influencia sobre la variable dependiente

en tres de los cuatro modelos analizados, desplazando a la grasa como principal variable explicativa en esta serie de regresiones, mientras que la gelatina mostró un efecto marcadamente menor en todos los casos donde fue incluida.

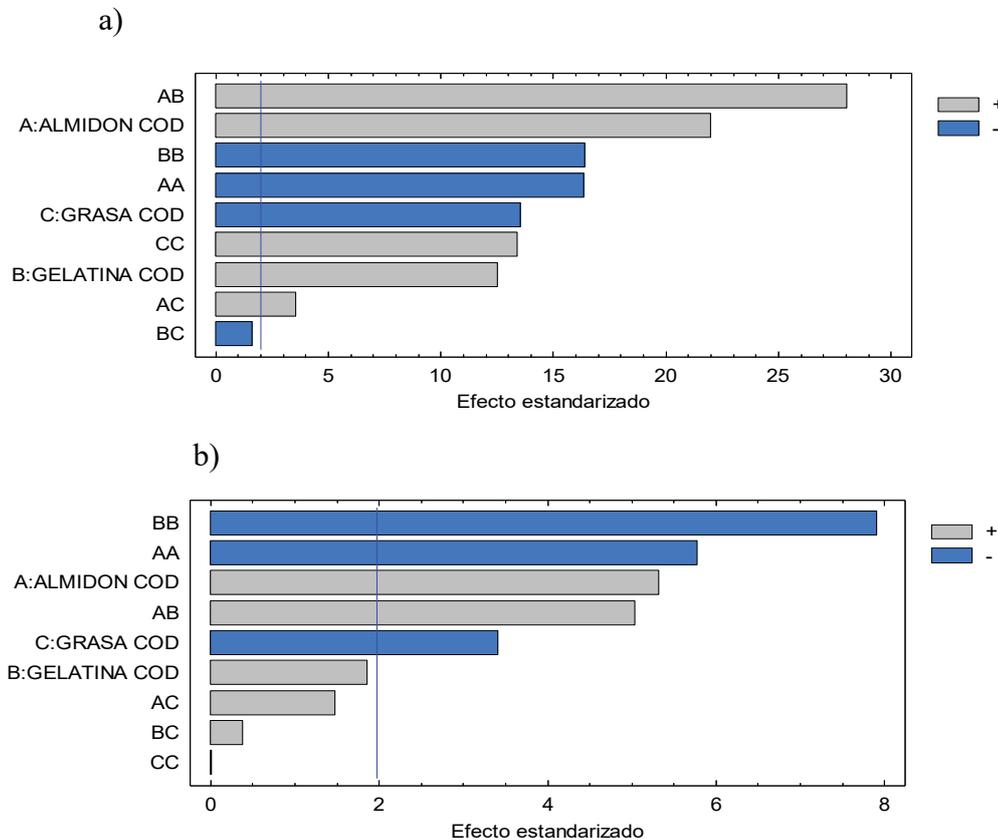


Figura 52. Diagrama de Pareto estandarizado para b^* al día 1 (a) y día 21 (b)

Como se observa en los gráficos de efectos principales (Figura 52), a medida que incrementa en contenido de almidón y gelatina, la muestra presenta tonalidades menos amarillas, mientras que, a medida que incrementa el porcentaje de grasa, el queso untable presenta tonalidades más amarillas. Los valores obtenidos son superiores a los obtenidos por Cunha et al. (2010), para quesos análogos (aproximadamente 10). No obstante, Milovanovic et al. (2020) reportó para quesos de vaca, valores similares a los obtenidos en el presente trabajo.

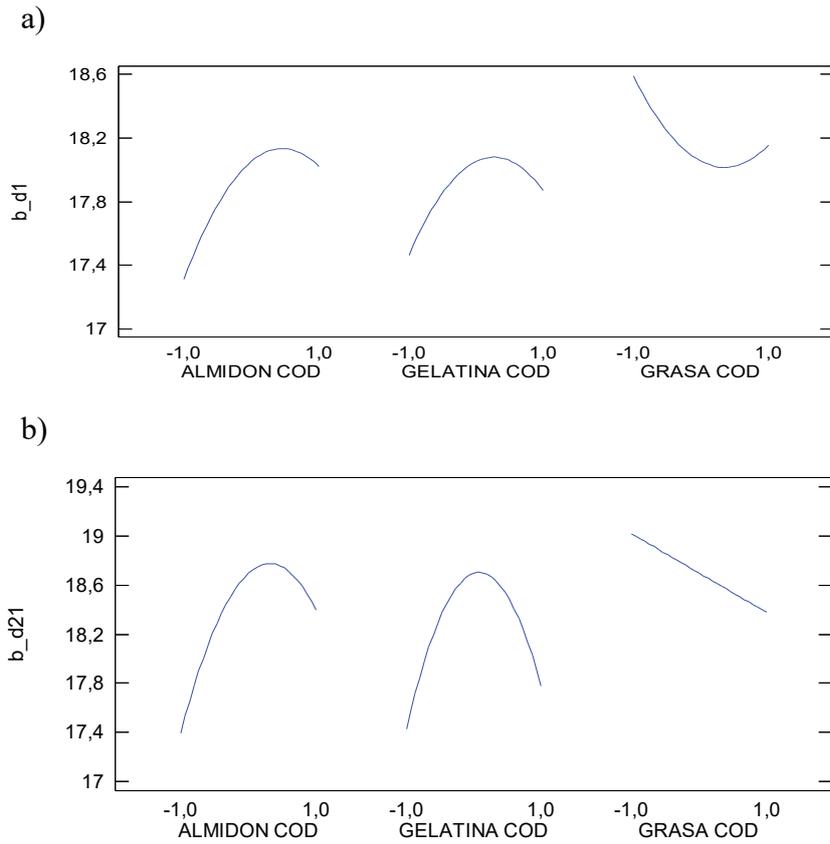
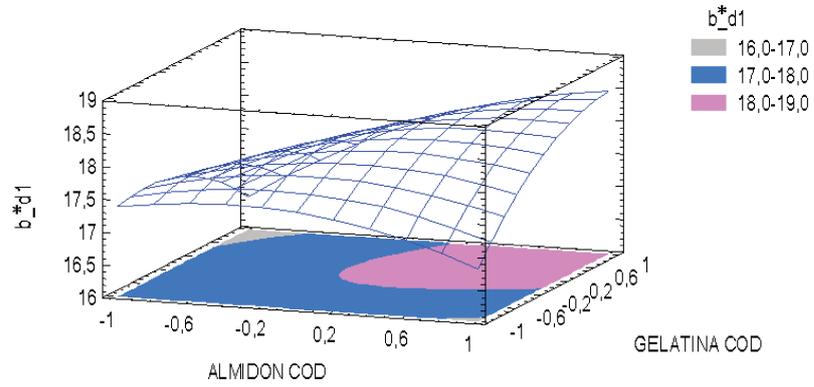


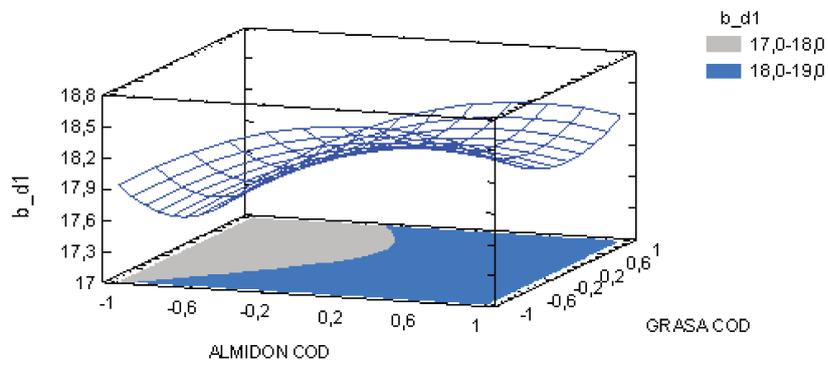
Figura 53. Gráfica de efectos principales para b^* al día 1 (a) y día 21 (b)

Tanto al día 1 como al día 21, se observó un comportamiento similar en el parámetro b^* por acción de la concentración de almidón, gelatina y grasa.

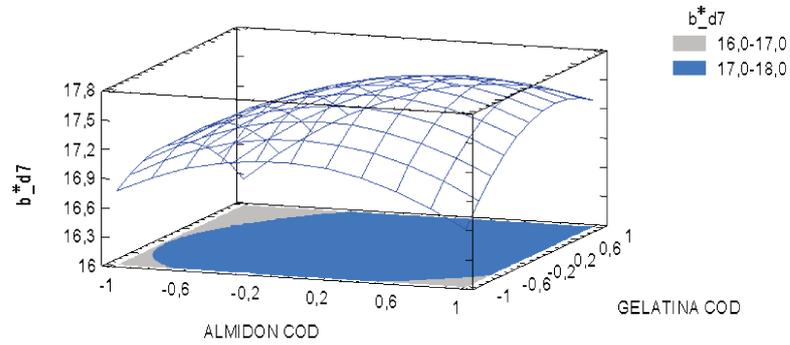
a)



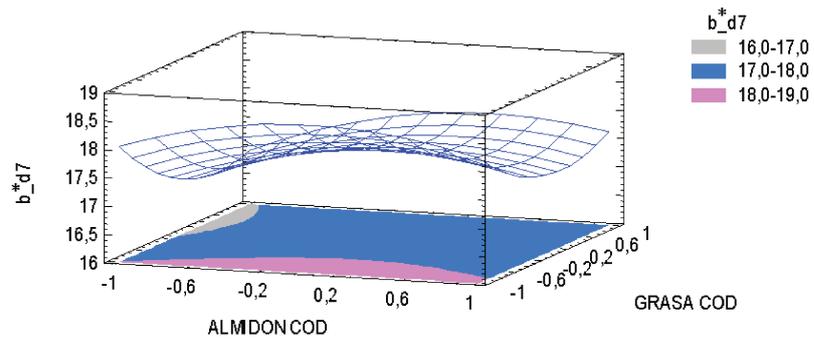
b)



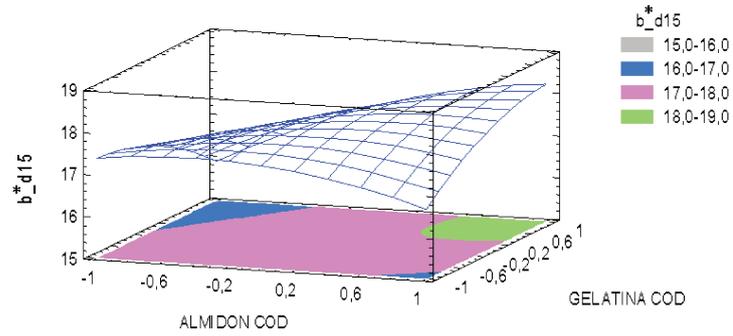
c)



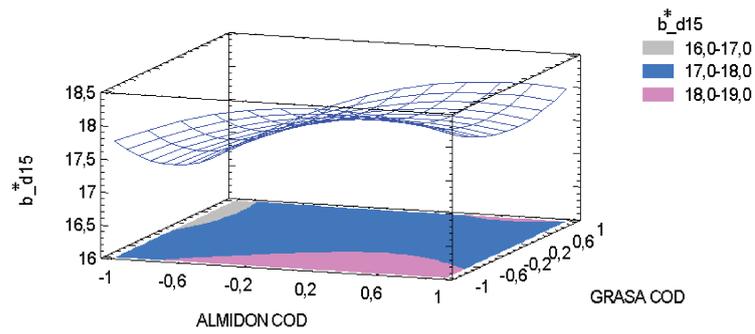
d)



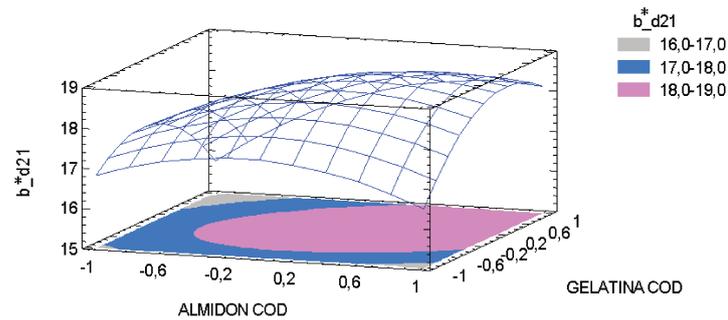
e)



f)



g)



h)

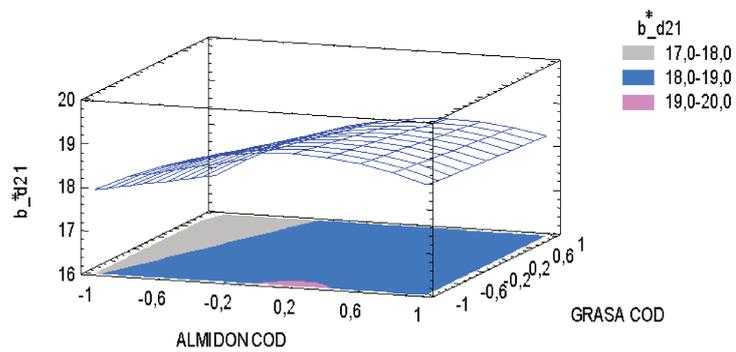


Figura 54. Gráficos de superficie de respuesta estimada para los valores de Luminosidad en función del contenido de grasa y gelatina en el día 1 a), 7 c), 14 e) y 21 g) y en función del contenido de grasa y almidón en el día 1 b) y 7 d), 14 f) y 21 h).

Como se observa en la Figura 54, y de acuerdo a los modelos predictivos obtenidos para los diferentes días de análisis, a medida que incrementa el contenido de almidón, el parámetro *b es más alto, lo cual significa que el queso untable tiene una tonalidad más amarilla.

No obstante, es dependiente de las interacciones con la gelatina y la grasa, las cuales al igual que el término lineal son positivas, por ende, dichas interacciones promueven la obtención de colores más amarillos en el queso untable. En el caso del contenido de grasa, se observó que, a medida que el contenido de esta aumenta, el queso untable presenta un color menos amarillo. Según Rodarte et al. (2018), las cremas homogeneizadas presentan un color menos amarillo, respecto a una crema sin tratar. Como se mencionó anteriormente, la crema utilizada como materia prima es de origen industrial, la cual para mantener su estabilidad es homogenizada, es por ello que, al obtener un queso con mayor porcentaje de grasa, la cantidad de crema utilizada en la formulación es más alta, es por ello que, como resultado se obtienen quesos untables menos amarillos.

3.2.4 Efecto en la actividad de agua (aw).

Los resultados experimentales obtenidos para actividad de agua (aw) para los días 1, 7, 14 y 21 se presentan en la Tabla 23. Asimismo, en la Tabla 24 se presentan los ANOVA correspondientes para el mismo parámetro a los diferentes días de análisis.

Tal como se observa en la Tabla 23, dependiendo del tratamiento, pudo haber un incremento o a su vez disminución en la actividad de agua de los quesos untables. Sin embargo, dicha variación no supera el 1%, por lo tanto, se puede inferir que el producto es estable en el tiempo, teniendo una aw prácticamente constante. Estos resultados se asemejan a los obtenidos por Gulzar et al. (2015), donde observaron que los valores de aw variaron ligeramente durante los días de análisis cuando se usan distintos hidrocoloides.

Tabla 23 Valores promedio obtenidos para aw.

| ALMIDON COD | GELATINA COD | GRASA COD | awd1 | | awd7 | | awd14 | | awd21 | |
|----------------|-----------------|--------------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|-------|---------|
| 0 | 0 | 0 | 0,980 | ± 0,000 | 0,980 | ± 0,000 | 0,984 | ± 0,000 | 0,980 | ± 0,000 |
| 0 | 1 | 1 | 0,988 | ± 0,000 | 0,986 | ± 0,000 | 0,986 | ± 0,000 | 0,984 | ± 0,000 |
| -1 | -1 | 0 | 0,980 | ± 0,000 | 0,982 | ± 0,001 | 0,982 | ± 0,000 | 0,980 | ± 0,000 |
| 0 | -1 | -1 | 0,973 | ± 0,000 | 0,979 | ± 0,000 | 0,976 | ± 0,000 | 0,981 | ± 0,000 |
| -1 | 0 | -1 | 0,977 | ± 0,000 | 0,984 | ± 0,000 | 0,981 | ± 0,000 | 0,979 | ± 0,000 |
| 1 | 0 | 1 | 0,984 | ± 0,000 | 0,994 | ± 0,000 | 0,989 | ± 0,000 | 0,987 | ± 0,000 |
| 0 | -1 | 1 | 0,982 | ± 0,000 | 0,989 | ± 0,000 | 0,98 | ± 0,01 | 0,983 | ± 0,000 |
| 1 | 1 | 0 | 0,981 | ± 0,000 | 0,981 | ± 0,000 | 0,980 | ± 0,000 | 0,980 | ± 0,000 |
| -1 | 1 | 0 | 0,981 | ± 0,000 | 0,980 | ± 0,000 | 0,979 | ± 0,000 | 0,979 | ± 0,000 |
| 0 | 1 | -1 | 0,981 | ± 0,000 | 0,980 | ± 0,000 | 0,98 | ± 0,01 | 0,980 | ± 0,000 |
| 1 | 0 | -1 | 0,979 | ± 0,000 | 0,980 | ± 0,000 | 0,977 | ± 0,000 | 0,97 | ± 0,01 |
| -1 | 0 | 1 | 0,985 | ± 0,000 | 0,992 | ± 0,000 | 0,985 | ± 0,000 | 0,983 | ± 0,000 |
| 0 | 0 | 0 | 0,98 | ± 0,01 | 0,985 | ± 0,000 | 0,979 | ± 0,000 | 0,981 | ± 0,000 |
| 1 | -1 | 0 | 0,985 | ± 0,000 | 0,979 | ± 0,000 | 0,978 | ± 0,000 | 0,978 | ± 0,000 |
| 0 | 0 | 0 | 0,983 | ± 0,010 | 0,985 | ± 0,000 | 0,979 | ± 0,000 | 0,981 | ± 0,000 |

Tabla 24 Análisis de varianza de los modelos obtenidos para aw durante los días de análisis.

| Fuente | G.L | awd1 | awd7 | awd14 | awd21 |
|---|-----|------------|-----------------|----------------|-------------|
| A:ALMIDON COD | 1 | 1,2458E-05 | 0,0000105875* | 5,183E-06 | 8,64E-07 |
| B:GELATINA COD | 1 | 7,2833E-06 | 9,5161E-06 | 3,3639E-06 | 7,14E-09 |
| C:GRASA COD | 1 | 0,000*** | 0,000410063*** | 0,000232563*** | 0,000144*** |
| AA | 1 | 3,28E-05 | 6,31E-10 | 9,16E-06 | 1,27E-05 |
| AB | 1 | 2,3417E-05 | 1,2245E-06 | 1,1735E-05 | 3,71E-07 |
| AC | 1 | 0,0000045 | 0,000015125* | 0,000032 | 0,00005* |
| BB | 1 | 3,5101E-05 | 0,000137682*** | 0,00006552* | 2,38E-09 |
| BC | 1 | 0,0001*** | 0,000002 | 2,8125E-05 | 5,00E-07 |
| CC | 1 | 0,0000** | 4,7743E-05 | 2,5153E-06 | 8,8595E-06 |
| Falta de ajuste | 133 | 0,00* | 0,0000424333*** | 0,00024796 | 0,00017018 |
| Error puro | 142 | 0,00024193 | 0,00073483 | 0,00064203 | 0,00040011 |
| Coefficiente de determinación (R ²) | | 71,1 | 94,2 | 61,4 | 57,5 |

G.L: grados de libertad; * $p \leq 0,05$; ** $p \leq 0,01$; *** $p \leq 0,001$, valores sín * no presentan diferencias significativas.

El modelo obtenido para actividad de agua en el día 1 logró explicar el 71,1% de variabilidad de los datos. Para el día 7 el modelo logró explicar el 94,2% de variabilidad de los datos. En el caso del día 14 el modelo logró explicar el 61,38% de variabilidad de los datos. Para el día 21 el modelo logró explicar el 57,46% de variabilidad de los datos.

A continuación, se presentan los modelos reducidos obtenidos para los valores de actividad de agua para el día 1, 7, 14 y 21.

$$\mathbf{awd1} = 0,981583 + 0,000896258xA - 0,000611786xB + 0,00585559xC + 0,00328882xBxC - 0,00293848xC^2$$

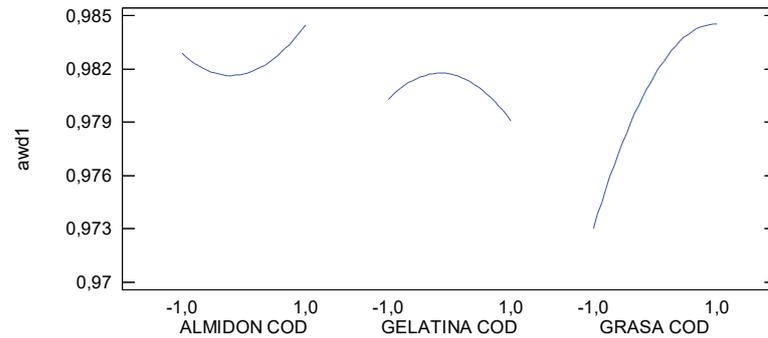
$$\mathbf{awd7} = 0,984403 - 0,0011114xA - 0,0010614xB + 0,0050625xC + 0,001375xAxC - 0,00497243xB^2 + 0,00302114xC^2$$

$$\mathbf{awd14} = 0,982 - 0,000452941xA + 0,000497059xB + 0,0038125xC - 0,00289706xB^2$$

$$\mathbf{awd21} = 0,980329 - 0,000095122xA + 0,000204878xB + 0,003xC + 0,0025xAxC$$

En los modelos predictivos obtenidos para la actividad de agua ($awd1$, $awd7$, $awd14$ y $awd21$), la variable grasa mostró de forma consistente la mayor influencia sobre la respuesta, superando en todos los casos a los efectos aportados por almidón y gelatina. En el modelo $awd1$, el coeficiente asociado a la grasa fue 6,5 veces mayor que el del almidón y 9,6 veces mayor que el de la gelatina. En $awd7$, la grasa tuvo un impacto aproximadamente 4,6 veces superior al del almidón y 4,8 veces mayor que el de la gelatina. Para $awd15$, la influencia de la grasa fue 8,4 veces mayor que la del almidón y 7,7 veces más alta que la de la gelatina. Finalmente, en $awd21$, el efecto de la grasa fue 31,6 veces mayor que el del almidón y 14,6 veces mayor que el de la gelatina. Estos resultados evidencian que, a pesar de las pequeñas magnitudes absolutas de los coeficientes, el componente graso ejerce un efecto notablemente más pronunciado sobre la actividad de agua en comparación con los demás factores estudiados, destacándose como el principal modulador de dicha propiedad fisicoquímica en la matriz evaluada.

a)



b)

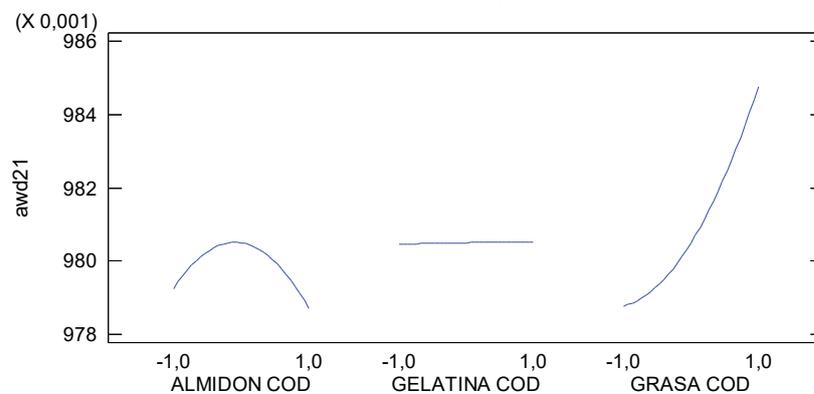
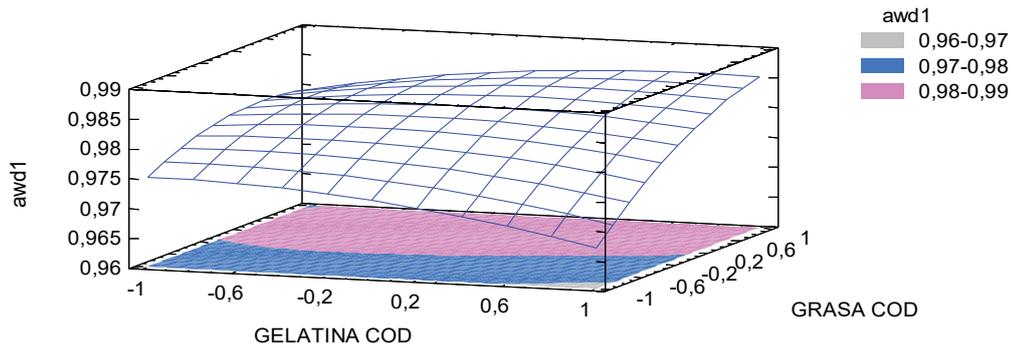


Figura 55. Gráfica de efectos principales para aw al día 1 (a) y día 21 (b), para de quesos untables elaborados con lactosuero.

Los resultados mostrados en las Gráficos de efectos principales (Figura 55) concuerdan con los modelos predictivos obtenidos, al igual que con las Gráficos de superficie de respuesta (Figura 56), donde se evidencia la importancia del contenido de grasa sobre la aw. En el presente estudio se observó que, dentro del rango experimental, a medida que incrementa el contenido lipídico, el valor de aw aumenta. Como se mencionó anteriormente, esto se debe a que a medida que la fracción de grasa en el queso es mayor, se requiere en su formulación mayor proporción de crema y por ende, menor contenido de ingredientes ricos en proteínas.

a)



b)

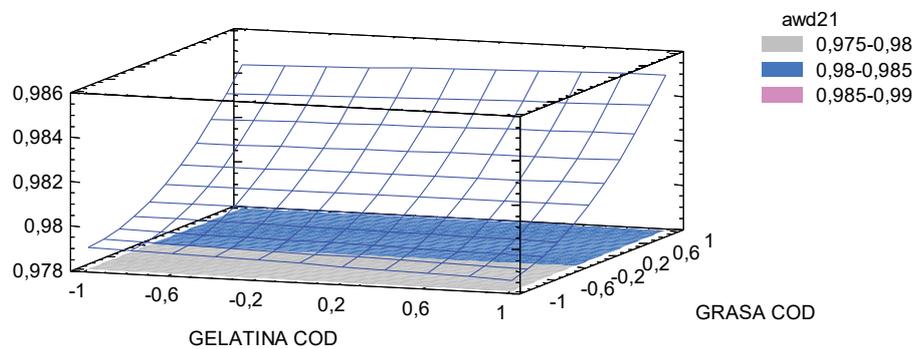


Figura 56. Gráficos de superficie de respuesta estimada para los valores de aw en función del contenido de grasa y gelatina en el día 1 a), 21 b).

3.2.5 Efecto en el porcentaje de grasa, proteína, sólidos totales y cenizas.

Los resultados experimentales obtenidos de para grasa, proteína, sólidos totales y cenizas obtenidos a la mitad del tiempo de estudio se presentan en la Tabla 25. Asimismo, en la Tabla 26 se presentan los valores de suma de cuadrados del ANOVA correspondientes para los mismos parámetros.

Como se observa en la Tabla 26, tanto el porcentaje de grasa como el porcentaje de proteína y cenizas, presentaron diferencias significativas por efecto de las variables en estudio. Por el contrario, el porcentaje de sólidos totales (%ST), no fue influenciada por las variables de estudio. Esto es debido a que las formulaciones para cada tratamiento de los quesos untables están definidos de manera tal que el porcentaje de sólidos totales de los quesos sea igual para todos los tratamientos, no obstante, debido a la viscosidad que cada uno posee, en el proceso de tratamiento térmico u homogeneización puede cambiar ligeramente.

Tabla 25 Valores promedio obtenidos para % de grasa, proteína sólidos totales y ceniza.

| ALMIDON COD | GELATINA COD | GRASA COD | %Grasa | | %Proteína | | %ST | | %Cenizas | |
|----------------|-----------------|--------------|--------|--------|-----------|--------|------|--------|----------|---------|
| 0 | 0 | 0 | 17 | ± 0,00 | 5,0 | ± 0,1 | 32,4 | ± 0,2 | 1,13 | ± 0,04 |
| 0 | 1 | 1 | 24,5 | ± 0,7 | 3,3 | ± 0,1 | 30,2 | ± 0,7 | 0,60 | ± 0,02 |
| -1 | -1 | 0 | 21 | ± 0,00 | 5,5 | ± 0,4 | 32,6 | ± 0,0 | 1,15 | ± 0,01 |
| 0 | -1 | -1 | 14 | ± 0,00 | 6,6 | ± 0,8 | 31,9 | ± 0,9 | 1,40 | ± 0,01 |
| -1 | 0 | -1 | 13 | ± 0,00 | 8 | ± 1 | 29,4 | ± 0,01 | 1,32 | ± 0,01 |
| 1 | 0 | 1 | 24 | ± 0,00 | 3,6 | ± 0,1 | 28,3 | ± 0,8 | 0,60 | ± 0,01 |
| 0 | -1 | 1 | 24,5 | ± 0,7 | 3,2 | ± 0,1 | 28,7 | ± 0,8 | 0,57 | ± 0,02 |
| 1 | 1 | 0 | 17 | ± 0,00 | 5,2 | ± 0,1 | 33,2 | ± 0,02 | 1,12 | ± 0,001 |
| -1 | 1 | 0 | 18 | ± 0,00 | 4,6 | ± 0,1 | 30,4 | ± 0,1 | 1,00 | ± 0,01 |
| 0 | 1 | -1 | 23 | ± 0,00 | 5,53 | ± 0,01 | 29,5 | ± 0,04 | 1,15 | ± 0,01 |
| 1 | 0 | -1 | 13,5 | ± 0,7 | 7,1 | ± 0,3 | 29,9 | ± 0,3 | 1,33 | ± 0,003 |
| -1 | 0 | 1 | 24 | ± 0,00 | 3,9 | ± 0,1 | 29,9 | ± 0,3 | 0,61 | ± 0,01 |
| 0 | 0 | 0 | 17 | ± 0,00 | 5,5 | ± 0,6 | 30,0 | ± 0,2 | 0,96 | ± 0,01 |
| 1 | -1 | 0 | 20 | ± 0,00 | 4,83 | ± 0,02 | 30,0 | ± 0,4 | 1,11 | ± 0,02 |
| 0 | 0 | 0 | 17 | ± 0,00 | 5,5 | ± 0,6 | 32,7 | ± 0,8 | 0,96 | ± 0,01 |

Tabla 26 Análisis de varianza de los modelos obtenidos para % de grasa, proteína sólidos totales y ceniza durante los días de análisis.

| Fuente | G.L | %Grasa | %Proteína | %ST | %Cenizas |
|--|------------|---------------|------------------|------------|-----------------|
| A:ALMIDON COD | 1 | 0,5625* | 0,498291 | 1,71E-01 | 0,0026 |
| B:GELATINA COD | 1 | 2,25*** | 0,564166 | 4,63E-01 | 0,033*** |
| C:GRASA COD | 1 | 280,563*** | 43,603*** | 0,20868 | 1,981*** |
| AA | 1 | 1,41346*** | 0,982556* | 1,02E+00 | 0,022*** |
| AB | 1 | 0,00E+00 | 0,967545* | 6,34E-02 | 0,0138* |
| AC | 1 | 0,125 | 0,23501 | 0,987575 | 0,0002 |
| BB | 1 | 43,875*** | 3,35311*** | 7,30E-01 | 0,004 |
| BC | 1 | 40,5*** | 0,684608 | 1,87E+00 | 0,040*** |
| CC | 1 | 31,4135*** | 0,00281917 | 5,54283 | 0,088*** |
| Error puro | 142 | 480,167 | 3,50866 | 9,6829 | 0,0403 |
| Coeficiente de determinación (R ²) | | 82,9 | 91,0 | 77,4 | 98,0 |

G.L: grados de libertad; *p≤0,05; **p≤0,01; *** p≤0,001, valores sin * no presentan diferencias significativas.

El modelo obtenido para porcentaje de grasa logró explicar el 82,9% de variabilidad de los datos. Para el porcentaje de proteína el modelo logró explicar el 91,04% de variabilidad de los datos. En el caso del porcentaje de sólidos totales el modelo logró explicar el 77,41% de variabilidad de los datos. Para cenizas el modelo logró explicar el 98,02% de variabilidad de los datos.

A continuación, se presentan los modelos reducidos obtenidos para los valores de % de grasa, % de proteína, % de sólidos y % de ceniza.

$$\% \text{ Grasa} = 17,0 - 0,1875xA + 0,375xB + 4,1875xC - 0,4375xA^2 + 2,4375xB^2 - 2,25xBxC + 2,0625xC^2$$

$$\% \text{ Proteína} = 5,54299 - 0,187777xB - 1,65081xC - 0,698504xB^2$$

$$\% \text{ Cenizas} = 1,03135 + 0,0112737xA - 0,0456068xB - 0,351851xC + 0,0539697xA^2 + 0,0415525xAxB - 0,111144xC^2$$

Como se observa en los modelos predictivos presentados, en el gráfico de efectos principales (Figura 57) y en el análisis de varianza (Tabla 26), el contenido de grasa de los quesos untables, está directamente relacionada con la fracción lipídica, es decir mientras más crema tenga la formulación, efectivamente más grasa tendrá el queso. Por el contrario, cuanto más crema tenga la mezcla, menor contenido de proteína y cenizas tendrá el queso untable, esto es debido a que la crema tiene menor contenido proteico y de cenizas que el resto de componentes. Guinee y O'Callaghan (2013), reportó que en quesos procesados cuando el contenido de grasa es más elevado, el contenido de proteína se reduce. Resultados similares también fueron presentados por Chatziantoniou et al. (2015), al elaborar quesos untables a partir de suero con diferente contenido de crema, tanto para el contenido de proteína como para el contenido de cenizas. En el modelo de % grasa, el coeficiente de la grasa fue 22,3 veces mayor que el del almidón y 11,2 veces superior al de la gelatina, lo que indica una dominancia clara de esta variable sobre la composición lipídica del sistema. En el modelo de proteína, la grasa tuvo una influencia 8.8 veces mayor que la gelatina, única otra variable presente de forma lineal en dicha regresión. Por su parte, en el modelo para cenizas, la grasa superó al almidón en 31,2 veces y a la gelatina en un factor de 7,7. Estos resultados corroboran el papel preponderante de la grasa en la modulación de las propiedades composicionales del sistema, mientras que el almidón mostró una influencia marginal en todos los modelos,

particularmente en la determinación del contenido de cenizas, donde su impacto fue prácticamente insignificante frente al resto de variables.

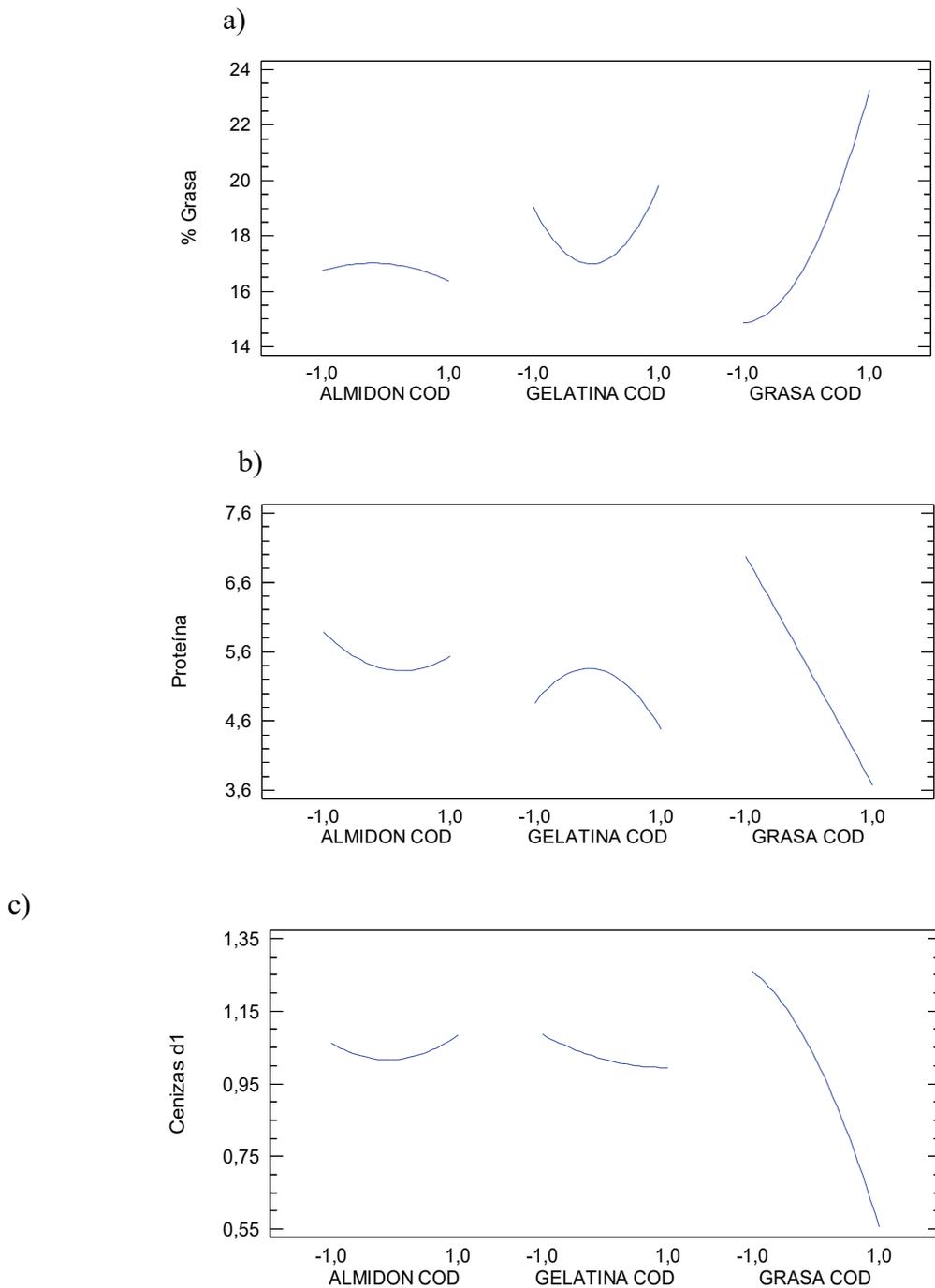


Figura 57. Gráficos de efectos principales para % de grasa (a) % de proteína (b) % y % de cenizas d) de quesos untables elaborados con lactosuero.

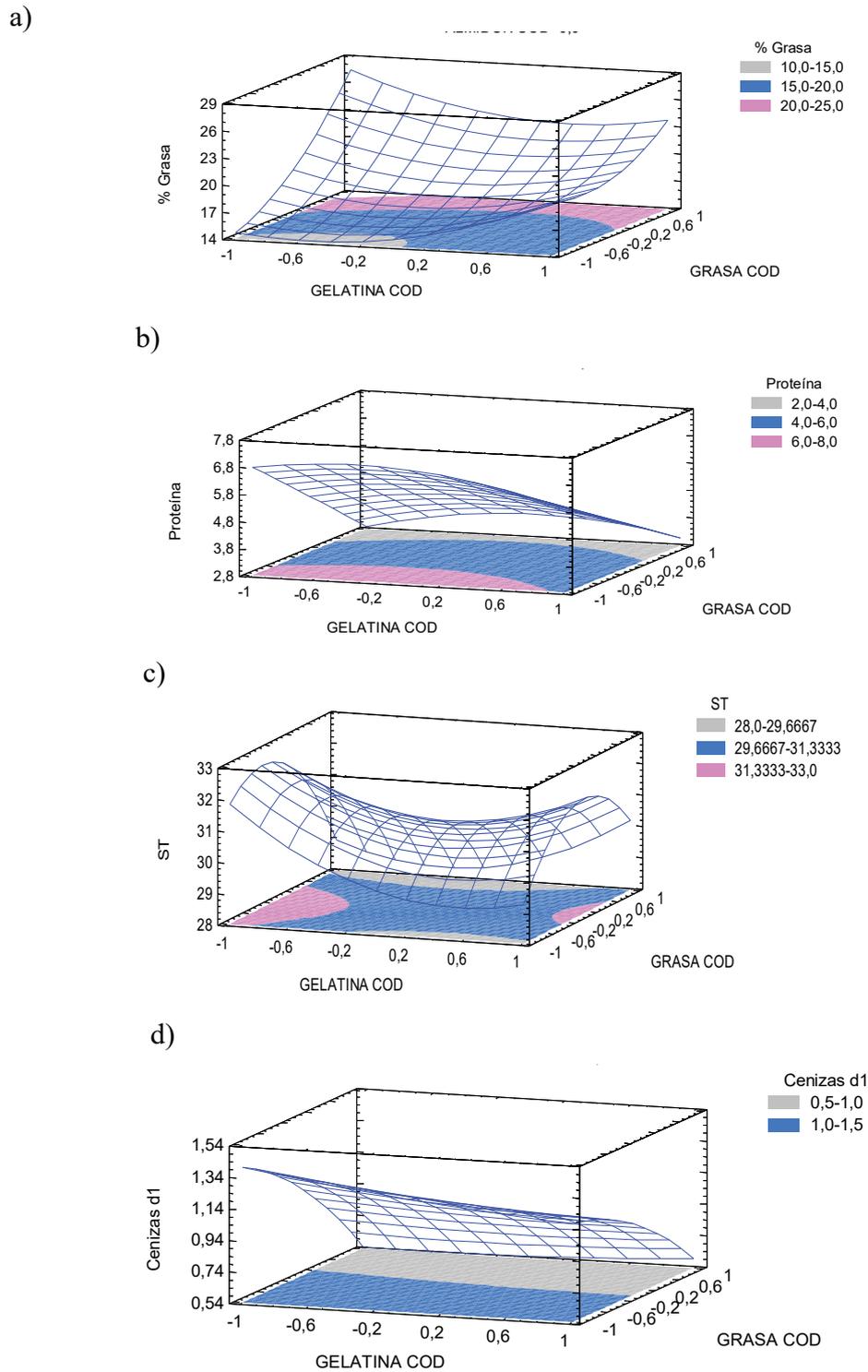


Figura 58. Gráficos de superficie de respuesta para el % de grasa (a) % de proteína (b) % de sólidos totales c) y % de cenizas d).

Como se observa en las Gráficos de superficie de respuesta (Figura 58) y al igual como se presenta en los modelos predictivos obtenidos, en el caso del porcentaje de grasa, los resultados se asemejan a aquellos obtenidos por Brighenti et al. (2008) y Wendin et al (2000), quienes observaron que, en general, los quesos con mayor contenido de grasa, presentan un menor contenido proteico y viceversa, es decir los quesos con menos contenido de grasa tienen más proteína, como se mencionó anteriormente. En el presente estudio, para alcanzar el mismo porcentaje de sólidos en todas las formulaciones, se remplazaba la cantidad de grasa agregada con polvos lácteos como leche entera descremada, lo cual permitía incorporar un mayor contenido proteico. A su vez, el contenido de cenizas también se vio afectado, en vista de que en general el agregado de los diferentes polvos usados, cuando estos se agregan en menor cantidad, también el contenido mineral se reduce.

3.2.6 Efecto en la textura.

3.2.6.1 Efecto en la firmeza.

Los resultados experimentales obtenidos de firmeza para los días 1, 7, 14 y 21 se presentan en la Tabla 27. Asimismo, en la Tabla 28 se presentan los valores de suma de cuadrados del ANOVA correspondientes para el mismo parámetro en los diferentes días de análisis.

Como se observa en la Tabla 28, en todos los casos hubo un incremento de la firmeza luego del almacenamiento refrigerado, no obstante, se puede evidenciar que los quesos que tienen mayor contenido de grasa se mantienen más estables con respecto a la firmeza, es decir que, si bien existió un incremento de este parámetro, el mismo no es muy considerable. Lo contrario ocurrió en los productos con menor contenido de grasa, donde se evidencia un incremento en la firmeza incluso de más del 100 %, dependiendo del tratamiento.

Tabla 27 Valores promedio obtenidos para firmeza.

| .ALMIDON COD | GELATINA COD | GRASA COD | Firmeza D1 (g) | Firmeza D7 (g) | Firmeza D14 (g) | Firmeza D21 (g) |
|-------------------------|-------------------------|----------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 0 | 0 | 0 | 76 ± 5 | 108 ± 7 | 110 ± 4 | 130 ± 10 |
| 0 | 1 | 1 | 42 ± 4 | 49 ± 4 | 46 ± 3 | 46 ± 1 |
| -1 | -1 | 0 | 57 ± 3 | 90,1 ± 0,7 | 66,9 ± 0,3 | 87 ± 6 |
| 0 | -1 | -1 | 40 ± 3 | 58 ± 5 | 77,8 ± 0,7 | 80 ± 1 |
| -1 | 0 | -1 | 39 ± 1 | 57 ± 2 | 65,6 ± 0,6 | 69 ± 4 |
| 1 | 0 | 1 | 22 ± 2 | 26 ± 4 | 24 ± 1 | 24 ± 2 |
| 0 | -1 | 1 | 13,8 ± 0,4 | 15,6 ± 0,2 | 16 ± 1 | 16 ± 1 |
| 1 | 1 | 0 | 114 ± 4 | 156 ± 3 | 160 ± 10 | 166 ± 2 |
| -1 | 1 | 0 | 74 ± 6 | 104 ± 2 | 114 ± 4 | 126 ± 6 |
| 0 | 1 | -1 | 72 ± 7 | 90 ± 4 | 114 ± 7 | 122 ± 7 |
| 1 | 0 | -1 | 48 ± 1 | 80 ± 2 | 93 ± 4 | 105 ± 2 |
| -1 | 0 | 1 | 28 ± 3 | 32,7 ± 0,3 | 33 ± 3 | 36,5 ± 0,3 |
| 0 | 0 | 0 | 35 ± 1 | 46 ± 4 | 56 ± 1 | 61 ± 2 |
| 1 | -1 | 0 | 44 ± 1 | 72 ± 4 | 85 ± 6 | 94 ± 3 |
| 0 | 0 | 0 | 35 ± 1 | 46 ± 4 | 56 ± 1 | 61 ± 2 |

Tabla 28 Análisis de varianza de los modelos obtenidos para firmeza.

| Fuente | G.L | Firmeza D1 | Firmeza D7 | Firmeza D14 | Firmeza D21 |
|---|------------|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|
| A:ALMIDON COD | 1 | 356,76*** | 911,67*** | 1977,27*** | 1596*** |
| B:GELATINA COD | 1 | 8264,47*** | 9356,23*** | 11795,5*** | 10615,3*** |
| C:GRASA COD | 1 | 3236,91*** | 9178,58*** | 20398,2*** | 20974,3*** |
| AA | 1 | 1411,87*** | 5595,87*** | 3196,15*** | 4791,19*** |
| AB | 1 | 2122,89*** | 3657,42*** | 688,069*** | 623,721*** |
| AC | 1 | 161,759 | 640,941*** | 1040,26*** | 1711,1*** |
| BB | 1 | 3963*** | 7657,6*** | 7684,94*** | 8072,05*** |
| BC | 1 | 8,36336 | 0,683947 | 32,8948 | 126,172 |
| CC | 1 | 3918,22*** | 8958,12*** | 7751,08*** | 9044,21*** |
| Error puro | 32 | 1284,78 | 1902,84 | 1626,41 | 1626,41 |
| Coefficiente de determinación (R ²) | | 92,6 | 95,2 | 94,1 | 96,3 |

G.L: grados de libertad; *p≤0,05; **p≤0,01; *** p≤0,001, valores sin * no presentan diferencias significativas.

El modelo obtenido para la firmeza en el día 1 logró explicar el 92,6 % de variabilidad de los datos. Para la firmeza al día 7 el modelo logró explicar el 95,2% de variabilidad de los datos. En el caso de la firmeza al día 14 el modelo logró explicar el 94,1 % de variabilidad de los datos. En el día 21 el modelo logró explicar el 96,3 % de variabilidad de los datos.

A continuación, se presentan los modelos reducidos obtenidos para los valores de firmeza en todos los días de estudio:

$$\text{Firmeza D1} = 41,875 + 3,8555xA + 18,5567xB - 11,6134xC + 11,2898xA^2 + 13,3007xAxB + 18,9148xB^2 - 18,8077xC^2$$

$$\text{Firmeza D7} = 55,1891 + 6,16329xA + 20,7081xB - 20,5106xC + 23,0888xA^2 + 17,4581xAxB - 7,30833xAxC + 27,0673xB^2 - 29,2201xC^2$$

$$\text{Firmeza D15} = 63,5186 + 9,3254xA + 22,7768xB - 29,1535xC + 17,2029xA^2 + 7,98186xAxB - 9,31067xAxC + 26,6752xB^2 - 26,7898xC^2$$

$$\text{Firmeza D21} = 66,8785 + 8,37958xA + 22,8467xB - 31,4873xC + 22,0257xA^2 + 7,60183xAxB - 11,9412xAxC + 28,4426xB^2 - 30,2617xC^2$$

Como se observa en los modelos obtenidos y a su vez en los diagramas de Pareto (Figura 59), en los 21 días de análisis se observa un efecto de las tres variables estudiadas, en el caso del día 1 y 7, la gelatina es la variable lineal que más influye significativamente sobre la firmeza, seguido del porcentaje de grasa y finalmente el almidón, mientras que al día 14 y 21 la variable que más influye estadísticamente sobre la firmeza es el porcentaje de grasa seguido del porcentaje de gelatina y por último el porcentaje de almidón. Del análisis comparativo de los términos lineales, la grasa es la única que influye de manera indirecta sobre la firmeza, es decir, a medida que el porcentaje de grasa aumenta, la firmeza disminuye. Esto se debe a que la grasa otorga cremosidad y untuosidad en los sistemas donde se agrega.

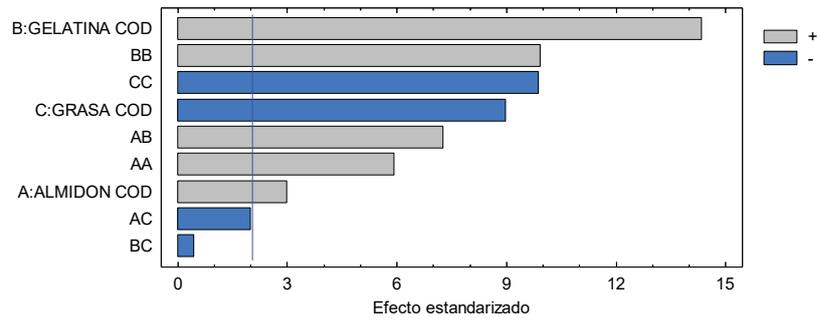
Por otra parte, la gelatina y el almidón incrementan la firmeza a medida que estos dos factores aumentan, dentro del rango experimental.

A la semana de almacenamiento la influencia de la grasa fue similar a la de la gelatina, siendo muy superior a partir de los 15 días (tiempo medio de vida útil).

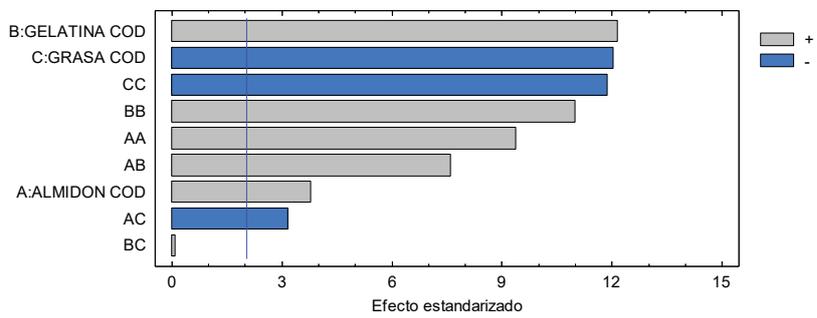
En ninguno de los días de análisis, la interacción entre la gelatina y la grasa fue significativa sobre esta respuesta ($p > 0.05$), mientras que todos los términos cuadráticos fueron significativos.

En el día 1, la gelatina presentó un efecto 4,8 veces superior al del almidón y 1,6 veces mayor que el de la grasa. En el día 7, los coeficientes de gelatina y grasa fueron prácticamente equivalentes, con una diferencia inferior al 1% (20,71 vs. 20,51), aunque ambos superaron al almidón por un factor de más de 3. A partir del día 15, la grasa se posicionó como la variable dominante, con una influencia 3.1 veces mayor que el almidón y 1,3 veces más que la gelatina; tendencia que se mantuvo en el día 21, donde la grasa superó al almidón en 3,8 veces y a la gelatina en 1,4 veces. Estos resultados sugieren que, mientras la gelatina desempeña un papel crucial en la firmeza inicial del sistema, la grasa se convierte en el factor principal a medida que el producto envejece, posiblemente por efectos acumulativos sobre la estructura de la matriz alimentaria. El almidón, aunque relevante, mostró una influencia menor y más estable en todos los tiempos evaluados.

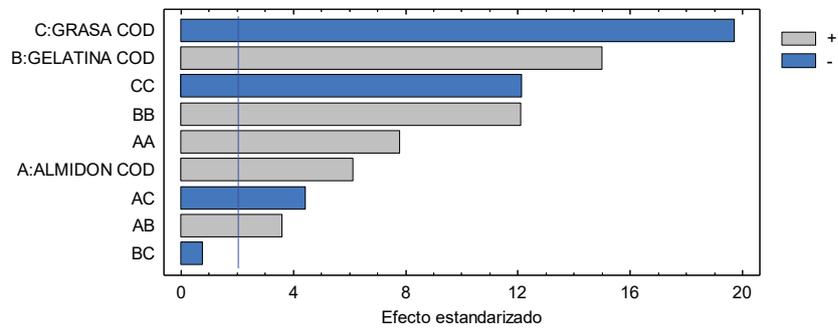
a)



b)



c)



d)

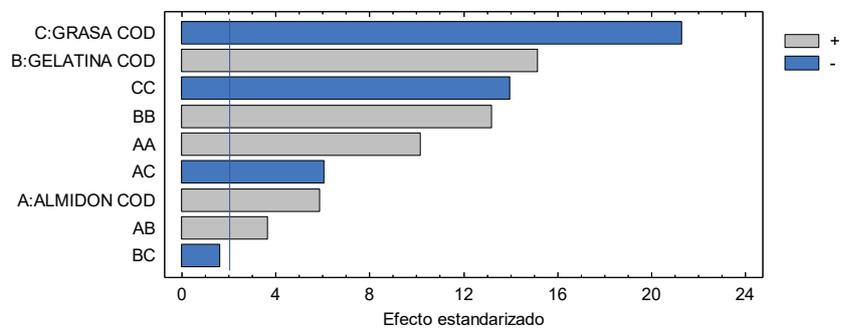


Figura 59. Diagramas de Pareto estandarizado para firmeza al día 1 (a), día 7 (b), día 14 (c) y día 21 (d)

a)

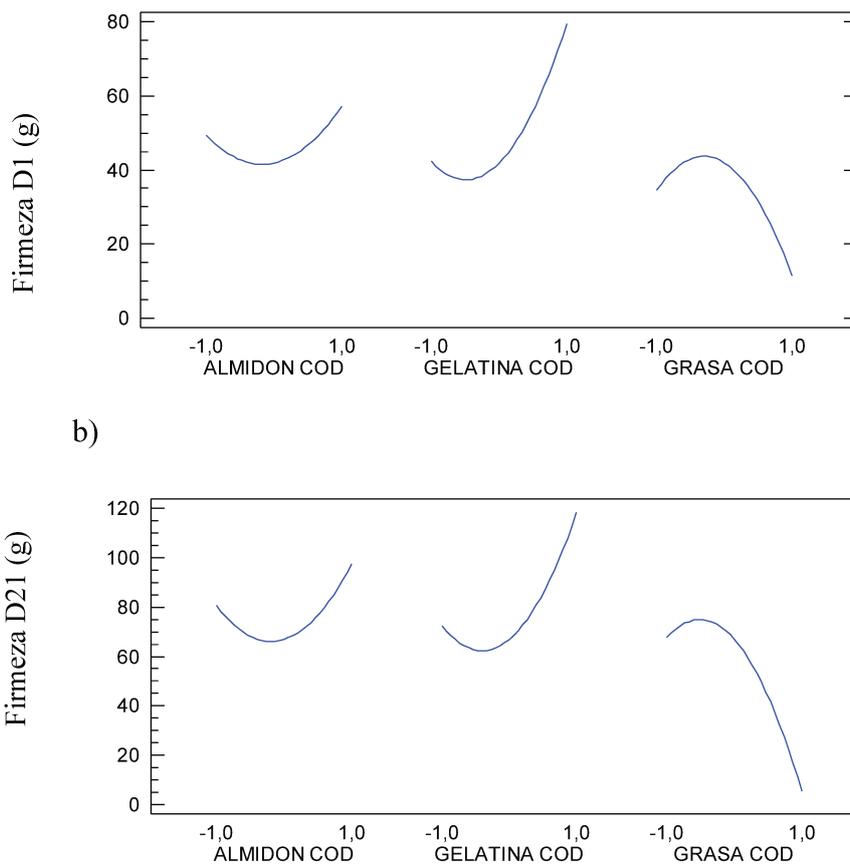
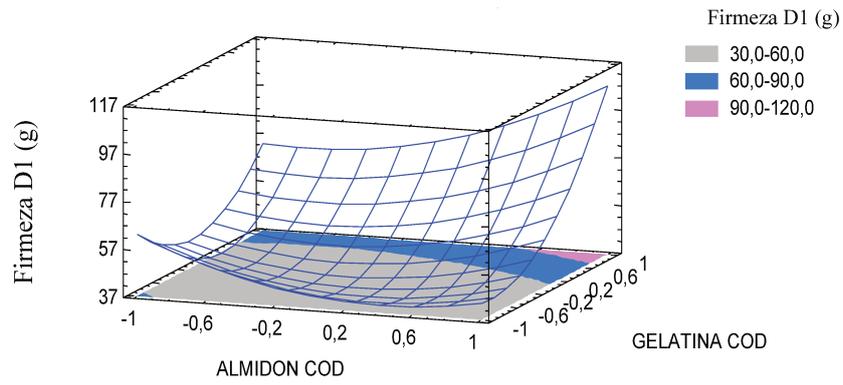


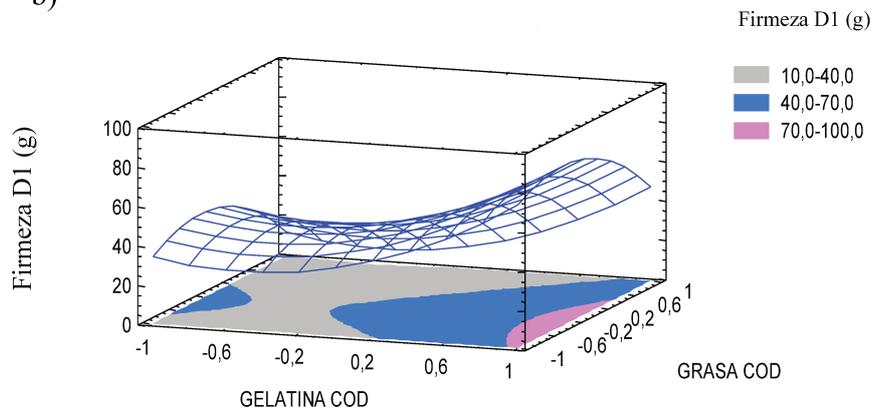
Figura 60. Gráficos de efectos principales para firmeza al día 1 (a) y día 21 (b), para quesos untables elaborados con lactosuero.

Como se observa en los gráficos de efectos principales, y como se mencionó anteriormente, se observó el mismo comportamiento de las variables en estudio tanto en el día 1 de estudio como en el día 21. Tanto el contenido de gelatina como de almidón incrementan la firmeza, en bastante mayor medida la gelatina, mientras que el porcentaje de grasa disminuye la firmeza, cuando esta variable se incrementa.

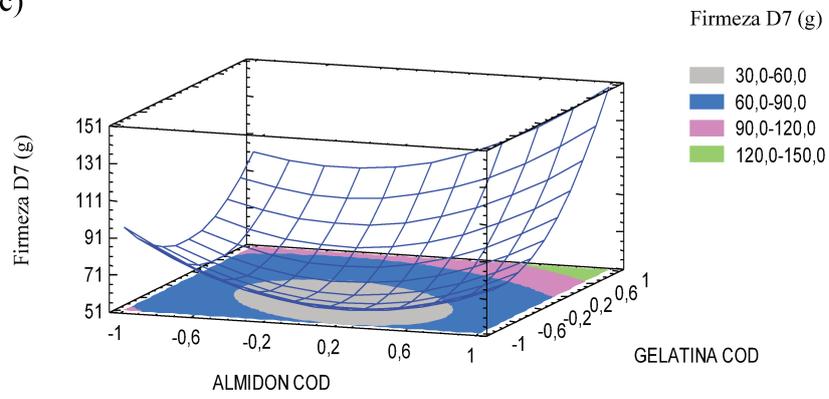
a)



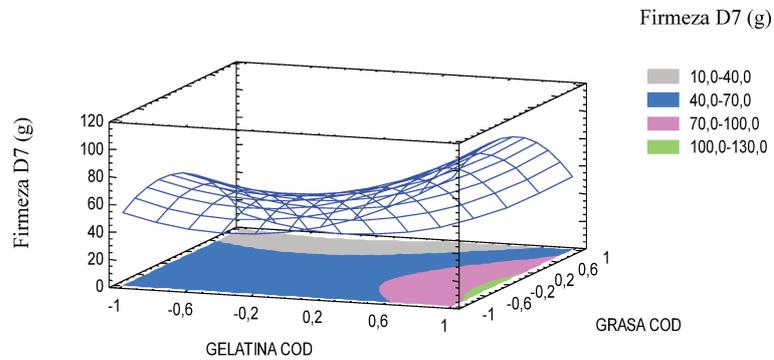
b)

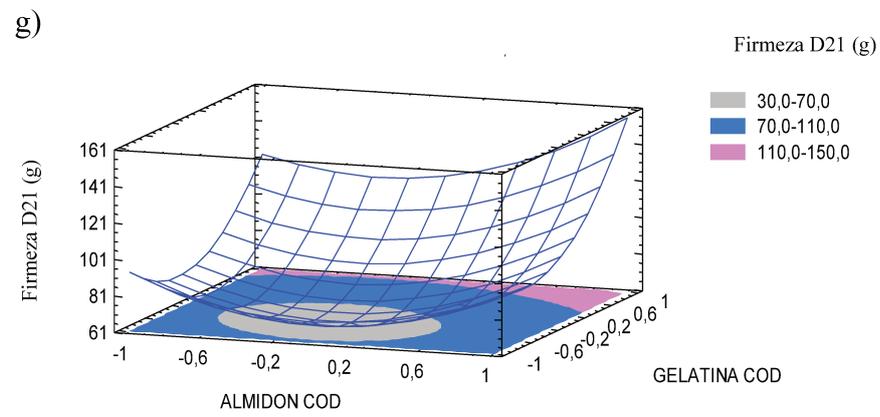
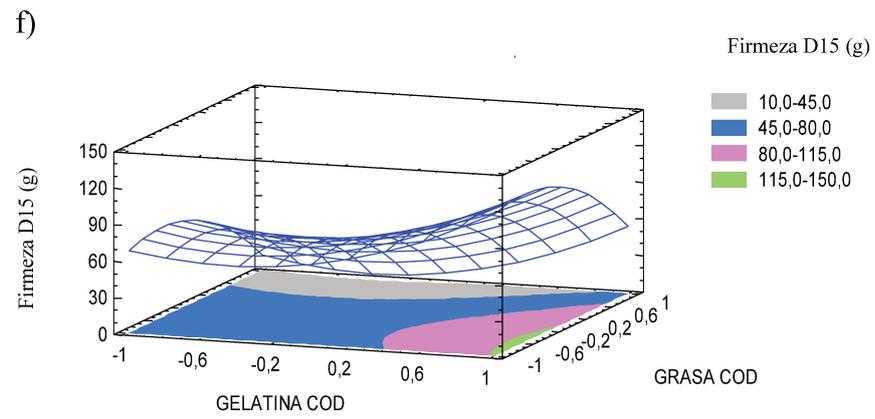
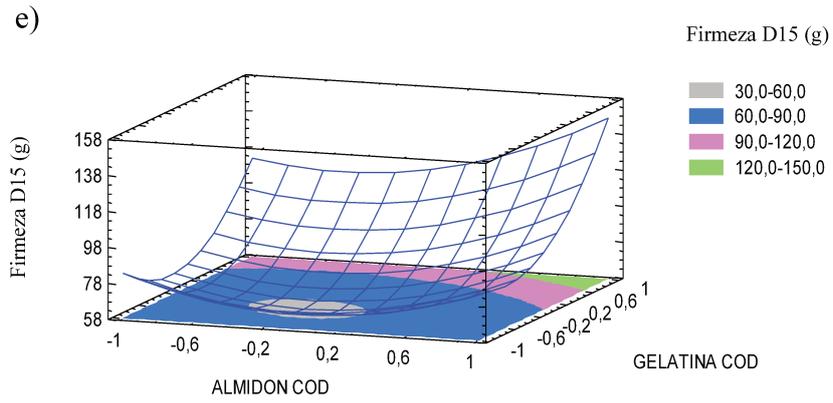


c)



d)





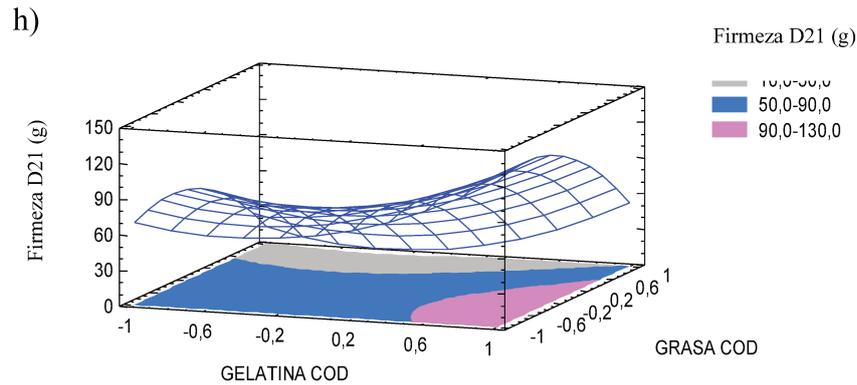


Figura 61. Gráficos de superficie de respuesta estimada para los valores de firmeza en función del contenido de almidón y gelatina en el día 1 a), 7 c), 14 e) y 21 g) y en función del contenido de grasa y gelatina en el día 1 b) y 7 d), 14 f) y 21 h).

Como se observa en los gráficos de superficie de respuesta, la firmeza cuando es influenciada por el almidón y la gelatina (Figura 61 a, c, e y g), en los diferentes días de análisis, presentó un efecto similar, tal como se explicó anteriormente, observándose que ha medida que incremente el contenido de almidón y gelatina, la firmeza incrementa, observándose valores en 13 y 114 g aproximadamente. Esta tendencia fue reportada por Delmonte et al., (2022), donde se evidenció en términos generales un ligero incremento de la firmeza por acción del almidón y la gelatina. En el caso de la influencia de la gelatina y la grasa (Figura 61 b, d, f y h), es la grasa el factor más influyente en este parámetro de estudio. Chatziantoniou et al. (2015), también reportaron que cuanto más alto es el contenido de grasa, los valores de firmeza son más bajos en quesos untables. Bayarri et al. (2012), reportó también una reducción de la firmeza por efecto del contenido de grasa en aumento, lo cual lo relaciona a que existe un menor contenido de proteínas estructurales en la matriz. Brighenti et al. (2008), reportaron que la firmeza de un queso con mucha grasa o con poca grasa es dependiente de la marca, por ende, de la formulación, y sus características fisicoquímicas.

3.2.6.2 Efecto en la cohesividad.

Los resultados experimentales obtenidos de cohesividad para los días 1, 7, 14 y 21 se presentan en la Tabla 29. En la Tabla 30 se presentan los valores de suma de cuadrados del ANOVA correspondientes para el mismo parámetro en los diferentes días de análisis.

Como se observa en la Tabla 29, los tratamientos que presentaron una menor variación en el tiempo en el parámetro cohesividad fueron aquellos que presentaron mayor contenido de grasa.

Para esta respuesta, valores negativos significan que, mientras más negativo es el valor, la muestra es más cohesiva.

Esta propiedad textural mide la resistencia interna de un queso cuando es sometido a una deformación, es decir, refleja cómo las partículas dentro del queso permanecen unidas bajo presión/cizallamiento, siendo influenciada por su composición química y estructura interna (Bayarri et al., 2012).

Se observó que, generalmente, la cohesividad se incrementó con el tiempo de almacenamiento. Este comportamiento fue menos notorio al final del mismo.

Tabla 29 Valores promedio de cohesividad.

| ALMIDON COD | GELATINA COD | GRASA COD | Cohesividad D1 (g) | | | Cohesividad D7 (g) | | | Cohesividad D14 (g) | | | Cohesividad D21 (g) | | |
|----------------|-----------------|--------------|--------------------------|---|-----|-----------------------|---|-----|---------------------------|---|-----|---------------------------|---|-----|
| 0 | 0 | 0 | -57 | ± | 3 | -73 | ± | 5 | -71 | ± | 7 | -80,00 | ± | 10 |
| 0 | 1 | 1 | -27,0 | ± | 0,4 | -28 | ± | 3 | -26 | ± | 1 | -26 | ± | 1 |
| -1 | -1 | 0 | -47 | ± | 1 | -60 | ± | 3 | -56,4 | ± | 0,0 | -60 | ± | 4 |
| 0 | -1 | -1 | -34 | ± | 2 | -40 | ± | 3 | -49,7 | ± | 0,5 | -49 | ± | 2 |
| -1 | 0 | -1 | -29 | ± | 2 | -37 | ± | 1 | -39 | ± | 2 | -49,7 | ± | 0,2 |
| 1 | 0 | 1 | -13 | ± | 2 | -14 | ± | 3 | -11 | ± | 1 | -12 | ± | 1 |
| 0 | -1 | 1 | -8 | ± | 1 | -11,3 | ± | 0,3 | -11 | ± | 2 | -11 | ± | 1 |
| 1 | 1 | 0 | -76 | ± | 4 | -92 | ± | 3 | -93 | ± | 3 | -99,0 | ± | 0,4 |
| -1 | 1 | 0 | -45 | ± | 3 | -54,2 | ± | 0,2 | -63 | ± | 2 | -64 | ± | 2 |
| 0 | 1 | -1 | -50 | ± | 4 | -59 | ± | 1 | -67 | ± | 5 | -73 | ± | 2 |
| 1 | 0 | -1 | -32,6 | ± | 0,4 | -48 | ± | 2 | -54 | ± | 4 | -57 | ± | 1 |
| -1 | 0 | 1 | -18,1 | ± | 0,4 | -20 | ± | 1 | -22 | ± | 3 | -20 | ± | 2 |
| 0 | 0 | 0 | -21 | ± | 1 | -31 | ± | 1 | -36 | ± | 1 | -40 | ± | 0,5 |
| 1 | -1 | 0 | -35 | ± | 2 | -46 | ± | 4 | -55 | ± | 1 | -57 | ± | 4 |
| 0 | 0 | 0 | -21 | ± | 1 | -31 | ± | 1 | -36 | ± | 1 | -39 | ± | 1 |

Tabla 31 Análisis de varianza de los modelos obtenidos para cohesividad.

| Fuente | G.L | Cohesividad D1 | Cohesividad D7 | Cohesividad D14 | Cohesividad D21 |
|---|------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|
| A:ALMIDON COD | 1 | 112,02 | 296,891*** | 344,42*** | 338,036*** |
| B:GELATINA COD | 1 | 2026,63*** | 1893,4*** | 2045,13*** | 2207,75*** |
| C:GRASA COD | 1 | 2282,22*** | 4179,35*** | 7438,25*** | 8435,3*** |
| AA | 1 | 616,12*** | 1598,28*** | 1280,34*** | 1308,73*** |
| AB | 1 | 1402,4*** | 1975,23*** | 792,437*** | 829,761*** |
| AC | 1 | 53,9752 | 208,458*** | 507,78*** | 163,135*** |
| BB | 1 | 2088,32*** | 3114,45*** | 3451,12*** | 2667,55*** |
| BC | 1 | 7,38058 | 2,28111 | 2,9403 | 64,5592*** |
| CC | 1 | 2038,03*** | 2766*** | 3476,6*** | 3334,78*** |
| Error puro | 142 | 1542,29 | 296,121 | 281,836 | 253,003 |
| Coefficiente de determinación (R ²) | | 85,8 | 97,4 | 96,8 | 96,7 |

G.L: grados de libertad; *p ≤ 0,05; **p ≤ 0,01; *** p ≤ 0,001, valores sín * no presentan diferencias significativas.

El modelo obtenido para la cohesividad para el día 1 logró explicar el 85,83 % de variabilidad de los datos. Para la cohesividad al día 7 el modelo logró explicar el 97,35 % de variabilidad de los datos. En el caso de la cohesividad al día 14 el modelo logró explicar el 96,8 % de variabilidad de los datos. En el día 21 el modelo logró explicar el 96,7 % de variabilidad de los datos.

A continuación, se presentan los modelos reducidos obtenidos para los valores de cohesividad en todos los días de estudio:

$$\text{Cohesividad D1} = -29,3552 - 2,16042xA - 9,18929xB + 9,75154xC - 7,45801xA^2 - 10,8105xAxB - 13,7306xB^2 + 13,5642xC^2$$

$$\text{Cohesividad D7} = -33,509 - 3,51717xA - 9,31562xB + 13,8403xC - 12,4024xA^2 - 12,8298xAxB + 4,16792xAxC - 17,1962xB^2 + 16,3004xC^2$$

$$\text{Cohesividad D14} = -38,5386 - 3,89207xA - 9,48407xB + 17,6047xC - 10,8881xA^2 - 8,56585xAxB + 6,505xAxC - 17,8759xB^2 + 17,9418xC^2$$

$$\text{Cohesividad D21} = -41,731 - 3,85645xA - 10,4192xB + 19,7617xC - 11,5115xA^2 - 8,76798xAxB + 3,68708xAxC - 16,3506xB^2 + 2,56427xBxC + 18,3756xC^2$$

Como se observa en los modelos predictivos reducidos obtenidos, que coinciden con los diagramas de Pareto (Figura 62), en todos los días de análisis la variable que más influyó sobre la cohesividad de los quesos untables es el contenido de grasa, siendo este efecto positivo, es decir mientras más grasa tiene la muestra, menos cohesivo es el queso, tal cual se observa en la Figura 63 (gráficos de efectos principales) y en las superficies de respuesta de la Figura 64.

Seguido, se encuentra la gelatina y el almidón, cuando se habla de términos lineales. En estos dos últimos casos, el efecto es negativo, es decir que mientras más gelatina y almidón tiene el queso, este será más cohesivo. En los modelos predictivos obtenidos para la variable cohesividad durante el almacenamiento, la grasa mostró un efecto creciente y dominante a medida que avanzó el tiempo, desplazando progresivamente a la gelatina como variable de mayor influencia. En el día 1, la grasa fue 4,5 veces más influyente que el almidón y solo 1,06 veces más que la gelatina, evidenciando una participación conjunta de ambas en la estructura cohesiva inicial. En el día 7, la grasa superó al almidón por un factor de 3,9 y a la gelatina por 1,5. Esta tendencia se intensificó en el día 14, donde la

grasa fue 4,5 veces más relevante que el almidón y 1,85 veces más que la gelatina. Finalmente, en el día 21, la grasa tuvo un impacto 5,1 veces superior al del almidón y 1,9 veces mayor que el de la gelatina. En todos los casos, el almidón mostró la menor contribución relativa. Estos resultados indican que, si bien la gelatina desempeña un rol importante en la cohesividad inicial del sistema, es la grasa la que adquiere mayor protagonismo conforme avanza el tiempo de almacenamiento, lo cual podría asociarse a su capacidad de modificar la matriz interna mediante la reorganización de fases o interacciones hidrofóbicas, afectando directamente la integridad estructural del producto. Según Chiang et al. (2023), la cohesividad de quesos análogos incrementó de forma lineal al aumentar la concentración de almidón resistente, reflejando un refuerzo de la matriz y una mejor retención de agua. Asimismo, Martin-Diana et al. (2023), observaron que la cohesividad en un queso untable puede incrementar a medida que el contenido de grasa aumenta, volviéndolo más cohesivo y con mayor lubricación.

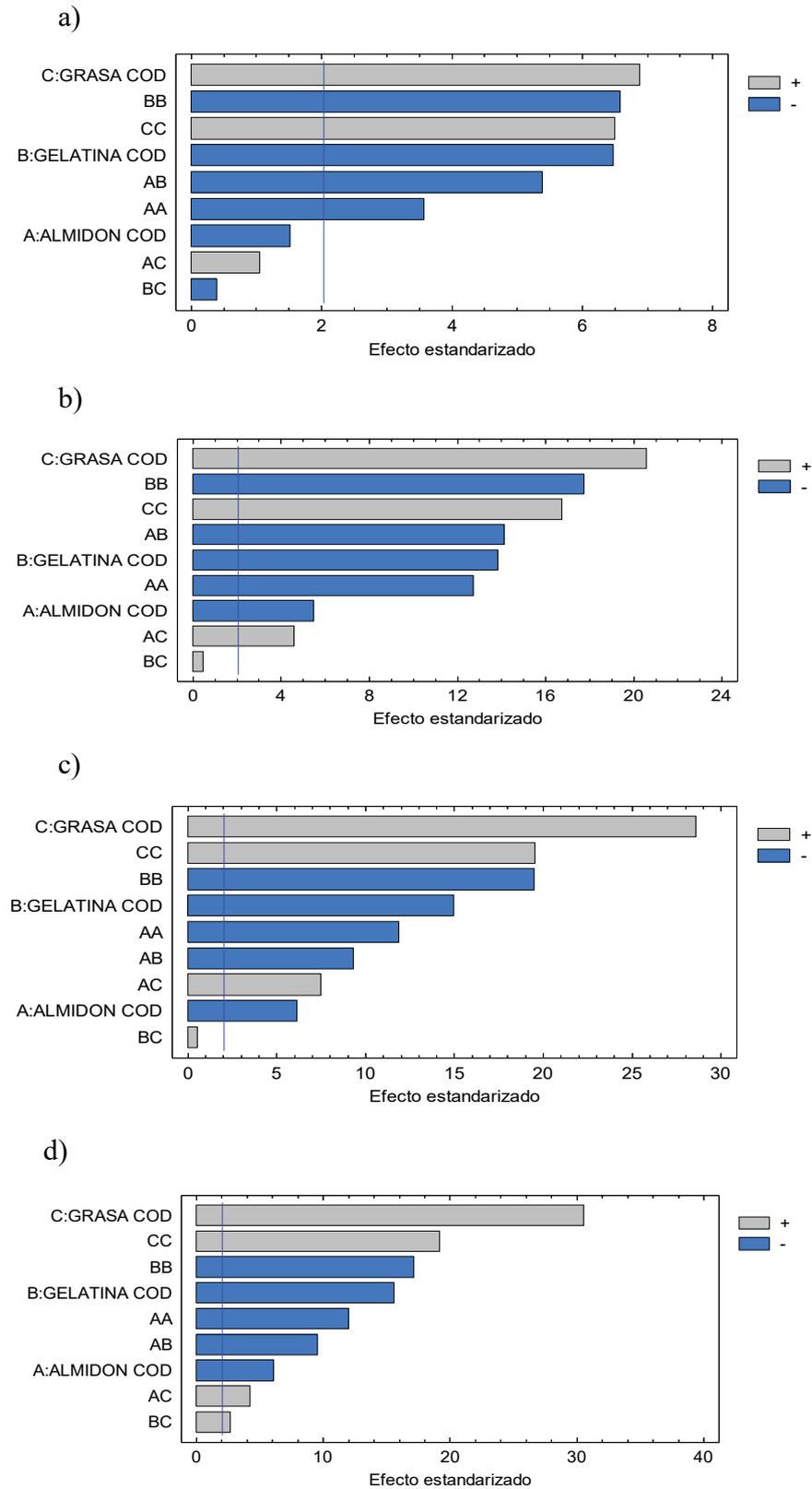


Figura 62. Diagramas de Pareto estandarizado para cohesividad al día 1 (a), día 7 (b), día 14 (c) y día 21 (d)

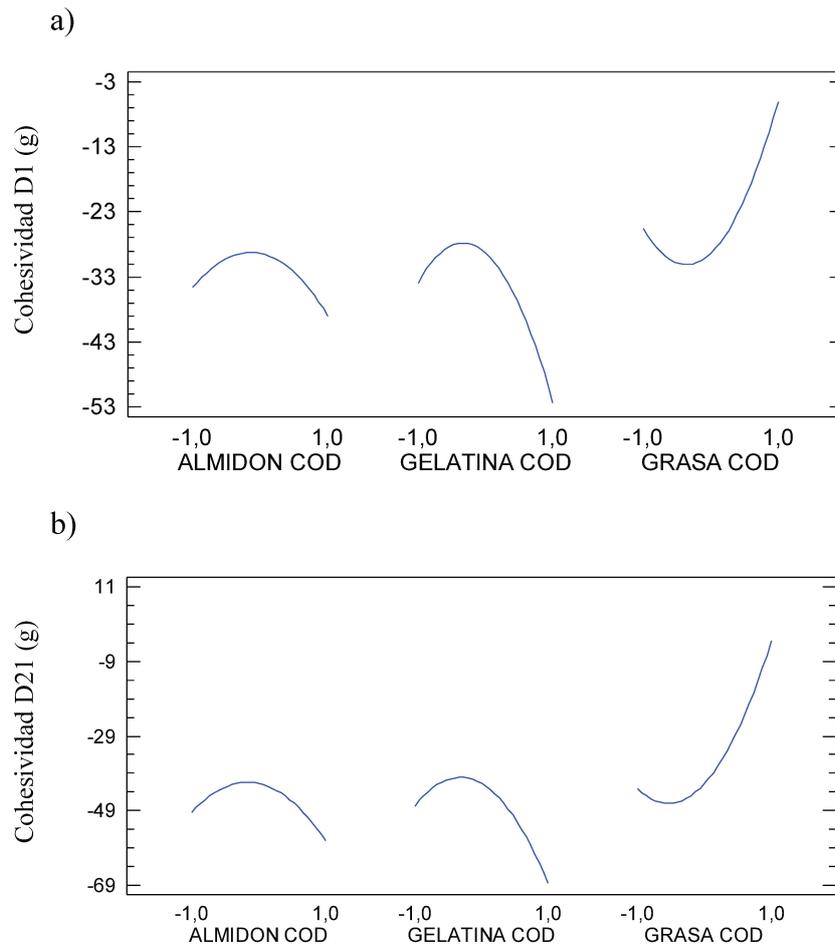
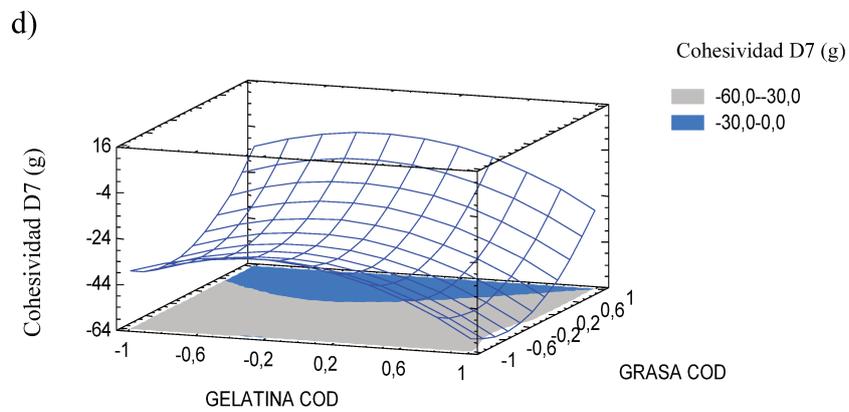
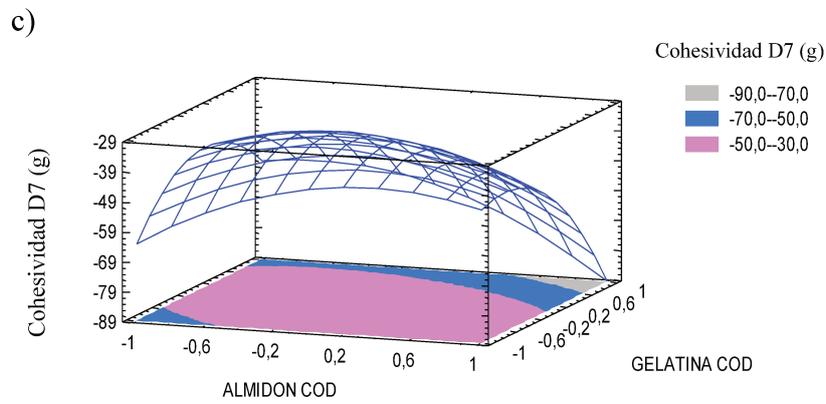
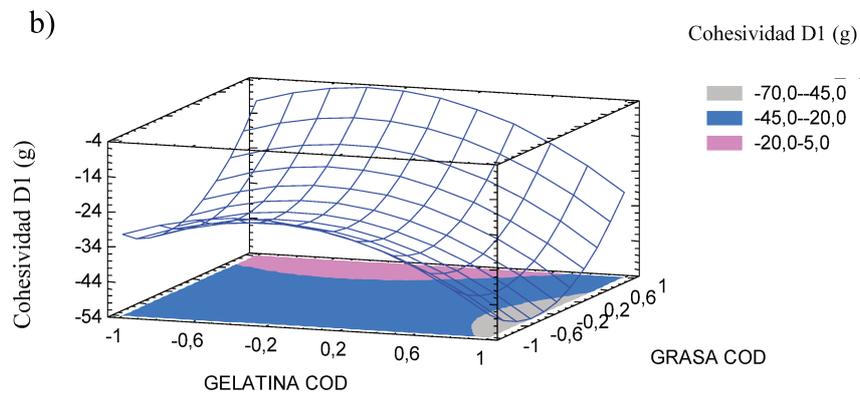
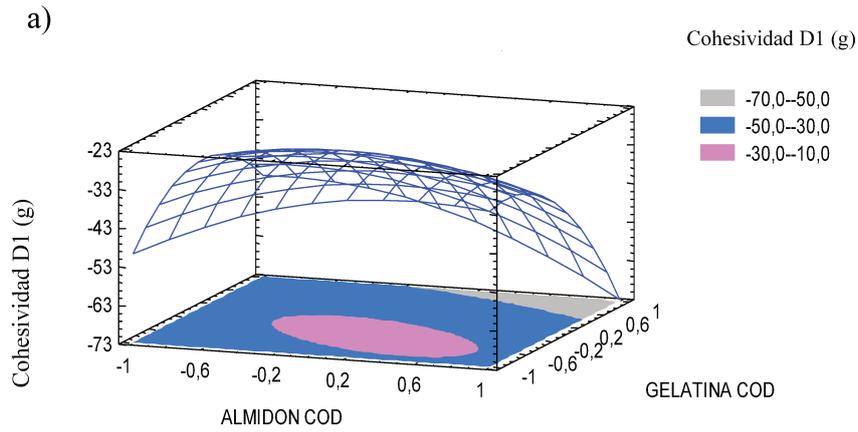


Figura 63. Gráficos de efectos principales para cohesividad al día 1 (a) y día 21 (b).

Como se mencionó previamente, el contenido de grasa genera una disminución en la cohesividad de los quesos untables, mientras que la gelatina y el almidón vuelven a los quesos untables más cohesivos. Un efecto similar se observó durante los diferentes días de análisis durante el almacenamiento refrigerado (Figura 63).



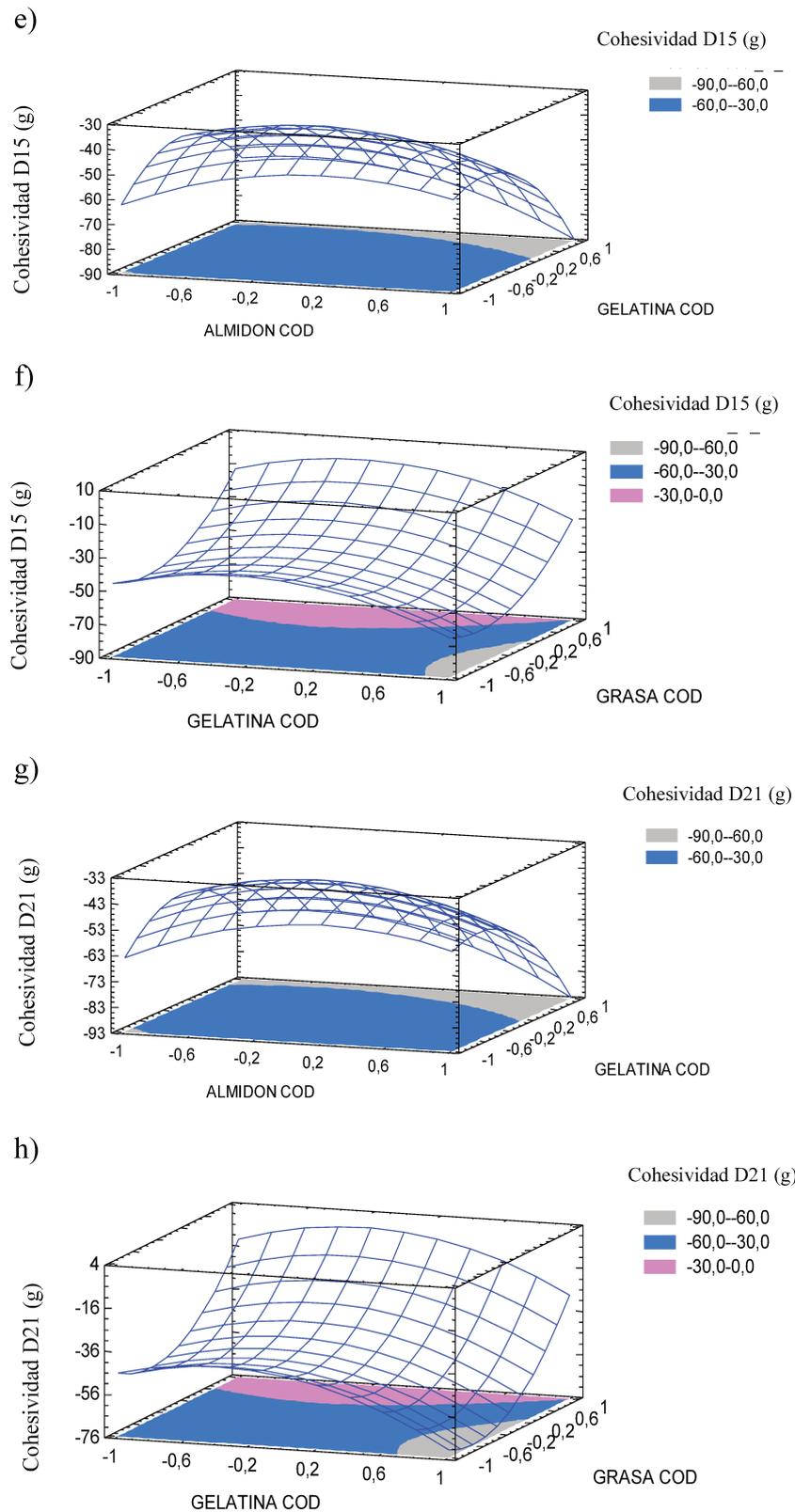


Figura 64. Gráficos de superficie de respuesta estimada para los valores de cohesividad en función del contenido de almidón y gelatina en el día 1 a), 7 c), 14 e) y 21 g) y en función del contenido de grasa y gelatina en el día 1 b) y 7 d), 14 f) y 21 h).

Como se observa en la Figura 64, cuando se analiza el efecto de la concentración de gelatina sobre la cohesividad y en concordancia con los modelos predictivos obtenidos, la gelatina tiene una mayor influencia que el almidón en este parámetro. Esta afirmación concuerda con los resultados obtenidos por Rubel et al. (2019), quienes estudiaron en ricotta untable que con gelatina muestran mayores valores de cohesividad, en comparación con los formulados con almidón.

3.2.6.1 Efecto en la consistencia.

Los resultados experimentales obtenidos de consistencia para los días 1, 7, 14 y 21 se presentan en la Tabla 31, mientras que en la Tabla 32 se muestran los valores de suma de cuadrados del ANOVA correspondientes para el mismo parámetro en los diferentes días de análisis.

Como se observa en la Tabla 31, generalmente no existe una estabilidad en la consistencia de los quesos untables desarrollados. Se evidencia que, según el tratamiento, puede haber un incremento en la consistencia de más del 100 % inclusive, cuando las concentraciones de almidón son elevadas. Por su parte, se puede observar también y, al igual que lo ocurrido con los parámetros de firmeza y cohesividad, que las muestras con mayor contenido de grasa presentan una mayor estabilidad durante los 21 días de almacenamiento refrigerado.

Asimismo, como se observa en el Tabla 32, el análisis de varianza mostró que en los cuatro días de análisis todos los términos de los modelos fueron significativos ($p < 0,05$), a excepción de la interacción entre gelatina y grasa (BC).

Tabla 32 Valores promedio obtenidos de consistencia.

| ALMIDON COD | GELATINA COD | GRASA COD | Consistencia D1 (g.s) | | Consistencia D7 (g.s) | | Consistencia D14 (g.s) | | Consistencia D21 (g.s) | |
|------------------------|-------------------------|----------------------|----------------------------------|-------|----------------------------------|-------|---------------------------------------|-------|---------------------------------------|-------|
| 0 | 0 | 0 | 1770 | ± 90 | 2600 | ± 150 | 2600 | ± 90 | 3000 | ± 300 |
| 0 | 1 | 1 | 880 | ± 20 | 1040 | ± 50 | 1030 | ± 50 | 1050 | ± 40 |
| -1 | -1 | 0 | 1270 | ± 70 | 2010 | ± 40 | 1757 | ± 3 | 2000 | ± 100 |
| 0 | -1 | -1 | 910 | ± 40 | 1300 | ± 100 | 1800 | ± 10 | 1800 | ± 50 |
| -1 | 0 | -1 | 850 | ± 30 | 1300 | ± 40 | 1520 | ± 10 | 1650 | ± 60 |
| 1 | 0 | 1 | 440 | ± 30 | 480 | ± 80 | 470 | ± 20 | 460 | ± 50 |
| 0 | -1 | 1 | 300 | ± 20 | 356 | ± 3 | 350 | ± 30 | 360 | ± 20 |
| 1 | 1 | 0 | 2600 | ± 60 | 3520 | ± 60 | 3600 | ± 100 | 3890 | ± 40 |
| -1 | 1 | 0 | 1700 | ± 150 | 2400 | ± 40 | 2660 | ± 90 | 2940 | ± 80 |
| 0 | 1 | -1 | 1600 | ± 100 | 2100 | ± 80 | 2600 | ± 100 | 2800 | ± 100 |
| 1 | 0 | -1 | 1070 | ± 30 | 1800 | ± 40 | 2130 | ± 40 | 2420 | ± 50 |
| -1 | 0 | 1 | 590 | ± 30 | 680 | ± 30 | 690 | ± 30 | 740 | ± 20 |
| 0 | 0 | 0 | 770 | ± 20 | 1100 | ± 60 | 1260 | ± 10 | 1400 | ± 40 |
| 1 | -1 | 0 | 1000 | ± 10 | 1600 | ± 100 | 1960 | ± 90 | 2170 | ± 80 |
| 0 | 0 | 0 | 770 | ± 10 | 1100,10 | ± 60 | 1260 | ± 10 | 1390 | ± 30 |

Tabla 34 Análisis de varianza de los modelos obtenidos para consistencia.

| Fuente | G.L | Consistencia D1 | Consistencia D7 | Consistencia D14 | Consistencia D21 |
|---|-----|-----------------|-----------------|------------------|------------------|
| A:ALMIDON COD | 1 | 188315*** | 348110*** | 1045980*** | 857723*** |
| B:GELATINA COD | 1 | 3958750*** | 4938040*** | 6232460*** | 6226920*** |
| C:GRASA COD | 1 | 1771540*** | 5399490*** | 11556800*** | 12396900*** |
| AA | 1 | 778607*** | 2695850*** | 1637040*** | 2542430*** |
| AB | 1 | 1035500*** | 1825110*** | 249923*** | 309975*** |
| AC | 1 | 106879** | 350646*** | 507853*** | 782684*** |
| BB | 1 | 2134140*** | 4127020*** | 4229240*** | 4628570*** |
| BC | 1 | 4626,08 | 6141,42 | 17560,3 | 91125,7 |
| CC | 1 | 2401640*** | 5242760*** | 4314750*** | 5170730*** |
| Error puro | 142 | 604287 | 703986 | 722061 | 663967 |
| Coefficiente de determinación (R ²) | | 92,6 | 96,4 | 94,2 | 96,6 |

G.L: grados de libertad; * $p \leq 0,05$; ** $p \leq 0,01$; *** $p \leq 0,001$, valores sin * no presentan diferencias significativas.

El modelo obtenido para la consistencia para el día 1 logró explicar el 92,6 % de variabilidad de los datos. Para la consistencia al día 7 el modelo logró explicar el 96,4 % de variabilidad de los datos. En el caso de la consistencia al día 14 el modelo logró explicar el 94,2 % de variabilidad de los datos. En el día 21 el modelo 96,6 % de variabilidad de los datos.

A continuación, se presentan los modelos reducidos obtenidos para los valores de consistencia en todos los días de estudio:

$$\text{Consistencia D1} = 938,268 + 88,5803xA + 406,138xB - 271,688xC + 265,124xA^2 + 293,755xAxB - 94,3748xAxC + 438,936xB^2 - 465,634xC^2$$

$$\text{Consistencia D7} = 1271,23 + 120,435xA + 475,738xB - 497,47xC + 509,891xA^2 + 389,99xAxB - 170,94xAxC + 625,223xB^2 - 710,068xC^2$$

$$\text{Consistencia D14} = 1444,79 + 214,485xA + 523,558xB - 693,927xC + 389,329xA^2 + 152,122xAxB - 205,721xAxC + 625,776xB^2 - 632,071xC^2$$

$$\text{Consistencia D21} = 1536,65 + 194,258xA + 553,344xB - 757,582xC + 507,379xA^2 + 169,467xAxB - 255,389xAxC + 681,084xB^2 - 96,3396xBxC - 723,576xC^2$$

Como se observa en los modelos predictivos mostrados y conforme a los diagramas de Pareto obtenidos (Figura 65), el contenido de gelatina tiene mayor influencia que el contenido de grasa y almidón sobre la consistencia al día 1. En todos los días de análisis se observó que tanto la gelatina como el almidón tienen un efecto positivo (directo) sobre la consistencia de los quesos untables, es decir, a medida que estos hidrocoloides se incrementan, la consistencia también en mayor. Por el contrario, el contenido de grasa presentó un efecto negativo, es decir que a medida que ésta se incrementa, la consistencia de los quesos untables es menor. Sin embargo, en los días 7, 14 y 21 de almacenamiento refrigerado, se observó que el contenido de grasa es la variable que más influyó sobre la consistencia, seguido de la gelatina y posteriormente del almidón. En el día 1, la gelatina fue la variable de mayor influencia, con un efecto 4,6 veces superior al del almidón y 1,5 veces mayor que el de la grasa. En el día 7, la grasa superó al almidón por un factor de 4,1, pero la diferencia con la gelatina fue marginal (grasa apenas 1,05 veces mayor). A partir del día 14, la grasa se convirtió en la variable predominante, con una influencia 3,2 veces mayor que el almidón y 1,33 veces superior a la gelatina. Esta tendencia se acentuó en el día 21, donde la grasa mostró un efecto 3,9 veces mayor que el almidón y 1,37 veces

más que la gelatina. En todos los modelos, el almidón presentó la menor contribución relativa. Además, se observó que generalmente la consistencia aumentó con el tiempo de almacenamiento.

Estos resultados sugieren que la gelatina tiene un papel decisivo en la estructura inicial del sistema, aportando significativamente a la formación de una red consistente, mientras que la grasa adquiere una relevancia creciente con el tiempo, posiblemente por su efecto plastificante o por su interferencia con la matriz polimérica, que podría condicionar la firmeza estructural final del producto. Chian et al. (2023), observaron de igual manera en quesos imitados que el aumento en la concentración de almidón incrementa notablemente la consistencia, al gelatinizar y formar redes coloidales más rígidas que hacen que la consistencia de la matriz alimentaria sea mayor. Del mismo modo ocurre con el incremento en la concentración de gelatina debido a que aumenta la resistencia a la deformación (Sanprasert et al. 2025). Por otro lado, Martin-Diana et al. (2023), reportaron que, por el exceso de grasa disminuye la interacción proteína-grasa y reduce la consistencia, ablandando excesivamente la matriz.

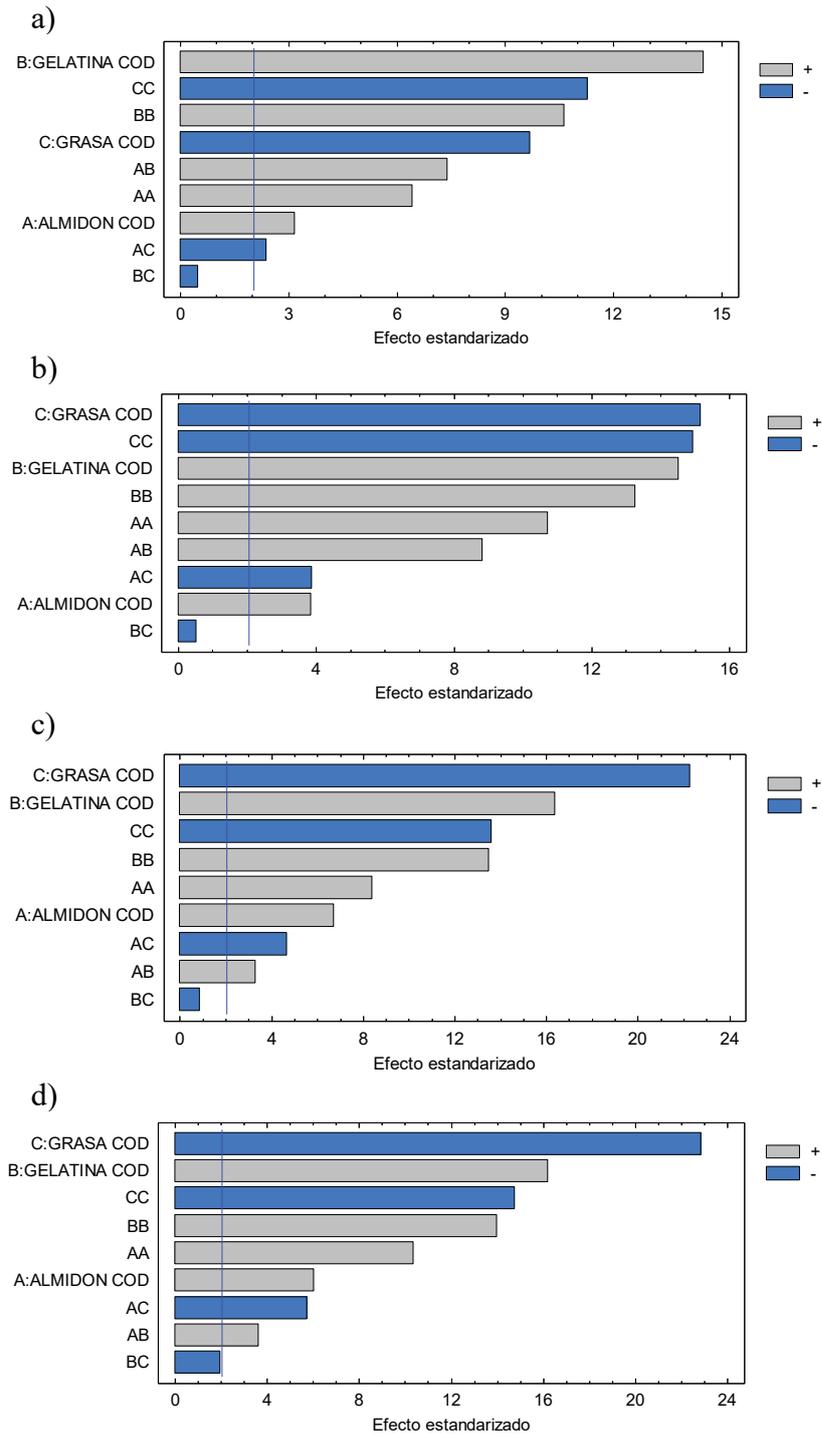


Figura 65. Diagramas de Pareto estandarizado para consistencia al día 1 (a), día 7 (b), día 14 (c) y día 21 (d).

Como se observa en la figura 66 correspondiente a los gráficos de efectos principales para el día 1 y 21, tanto el contenido de grasa como de gelatina y almidón, presentan el mismo efecto en ambos días de análisis.

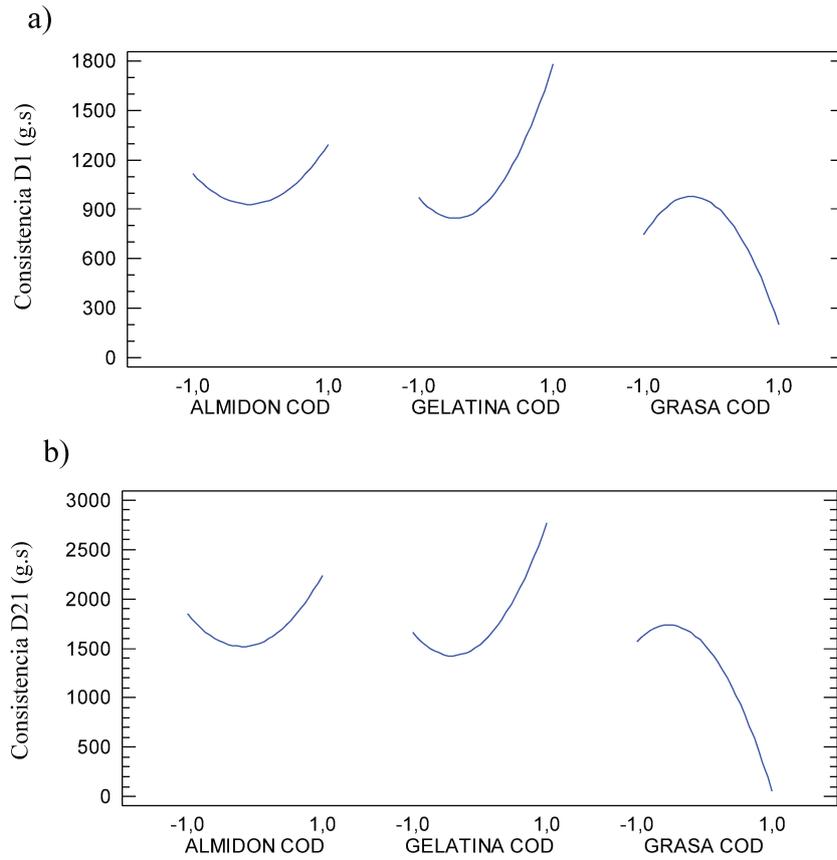
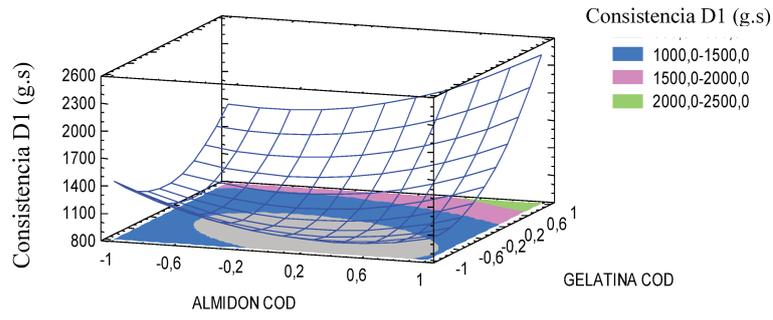
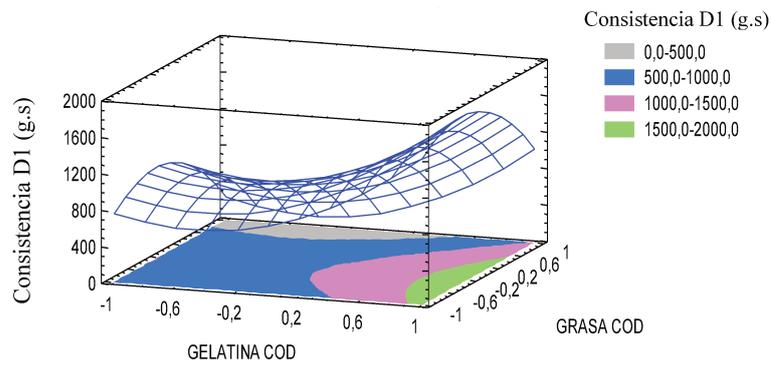


Figura 66. Gráficos de efectos principales para consistencia al día 1 (a) y día 21 (b).

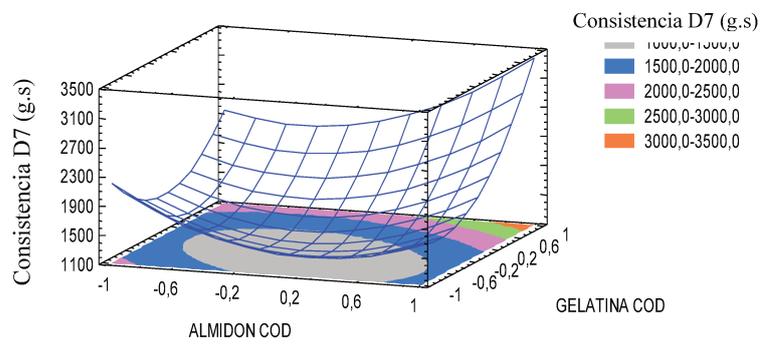
a)



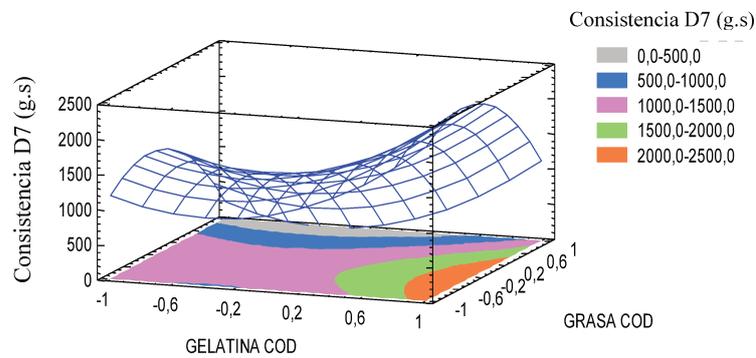
b)



c)

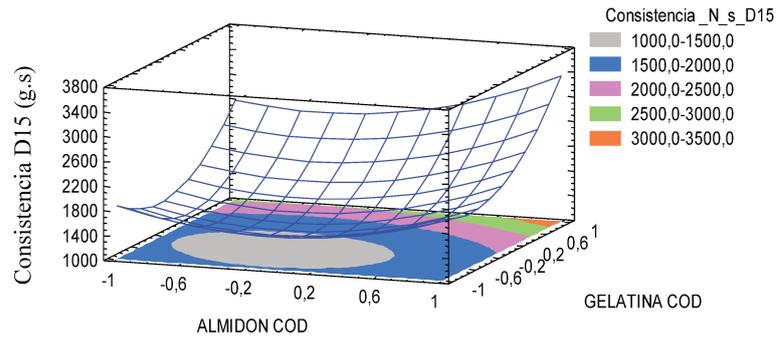


d)

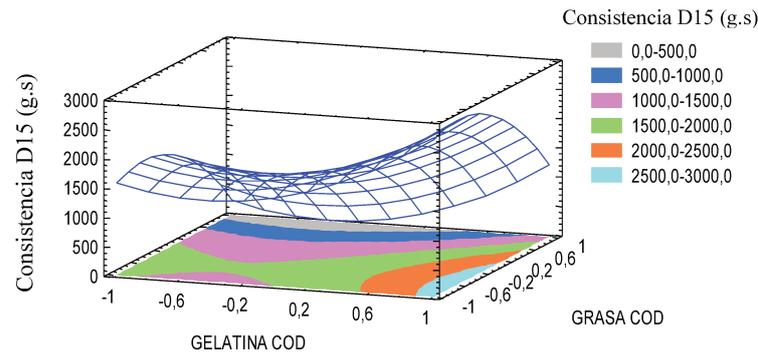


e)

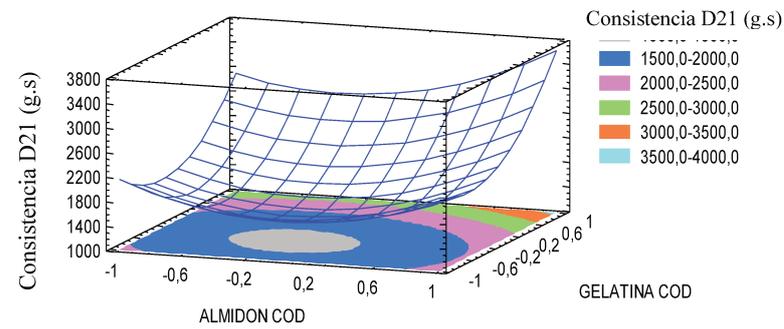
Consistencia D15 (g.s)



f)



g)



h)

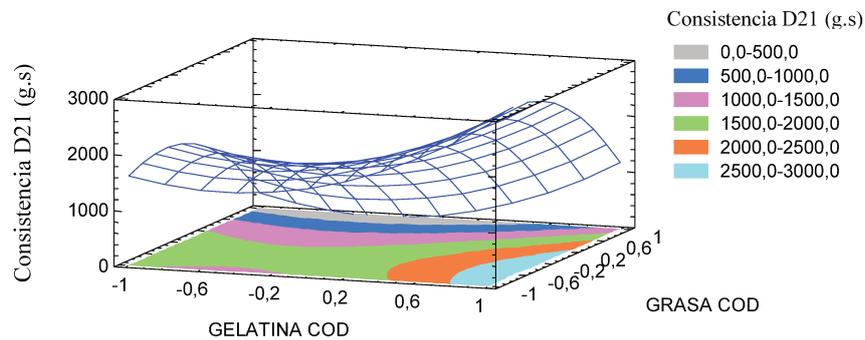


Figura 67. Gráficos de superficie de respuesta estimada para los valores de consistencia en función del contenido de almidón y gelatina en el día 1 a), 7 c), 14 e) y 21 g) y en función del contenido de grasa y gelatina en el día 1 b) y 7 d), 14 f) y 21 h).

Como se observa en los gráficos de superficie de respuesta para el estudio del efecto de la gelatina y el almidón sobre la consistencia de quesos untables (Figura 67 a, c, e, y g), en todos los días de análisis, cuando se incrementan ambas variables, la consistencia de los quesos untables también incrementa, alcanzando valores cercanos a 4000 g.s aproximadamente, en las condiciones máximas de almidón y gelatina. Estos resultados coinciden con aquellos obtenidos por Delmonte et al., (2022), los cuales se observaron resultados similares cuando se estudia únicamente estos dos hidrocoloides. Por otro lado, cuando se analiza el efecto del contenido de gelatina y grasa sobre la consistencia de los quesos untables (Figura 67 b, d, f, y h), se puede observar que también existe un incremento de hasta 3000 g.s cuando las condiciones de grasa son las más bajas y las de gelatina son altas. Como se ha mencionado, el contenido de gelatina es clave para incrementar la consistencia de este producto lácteo, lo cual ha sido también reportado por otros autores (Lopez Hiriart et al., 2022; Rubel et al., 2019; Bayarri et al., 2012).

3.2.6.1 Efecto en la adhesividad.

Los resultados experimentales obtenidos de adhesividad para los días 1, 7, 14 y 21 se presentan en la Tabla 33. Asimismo, en la Tabla 34 se presentan los valores de suma de cuadrados del ANOVA correspondientes para el mismo parámetro en los diferentes días de análisis. Valores negativos en esta respuesta significan que la muestra es más adhesiva.

En este caso, es similar al análisis hecho con la cohesividad en cuanto a que debe analizarse su valor absoluto ya que este parámetro tiene signo negativo por representar un área negativa, por debajo del eje horizontal (eje x cartesiano).

Por ende, un número más negativo (mayor valor absoluto) indica mayor adhesividad.

Tabla 35 Valores promedio y desvíos estándar obtenidos de adhesividad.

| ALMIDON COD | GELATINA COD | GRASA COD | Adhesividad D1 (g.s) | | Adhesividad D7 (g.s) | | Adhesividad D14 (g.s) | | Adhesividad D21 (g.s) | |
|----------------|-----------------|--------------|-------------------------|------|-------------------------|------|--------------------------|------|--------------------------|------|
| 0 | 0 | 0 | -128 | ± 5 | -168 | ± 4 | -170 | ± 10 | -180 | ± 20 |
| 0 | 1 | 1 | -60 | ± 2 | -58 | ± 5 | -57 | ± 3 | -55 | ± 5 |
| -1 | -1 | 0 | -105 | ± 4 | -140 | ± 3 | -123 | ± 2 | -139 | ± 6 |
| 0 | -1 | -1 | -76 | ± 4 | -95 | ± 9 | -123 | ± 3 | -121 | ± 4 |
| -1 | 0 | -1 | -69 | ± 4 | -100 | ± 4 | -94 | ± 6 | -106 | ± 3 |
| 1 | 0 | 1 | -30 | ± 4 | -30 | ± 7 | -25 | ± 2 | -26 | ± 2 |
| 0 | -1 | 1 | -20 | ± 1 | -23 | ± 1 | -23 | ± 3 | -21 | ± 1 |
| 1 | 1 | 0 | -167 | ± 3 | -210 | ± 10 | -224 | ± 7 | -236 | ± 2 |
| -1 | 1 | 0 | -100 | ± 6 | -128 | ± 1 | -146 | ± 5 | -148 | ± 7 |
| 0 | 1 | -1 | -120 | ± 10 | -154 | ± 3 | -150 | ± 10 | -158 | ± 8 |
| 1 | 0 | -1 | -81 | ± 3 | -112 | ± 6 | -120 | ± 4 | -140 | ± 9 |
| -1 | 0 | 1 | -41 | ± 2 | -43 | ± 3 | -46 | ± 3 | -42 | ± 2 |
| 0 | 0 | 0 | -54 | ± 3 | -72 | ± 4 | -75 | ± 1 | -79 | ± 1 |
| 1 | -1 | 0 | -77 | ± 1 | -100 | ± 10 | -128 | ± 1 | -140 | ± 10 |
| 0 | 0 | 0 | -54 | ± 3 | -72 | ± 4 | -75 | ± 1 | -78 | ± 2 |

Tabla 36 Análisis de varianza de los modelos obtenidos para adhesividad.

| Fuente | G.L | Adhesividad D1 | Adhesividad D7 | Adhesividad D14 | Adhesividad D21 |
|--|------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|
| A:ALMIDON COD | 1 | 617,871 | 844,812*** | 2344,03*** | 3368,55*** |
| B:GELATINA COD | 1 | 10566,9*** | 11924,1*** | 10211,2*** | 10106,4*** |
| C:GRASA COD | 1 | 14062,8*** | 31230,3*** | 41766,9*** | 48166,8*** |
| AA | 1 | 2272,56*** | 8368,58*** | 8517,5*** | 10943,9*** |
| AB | 1 | 6649,34*** | 11068,3 | 4312,32*** | 5094,21*** |
| AC | 1 | 376,914 | 473,964* | 1685,66*** | 1803,62*** |
| BB | 1 | 8336,74*** | 16365,1*** | 21198,8*** | 17750,2*** |
| BC | 1 | 0,865644 | 346,349* | 75,3855 | 26,9751 |
| CC | 1 | 9723,99*** | 13037,1*** | 18637,7*** | 17506,8*** |
| Error puro | 142 | 5822,65 | 1903,01** | 2205 | 3271,85 |
| Coefficiente de determinación (R ²) | | 88,9 | 96,8 | 94,7 | 95,3 |

G.L: grados de libertad; * $p \leq 0,05$; ** $p \leq 0,01$; *** $p \leq 0,001$, valores sín * no presentan diferencias significativas.

El modelo obtenido para la adhesividad para el día 1 logró explicar el 88,9 % de variabilidad de los datos. Para la adhesividad al día 7 el modelo logró explicar el 96,8 % de variabilidad de los datos. En el caso de la adhesividad al día 14 el modelo logró explicar el 94,7 % de variabilidad de los datos. En el día 21 el modelo logró explicar el 95,3 % de variabilidad de los datos.

A continuación, se presentan los modelos reducidos obtenidos para los valores de consistencia en todos los días de estudio:

$$\text{Adhesividad D1} = -70,6537 - 5,07392xA - 20,983xB + 24,2064xC - 14,3235xA^2 - 23,5396xAxB - 27,434xB^2 + 29,6287xC^2$$

$$\text{Adhesividad D7} = -78,3629 - 5,933xA - 23,3778xB + 37,8337xC - 28,2681xA^2 - 30,3703xAxB + 6,28467xAxC - 39,5302xB^2 + 6,0065xBxC + 35,2826xC^2$$

$$\text{Adhesividad D15} = -84,8198 - 10,1535xA - 21,1921xB + 41,7167xC - 28,083xA^2 - 19,9822xAxB + 11,8521xAxC - 44,304xB^2 + 41,5417xC^2$$

$$\text{Adhesividad D21} = -87,8049 - 12,1738xA - 22,2924xB + 47,373xC - 33,2886xA^2 - 21,7251xAxB + 12,2598xAxC - 42,1773xB^2 + 42,1029xC^2$$

El análisis de los modelos predictivos para la adhesividad a lo largo del almacenamiento revela una clara tendencia de dominancia del contenido de la grasa como principal variable determinante de la respuesta, seguida por la gelatina, mientras que el almidón mostró consistentemente la menor contribución relativa. En el día 1, la grasa presentó un efecto 4,8 veces mayor que el almidón y 1,15 veces superior al de la gelatina. Esta diferencia se intensificó en el día 7, donde la grasa superó al almidón en 6,4 veces y a la gelatina en 1,6. Para el día 15, la grasa fue 4,1 veces más influyente que el almidón y 1,97 veces más que la gelatina. Finalmente, en el día 21, la grasa ejerció un impacto 3.9 veces mayor que el almidón y 2,1 veces mayor que la gelatina. Estos resultados confirman que la grasa no solo domina la adhesividad desde el inicio, sino que incrementa progresivamente su relevancia a lo largo del tiempo de almacenamiento, lo que podría atribuirse a su efecto plastificante, favoreciendo interacciones cohesivas y adhesivas en la matriz del sistema. Zięćko-Grodzka et al. (2016), observaron en quesos procesados a medida que se incrementa el contenido de almidón, los valores de adhesividad son mayores lo cual se debe a debido a la mayor retención de agua y reforzamiento de la fase continua caseínica. Lo mismo ocurre con la gelatina al aumentar la adhesividad del queso

untable, lo cual se ha constatado con varios estudios en quesos untables emplean gelatina en combinación con otros hidrocoloides (Yusof et al., 2019). Al igual que en los resultados sobtenidos, Smith y Prakash (2021), observaron que en matrices de queso crema, el contenido graso modula la adhesividad de forma inversa: a mayor grasa, menor adhesividad instrumental, debido a que los glóbulos de grasa actúan como lubricante interno.

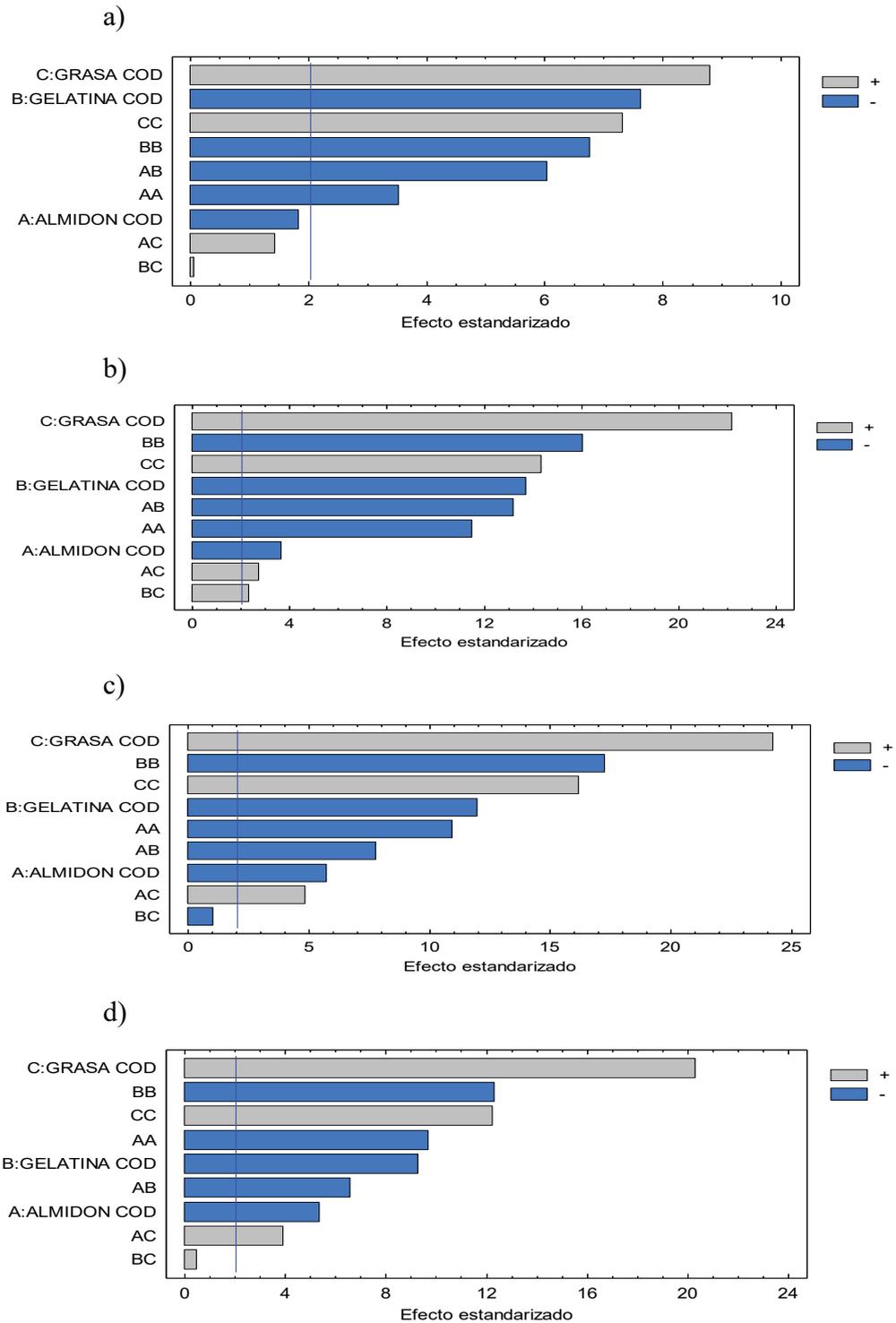


Figura 68. Diagrama de Pareto estandarizado para adhesividad al día 1 (a), día 7 (b), día 14 (c) y día 21 (d)

Al igual que los otros parámetros de textura analizados, como se observa en los diagramas de Pareto (Figura 68) y que a su vez coincide con los modelos predictivos

obtenidos, el porcentaje de grasa es la variable que más influye sobre la adhesividad, seguido de la gelatina y el almidón, cuando se observan los términos lineales. El porcentaje de grasa tiene un efecto positivo sobre la adhesividad, es decir, mientras mayor es el contenido de grasa, la muestra es menos adhesiva (menor valor absoluto de dicho parámetro). Por el contrario, la gelatina y el almidón tienen un efecto negativo, es decir, mientras mayor es el contenido de estas variables, la muestra es más adhesiva (mayor valor absoluto).

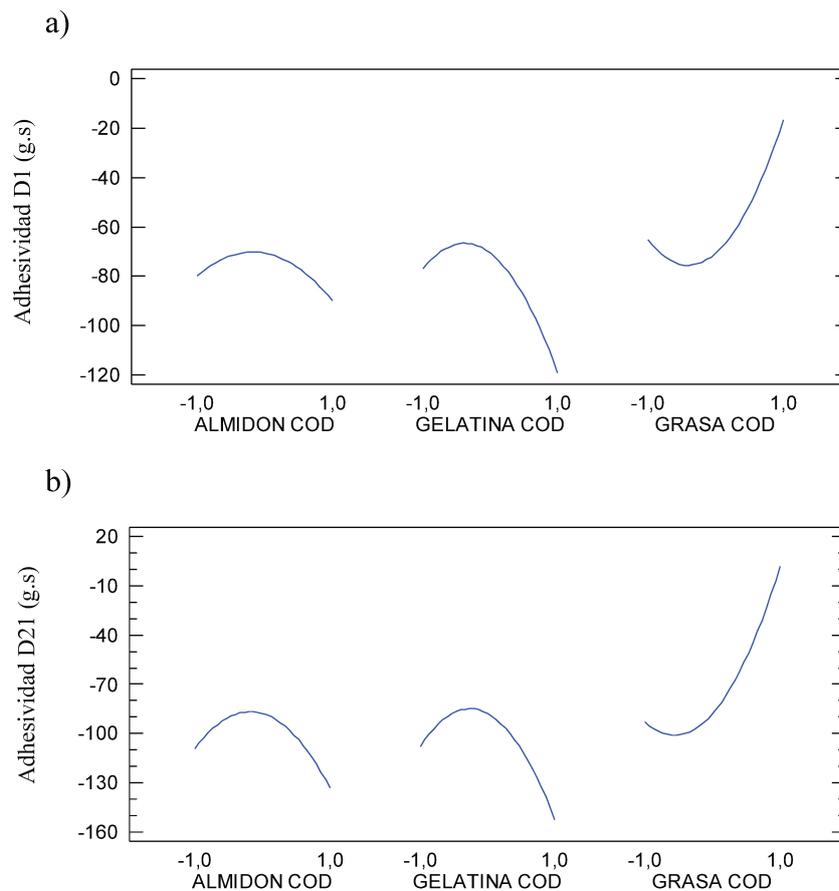
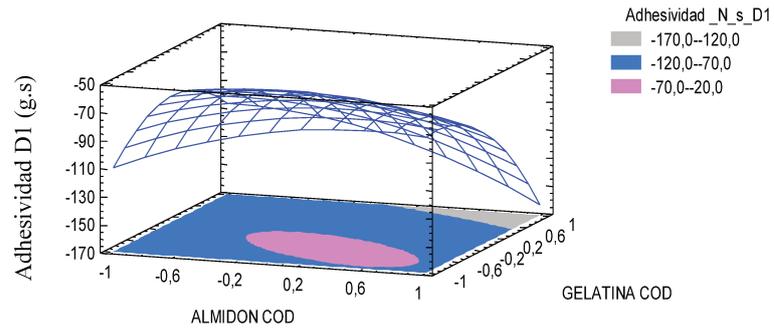


Figura 69. Gráficos de efectos principales para adhesividad al día 1 (a) y día 21 (b), para quesos untables elaborados con lactosuero.

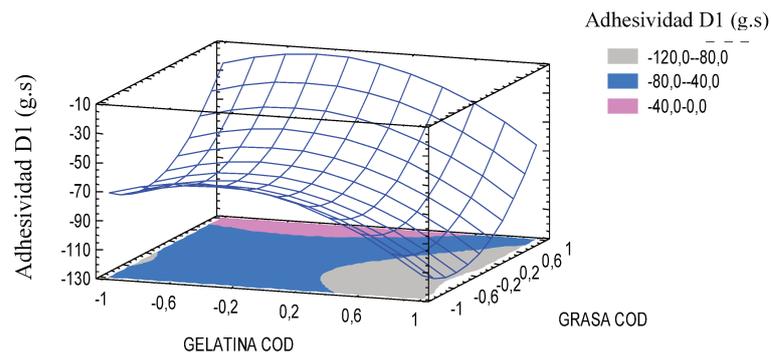
A continuación, se presentan los gráficos de superficie de respuesta para la adhesividad en función de las variables estudiadas.

a)

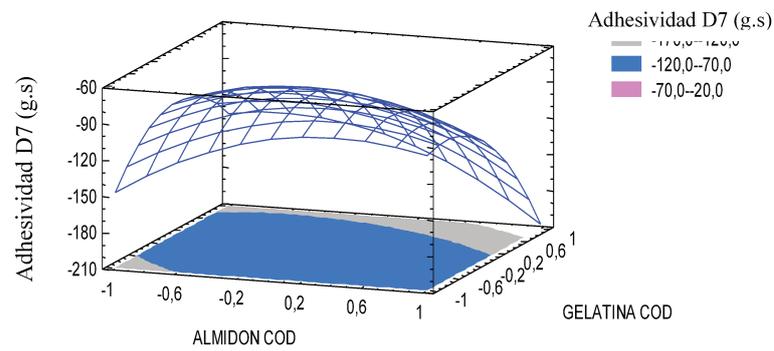
Adhesividad D1 (g.s)



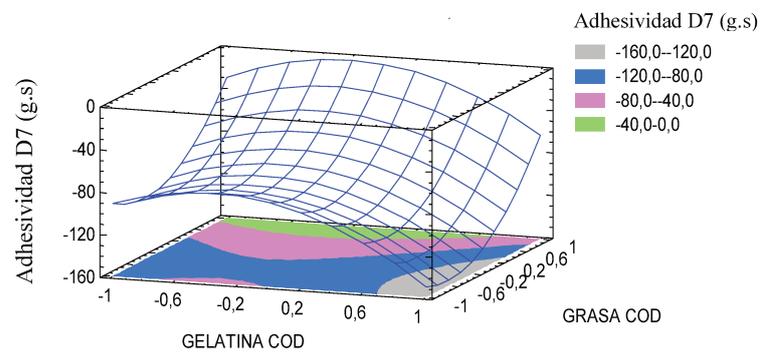
b)



c)



d)



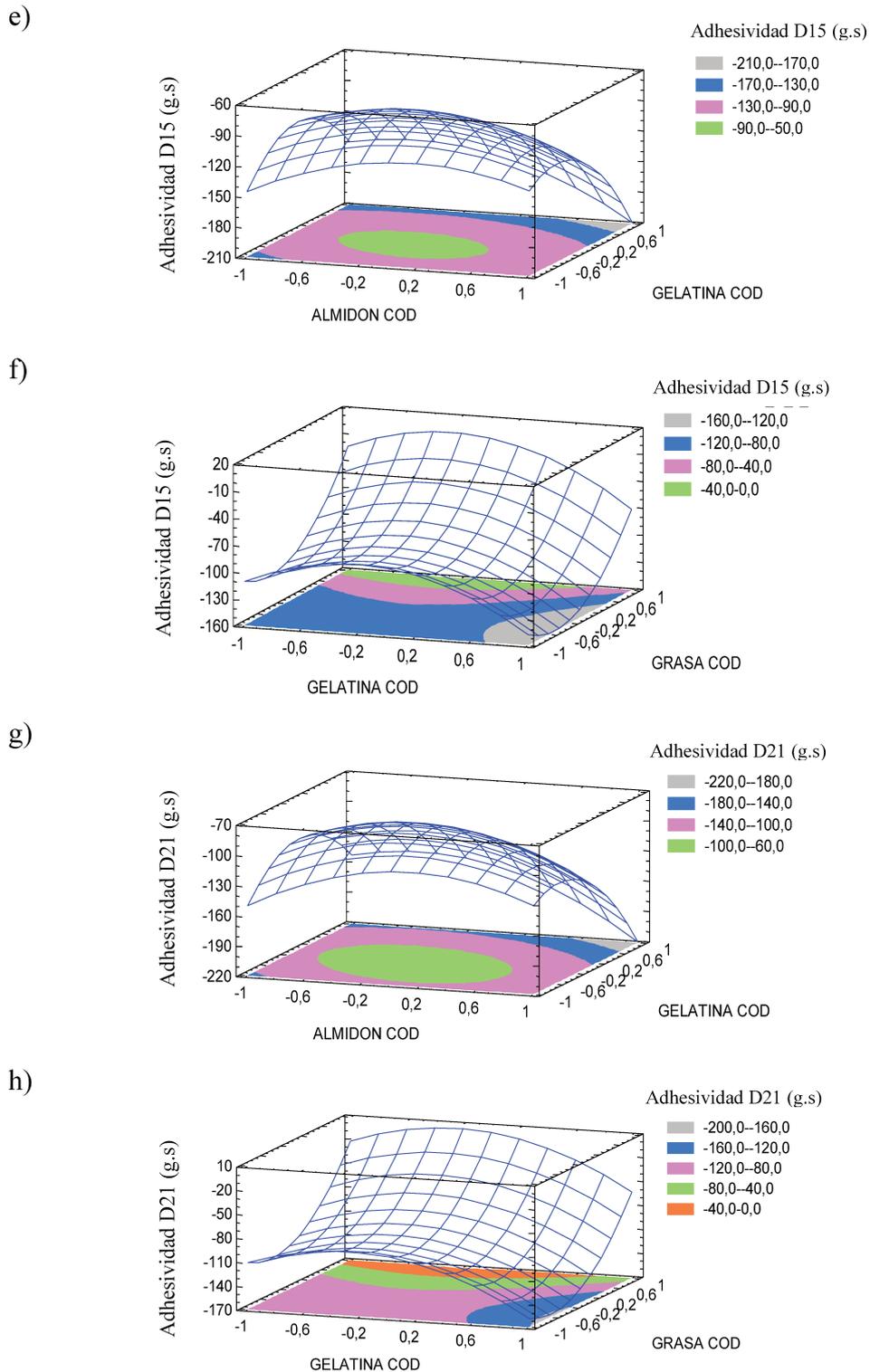


Figura 70. Gráficos de superficie de respuesta estimada para los valores de adhesividad en función del contenido de almidón y gelatina en el día 1 a), 7 c), 14 e) y 21 g) y en función del contenido de grasa y gelatina en el día 1 b) y 7 d), 14 f) y 21 h).

Hesarinejad, Lorenzo y Rafe (2021), al igual que en el presente trabajo, observaron que la gelatina aumenta la cohesividad y la adhesividad en quesos bajos en grasa,

compensando la reducción de grasa al estabilizar la matriz proteica y mejorar la textura. Además, Agudelo et al. (2015), observaron que los almidones, especialmente los modificados, reducen la adhesividad al aumentar la firmeza y reducir la untabilidad del queso. Por otro lado, Ningtyas (2019), evidenció que la grasa actúa como plastificante, reduciendo la adhesividad, pero su reducción puede requerir la adición de estabilizantes como almidón y gelatina para mantener las propiedades sensoriales.

3.2.7 Efecto en las propiedades de flujo.

3.2.7.1 Efecto en la viscosidad al día 1 de almacenamiento

Los resultados experimentales obtenidos de viscosidad al día 1 para los gradientes de deformación $50s^{-1}$, $100s^{-1}$, $150s^{-1}$ y $200s^{-1}$ se presentan en la Tabla 35. En la Tabla 36 se presentan los ANOVA correspondientes para el mismo parámetro en los diferentes días de análisis. Tal como se observa, se evidencia una disminución promedio de la viscosidad de 5,36 veces a medida que aumenta el gradiente de deformación.

.

Tabla 37 Valores promedio obtenidos de viscosidad al día 1.

| ALMIDON COD | GELATINA COD | GRASA COD | μ 50d1 (mPa.s) | μ 100d1 (mPa.s) | μ 150d1 (mPa.s) | μ 200d1 (mPa.s) |
|----------------|-----------------|--------------|-----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 0 | 0 | 0 | 4500 ± 500 | 1800 ± 200 | 1160 ± 80 | 830 ± 90 |
| 0 | 1 | 1 | 3700 ± 100 | 1400 ± 200 | 900 ± 100 | 690 ± 70 |
| -1 | -1 | 0 | 2600 ± 100 | 1120 ± 40 | 710 ± 20 | 530 ± 20 |
| 0 | -1 | -1 | 3500 ± 200 | 1320 ± 70 | 820 ± 30 | 610 ± 10 |
| -1 | 0 | -1 | 3300 ± 400 | 1200 ± 100 | 760 ± 50 | 570 ± 30 |
| 1 | 0 | 1 | 2230 ± 10 | 957 ± 7 | 594 ± 4 | 438 ± 3 |
| 0 | -1 | 1 | 988 ± 9 | 440 ± 4 | 288 ± 6 | 220 ± 6 |
| 1 | 1 | 0 | 6300 ± 300 | 2500 ± 200 | 1600 ± 100 | 1270 ± 70 |
| -1 | 1 | 0 | 4900 ± 500 | 1750 ± 20 | 1120 ± 50 | 850 ± 50 |
| 0 | 1 | -1 | 5700 ± 200 | 2120 ± 80 | 1300 ± 10 | 950 ± 10 |
| 1 | 0 | -1 | 3900 ± 300 | 1500 ± 100 | 900 ± 70 | 670 ± 40 |
| -1 | 0 | 1 | 2000 ± 200 | 870 ± 70 | 560 ± 30 | 410 ± 20 |
| 0 | 0 | 0 | 4900 ± 500 | 1750 ± 20 | 1120 ± 50 | 850 ± 50 |
| 1 | -1 | 0 | 3270 ± 90 | 1390 ± 20 | 875 ± 7 | 643 ± 4 |
| 0 | 0 | 0 | 2400 ± 400 | 1000 ± 100 | 620 ± 50 | 470 ± 30 |

Tabla 38 Análisis de varianza de los modelos obtenidos para viscosidad en el día 1.

| Fuente | G.L | μ_{50d1} | μ_{100d1} | μ_{150d1} | μ_{200d1} |
|---|-----|--------------|---------------|---------------|---------------|
| A:ALMIDON COD | 1 | 1,92E+06 | 463795* | 186691* | 108523** |
| B:GELATINA COD | 1 | 25850400*** | 3167730*** | 1304940*** | 763777*** |
| C:GRASA COD | 1 | 13649700*** | 1461710*** | 505921*** | 268872*** |
| AA | 1 | 84510,2 | 455,435 | 12,5914 | 263,369 |
| AB | 1 | 278295 | 129235 | 65250,8 | 46971,1 |
| AC | 1 | 84339,3 | 11605,3 | 5691,91 | 3357,41 |
| BB | 1 | 1,58E+06 | 2,78E+05 | 112741* | 74158,6* |
| BC | 1 | 126150 | 21877,2 | 11976,6 | 9020,06 |
| CC | 1 | 6505150*** | 1024300*** | 495755*** | 298493*** |
| Error puro | 17 | 8,67E+06 | 1,07E+06 | 4,12E+05 | 215821 |
| Coefficiente de determinación (R ²) | | 84 | 83,3 | 84,2 | 85,1 |

G.L: grados de libertad; * $p \leq 0,05$; ** $p \leq 0,01$; *** $p \leq 0,001$, valores sín * no presentan diferencias significativas.

El modelo obtenido para la $\mu 50d1$ no presentó falta de ajuste significativa ($p_{\text{falta de ajuste}} = 0,6063$) y logró explicar el 84,0% de variabilidad de los datos. Para la $\mu 100s^{-1}d1$ el modelo no presentó falta de ajuste significativa ($p_{\text{falta de ajuste}} = 0,2918$) y logró explicar el 83,3% de variabilidad de los datos. En el caso de la $\mu 150s^{-1}d1$ el modelo no presentó falta de ajuste significativa ($p_{\text{falta de ajuste}} = 0,2802$) y logró explicar el 84,17% de variabilidad de los datos. Para la $\mu 200s^{-1}d1$ el modelo tampoco presentó falta de ajuste significativa ($p_{\text{falta de ajuste}} = 0,2130$) y logró explicar el 85,14% de variabilidad de los datos.

A continuación, se presentan los modelos reducidos obtenidos para los valores de firmeza en todos los días de estudio:

$$\mu 50d1 = 4124,81 + 1271,08xB - 923,637xC - 963,933xC^2$$

$$\mu 100d1 = 1617,62 + 170,256xA + 444,953xB - 302,253xC - 385,743xC^2$$

$$\mu 150d1 = 964,68 + 108,019xA + 285,585xB - 177,82xC + 123,66xB^2 - 259,001xC^2$$

$$\mu 200d1 = 721,092 + 82,357xA + 218,486xB - 129,632xC + 99,752xB^2 - 201,509xC^2$$

Como se observa en los coeficientes de los modelos predictivos obtenidos, la gelatina es el factor que tiene mayor influencia sobre la viscosidad, seguido del contenido de grasa y luego en almidón. Sin embargo, a gradiente $50 s^{-1}$ no se observó una influencia estadística del almidón sobre la viscosidad. Pero sí cuando se analizó la viscosidad en las otras velocidades de corte. En el caso de la grasa, a diferencia del contenido de gelatina y almidón, ésta presenta un efecto negativo, es decir, a medida que el contenido lipídico aumenta en el queso, la viscosidad de este disminuye (Figura 71 y 72). Se observó, además, tanto en el gráfico de Pareto como en el ANOVA, que el término cuadrático del contenido de grasa también presentó un efecto significativo.

En los modelos predictivos obtenidos para la viscosidad a distinto gradiente de deformación en el día 1, se identificó un patrón consistente donde la gelatina mostró el mayor efecto sobre la variable respuesta en todos los niveles analizados, seguida por la grasa, mientras que el almidón presentó una influencia menor. En el modelo $\mu 50s^{-1}d1$, la gelatina fue 1,38 veces más influyente que la grasa. En $\mu 100s^{-1}d1$, el efecto de la gelatina fue 2,6 veces mayor que el del almidón y 1,47 veces superior al de la grasa. En $\mu 150d1$,

la gelatina mostró una influencia 2.6 veces mayor que el almidón y 1,6 veces superior al de la grasa. Finalmente, en $\mu 200d1$, la gelatina superó al almidón en un factor de 2,7 y a la grasa en 1,7 veces.

En todos los modelos, el almidón codificado fue la variable con menor efecto relativo. Estos resultados evidencian que la gelatina tiene un papel predominante en la resistencia estructural del sistema, posiblemente debido a su capacidad para formar redes cohesivas que incrementan la rigidez frente a la deformación mecánica, mientras que la grasa parece actuaría como un modulador secundario con efecto plastificante, y el almidón, aunque relevante, tiene una contribución comparativamente baja en esta propiedad mecánica.

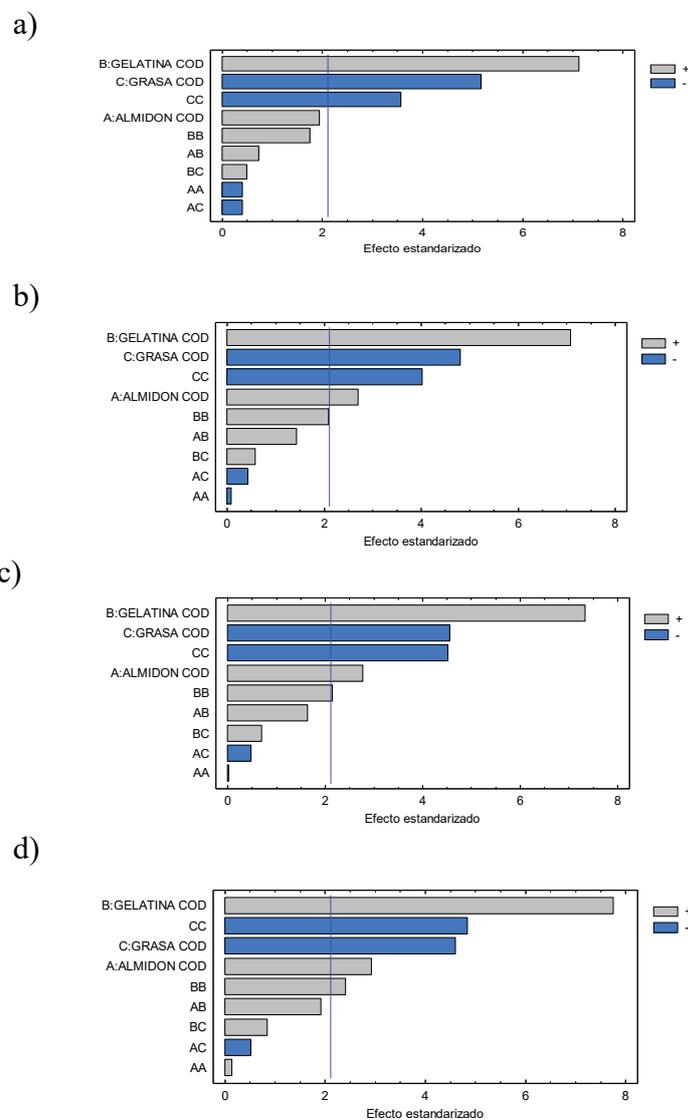


Figura 71. Diagramas de Pareto estandarizado para viscosidad al día 1 para los gradientes de deformación $50s^{-1}$ a), $100s^{-1}$ b), $150s^{-1}$ c) y $200s^{-1}$ d).

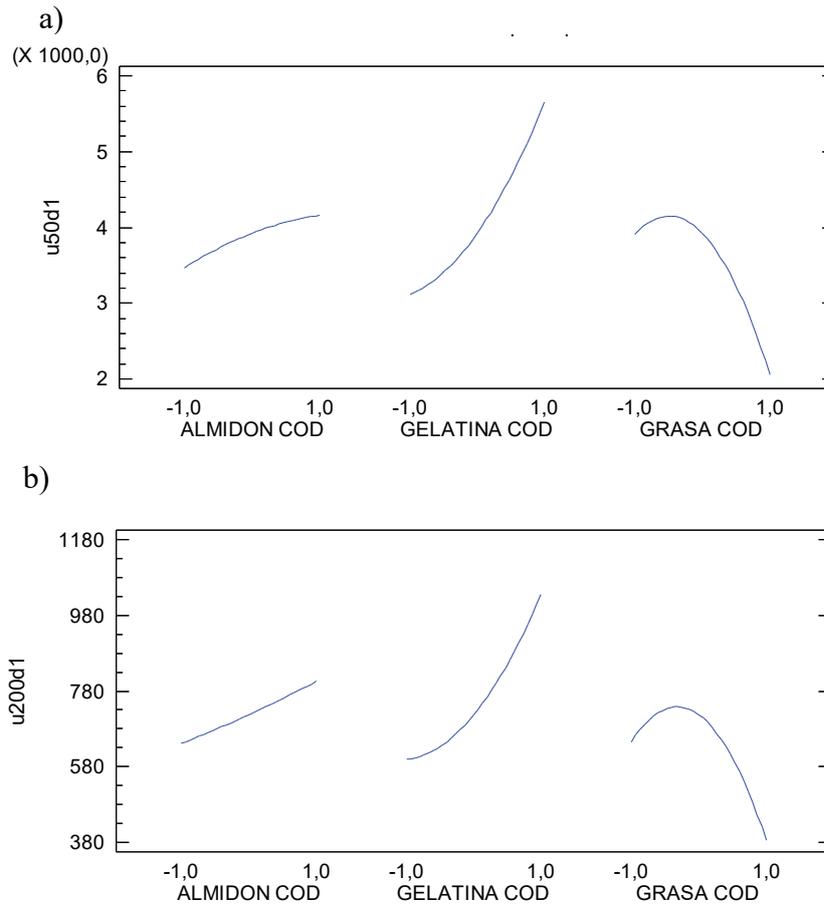
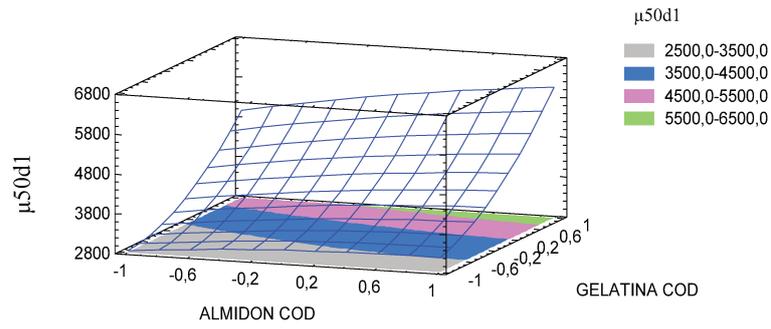


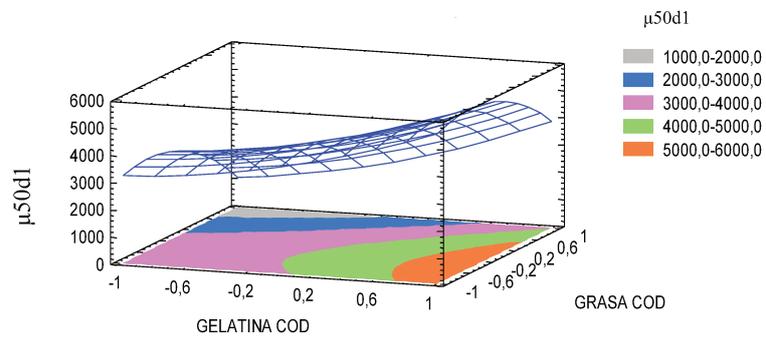
Figura 72. Gráficos de efectos principales para para viscosidad al día 1 para los gradientes de deformación 50s^{-1} a), 200s^{-1} b).

Como se observa en el gráfico de efectos principales (Figura 72), durante el tiempo de almacenamiento se observó la misma tendencia, la cual coincide tanto con los diagramas de Pareto como con los coeficientes de los modelos predictivos obtenidos.

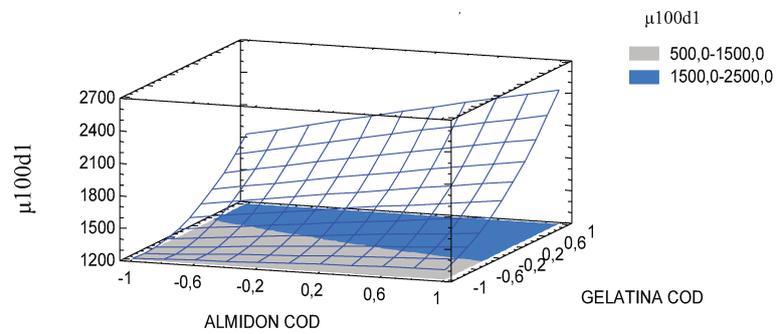
a)



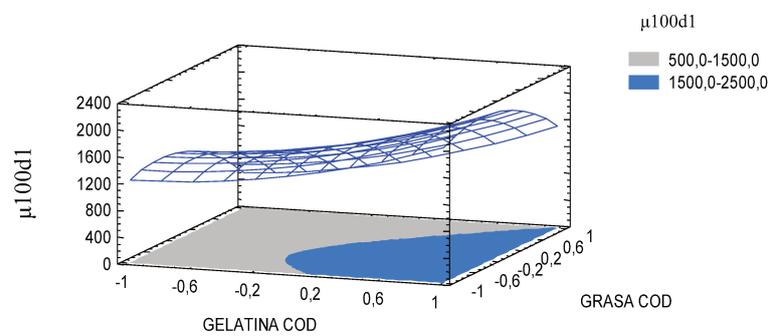
b)



c)



d)



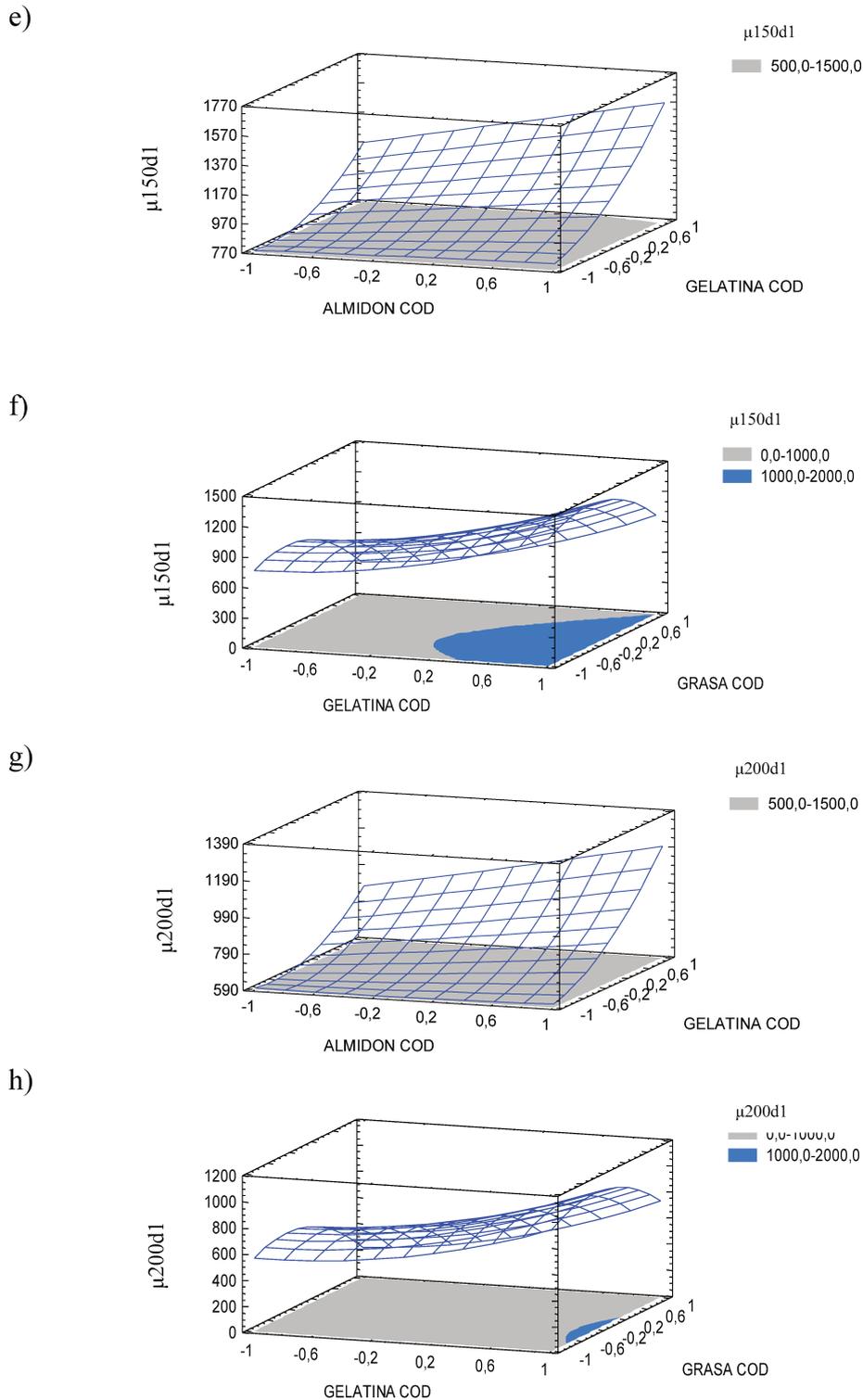


Figura 73. Gráficos de superficie de respuesta estimada para los valores de viscosidad al día 1 en función del contenido de almidón y gelatina en el para los gradientes de deformación $50s^{-1}$ a), $100s^{-1}$ c), $150s^{-1}$ e) y $200s^{-1}$ g) y en función del contenido de grasa y gelatina en los gradientes de deformación $50s^{-1}$ b) y $100s^{-1}$ d), $150s^{-1}$ f) y $200s^{-1}$ h).

En la Figura 73 (a, c, e y g) se presentan los gráficos de superficie de respuesta de la viscosidad, a distinto gradiente de deformación, en función del contenido de almidón y gelatina.

En el caso de la gelatina, se ha demostrado que, a medida que aumenta su concentración, la viscosidad del queso untable también se incrementa debido a una mayor reticulación en la matriz de proteínas y agua (Hesarinejad et al., 2021). Al combinarla con almidón, como se observa en los gráficos, la viscosidad aumenta, a medida que ambos hidrocoloides aumentan, siendo la gelatina la que ejerce un efecto más pronunciado.

Según Kapoor y Metzger (2008), la adición de gelatina mejora la cohesión estructural mientras que el almidón aumenta la densidad de la matriz, lo cual genera una textura más cremosa y un perfil de viscosidad más alto. Asimismo, se puede observar tanto en los datos como en las distintas gráficas presentadas que, a medida que se incrementa el gradiente de deformación, la viscosidad disminuye, principalmente a bajos gradientes ($\leq 100 \text{ s}^{-1}$).

En el caso del efecto de la gelatina con la grasa (Figura 73, b, d, f y h), no se observó que su interacción genere un efecto sobre la viscosidad; sin embargo, si se observó que a medida que aumenta el gradiente de deformación, el valor de viscosidad es más bajo en el día 1.

3.2.7.2 Efecto en el τ_0 , K, n e IT al día 1

Los resultados experimentales obtenidos para τ_0 , K, n e IT, al día 1, se presentan en la Tabla 37. En la Tabla 38 se presentan los valores de suma de cuadrados del ANOVA correspondientes para el mismo parámetro en los diferentes días de análisis.

Tabla 39 Valores promedio obtenidos de τ_0 , K, n e IT al día 1.

| ALMIDON COD | GELATINA COD | GRASA COD | τ_{0d1} (Pa) | | Kd1 (Pa.s) | | | nd1 | | ITd1 (Pa.s) | |
|----------------|-----------------|--------------|----------------------|----------|---------------|------|------|--------|-------|----------------|--|
| 0 | 0 | 0 | 350000 | ± 50000 | 470 | ± 50 | 0,20 | ± 0,00 | 19400 | ± 600 | |
| 0 | 1 | 1 | 290000 | ± 20000 | 430 | ± 50 | 0,23 | ± 0,00 | 12000 | ± 1000 | |
| -1 | -1 | 0 | 210000 | ± 20000 | 330 | ± 50 | 0,23 | ± 0,02 | 12300 | ± 800 | |
| 0 | -1 | -1 | 264000 | ± 2000 | 350 | ± 50 | 0,20 | ± 0,04 | 14200 | ± 700 | |
| -1 | 0 | -1 | 280000 | ± 20000 | 430 | ± 40 | 0,26 | ± 0,00 | 12000 | ± 2000 | |
| 1 | 0 | 1 | 145000 | ± 2000 | 228 | ± 3 | 0,19 | ± 0,00 | 7800 | ± 100 | |
| 0 | -1 | 1 | 62490 | ± 20 | 70 | ± 10 | 0,11 | ± 0,04 | 4200 | ± 200 | |
| 1 | 1 | 0 | 470000 | ± 30000 | 640 | ± 80 | 0,19 | ± 0,01 | 24000 | ± 4000 | |
| -1 | 1 | 0 | 352000 | ± 7000 | 450 | ± 60 | 0,19 | ± 0,02 | 18380 | ± 60 | |
| 0 | 1 | -1 | 380000 | ± 30000 | 370 | ± 70 | 0,11 | ± 0,03 | 20000 | ± 2000 | |
| 1 | 0 | -1 | 280000 | ± 100000 | 470 | ± 90 | 0,28 | ± 0,02 | 14000 | ± 1000 | |
| -1 | 0 | 1 | 143000 | ± 9000 | 220 | ± 20 | 0,19 | ± 0,00 | 8000 | ± 300 | |
| 0 | 0 | 0 | 352000 | ± 7000 | 450 | ± 60 | 0,19 | ± 0,02 | 9000 | ± 2000 | |
| 1 | -1 | 0 | 230000 | ± 20000 | 420 | ± 50 | 0,23 | ± 0,03 | 15800 | ± 500 | |
| 0 | 0 | 0 | 197000 | ± 8000 | 170 | ± 70 | 0,11 | ± 0,06 | 10000 | ± 2000 | |

Tabla 40 Análisis de varianza de los modelos obtenidos para los parámetros reológicos al día 1 para esfuerzo inicial (t_0), índice de consistencia (k), índice de comportamiento (n) e índice de Tixotropía (IT)

| Fuente | G.L | τ_{0d1} | $kd1$ | $nd1$ | ITd1 |
|---|-----|-----------------|----------|---------------|--------------|
| A:ALMIDON COD | 1 | 5,51E+09 | 2,55E+04 | 1,72E-05 | 3,00E+07 |
| B:GELATINA COD | 1 | 131087000000*** | 130478** | 7,50E-05 | 195933000*** |
| C:GRASA COD | 1 | 80387800000*** | 110012** | 0,0102271*** | 190566000*** |
| AA | 1 | 6,15E+08 | 2,88E+04 | 0,0159145*** | 1,77E+06 |
| AB | 1 | 5,05E+09 | 5,21E+03 | 1,25E-05 | 2,44E+06 |
| AC | 1 | 8,11844 | 356,311 | 8,8445E-05 | 2,88E+06 |
| BB | 1 | 4,98E+09 | 7,89E+03 | 0,00624597*** | 48439800* |
| BC | 1 | 6,26E+09 | 57009,2* | 0,0139797*** | 3,12E+06 |
| CC | 1 | 44501300000*** | 62899,6* | 6,42E-04 | 128059000** |
| Falta de ajuste | 3 | 5,60E+09 | 2,82E+04 | 0,00582292*** | 2,76E+07 |
| Error puro | 15 | 4,81E+10 | 1,56E+05 | 4,38E-04 | 1,28E+08 |
| Coefficiente de determinación (R^2) | | 83,9 | 70,3 | 68,2 | 80,6 |

G.L: grados de libertad; * $p \leq 0,05$; ** $p \leq 0,01$; *** $p \leq 0,001$, valores sin * no presentan diferencias significativas.

El modelo obtenido para τ_0 logró explicar el 83,9 % de variabilidad de los datos. Para el K el modelo logró explicar el 70,3 % de variabilidad de los datos. En el caso n el modelo logró explicar el 64,3 % de variabilidad de los datos. Para el IT el modelo explicó el 80,6 % de variabilidad de los datos.

A continuación, se presentan los modelos reducidos obtenidos para los valores de firmeza en todos los días de estudio:

$$\tau_{0d1} = 309421, + 90514,8xB - 70881,9xC - 2,61934E-10xAxB - 2,32831E-10xAxC - 3,7835E-10xBxC - 78830,9xC^2$$

$$K_{d1} = 420,186 + 90,3042xB - 82,9201xC - 99,0893xC^2$$

$$n_{d1} = -0,194544 + 0,0010375xA + 0,00268026xB + 0,0261072xC - 0,0480407xA^2 + 0,0322448xB^2 - 0,0466105xBxC$$

$$IT_{d1} = 14763,8 + 3499,4xB - 3451,14xC + 2645,83xB^2 - 4578,47xC^2$$

El análisis de los modelos para τ_{0d1} , $kd1$, $nd1$ e $ITd1$ mostró un patrón en el que la gelatina codificada representa la variable con mayor efecto sobre la mayoría de las respuestas, con excepción del modelo $nd1$, en el que la grasa exhibe un efecto dominante. En τ_{0d1} , la gelatina fue 1,28 veces más influyente que la grasa, lo que indica su papel determinante en el parámetro de inicio del flujo. En el modelo $kd1$, la gelatina tuvo un impacto 1,09 veces superior al de la grasa. En contraste, en $nd1$, la grasa fue 25 veces más influyente que la gelatina y 25,2 veces más que el almidón, siendo este último la variable de menor efecto. Finalmente, en el modelo $ITd1$, la gelatina superó levemente a la grasa por un factor de 1,01, con ambos contribuyendo de manera comparable a la respuesta del índice de tenacidad. Estos resultados sugieren que la gelatina codificada es el principal determinante de la mayoría de los parámetros reológicos analizados, posiblemente por su efecto estructurante y su capacidad para aumentar la cohesión y elasticidad del sistema.

A continuación, se presentan los gráficos de Pareto para los distintos parámetros reológicos, en los cuales, al igual que en la Tabla 38, se puede apreciar que la grasa influye en todos los parámetros, al igual que la gelatina, con excepción esta última en el n. En general, la gelatina ejerce un efecto positivo sobre los parámetros reológicos, mientras que la grasa ejerce un efecto negativo.

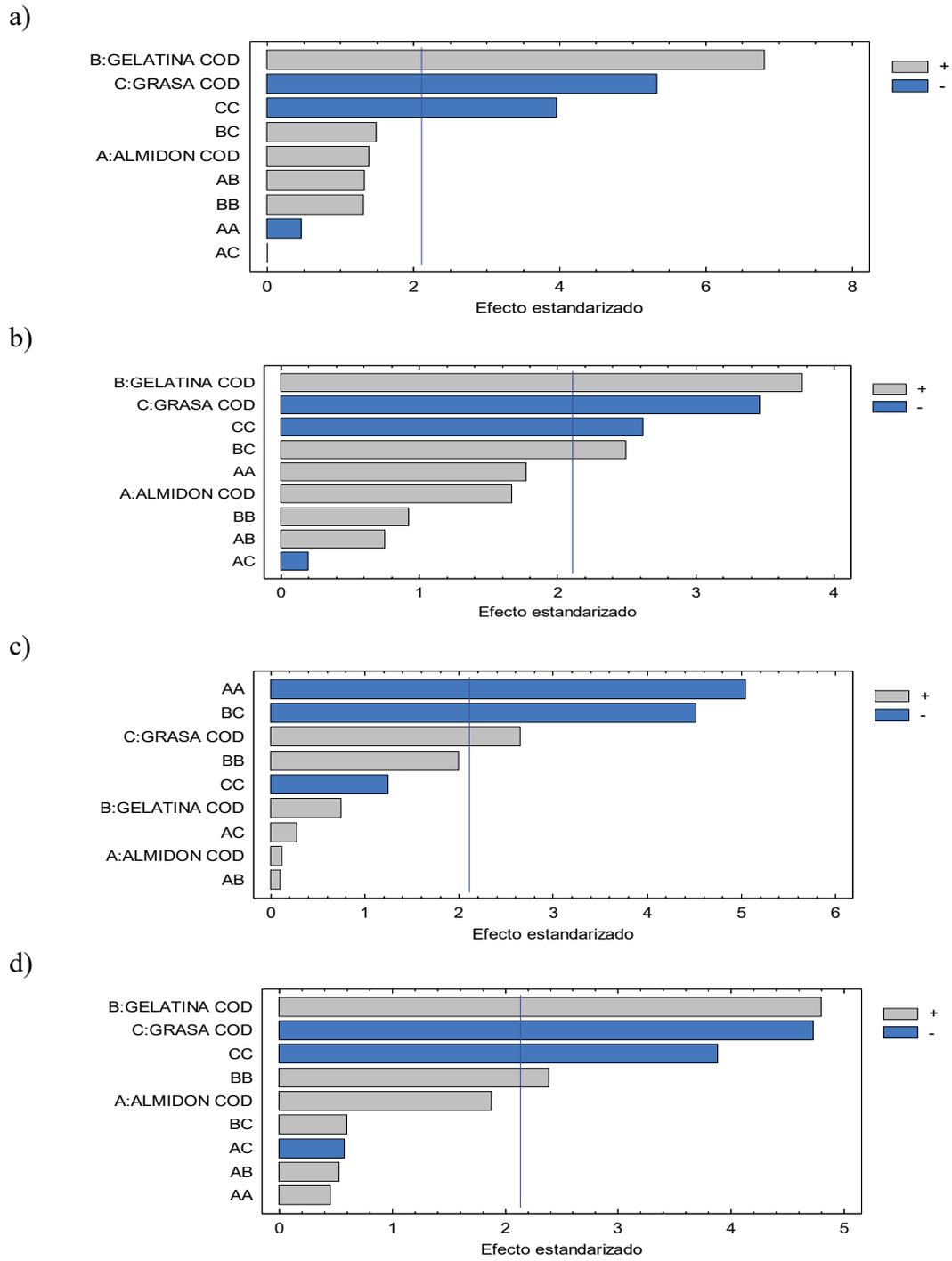
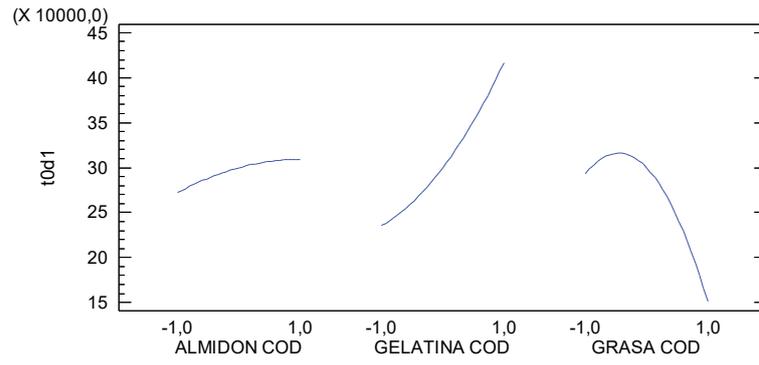
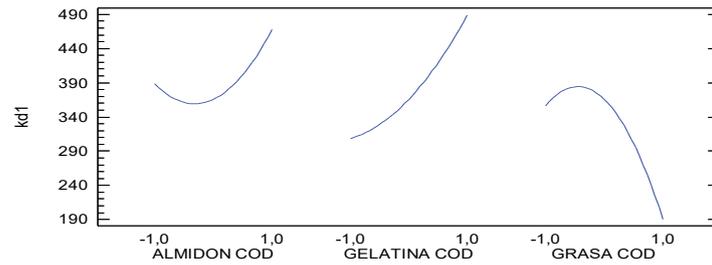


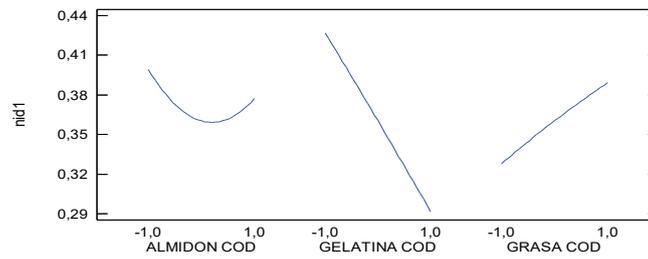
Figura 74. Diagramas de pareto estandarizado al día 1 para τ_0 a), k b), n c) y IT d).



b)



b)



d)

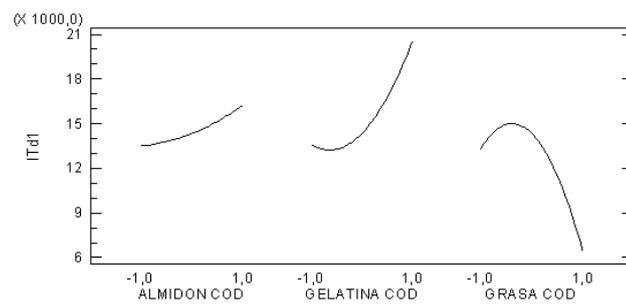
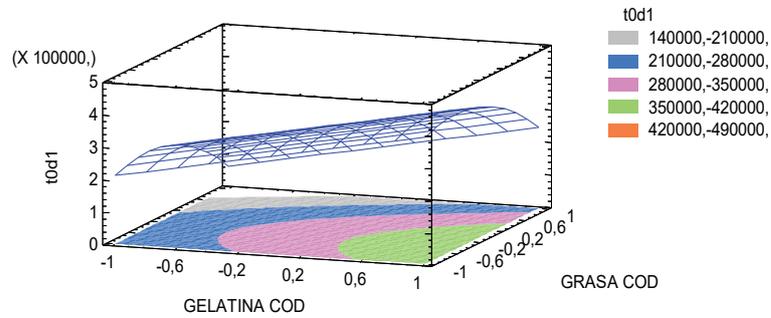


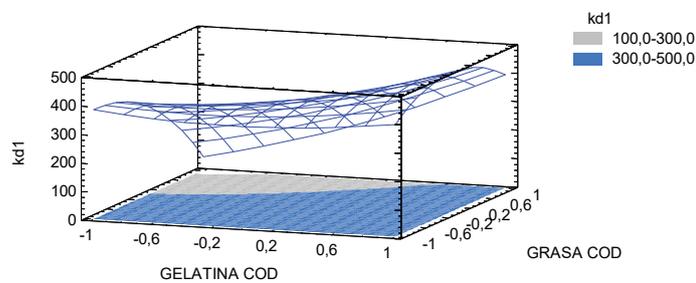
Figura 75. Gráficos de efectos principales para para viscosidad al día 1 para los gradientes de deformación τ_0 a), k b), n c) y IT d).

Tanto el almidón como la gelatina presentaron un efecto directo sobre los parámetros reológicos, mientras que la grasa presente tiende a reducir la respuesta de cada parámetro reológico a medida que ésta aumenta (Figura 75 (a-d)).

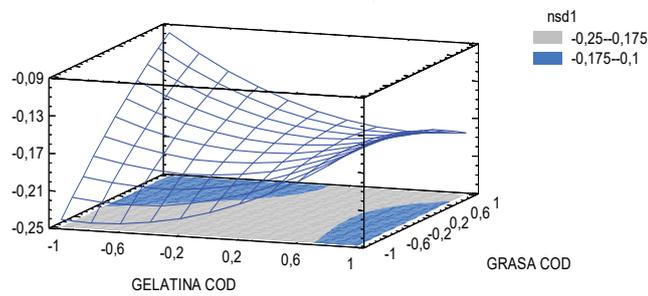
a)



b)



c)



d)

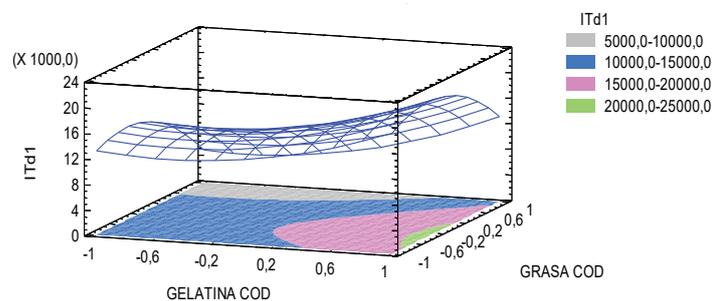


Figura 76. Gráficos de superficie de respuesta estimada al día 1 para los parámetros reológicos función del contenido de grasa y gelatina τ_0 a), k c), n e) y IT g) y en función del contenido de almidón y grasa en los gradientes de deformación τ_0 b) y k d), n f) IT h).

Como se mostró en los resultados obtenidos, la grasa es clave en la formación de la microestructura y en la determinación del τ_0 . Su presencia facilita la distribución de la tensión, resultando en un menor esfuerzo, especialmente en quesos con mayor contenido de grasa. Según Lorenzen et al. (2024), el contenido de grasa impacta tanto la microestructura como la resistencia al flujo en emulsiones gelatinosas, como los quesos. Por su parte, la incorporación de hidrocoloides generalmente aumenta el τ_0 en quesos bajos en grasa, como muestra el trabajo de Zheng (2019). Esto se debe a su capacidad de reforzar la matriz de gel y aumentar la resistencia inicial.

Con respecto al K, este es un parámetro fundamental para caracterizar la reología de productos como el queso untable. Este valor describe cómo responde un material a las fuerzas de deformación y depende de factores como el contenido almidón y gelatina, como en el presente estudio, donde ambas variables incrementan este índice a medida que su concentración incrementa. Estos resultados coinciden con los reportados por Hesarinejad et al. (2021), quien observó que el uso de gelatina principalmente incrementó la formación de una red tridimensional en quesos bajos en grasa, siempre y cuando se incorpore otro aditivo como el caso de gomas, que mimeticen el comportamiento de las grasas. A su vez, la incorporación de almidón aumenta la interacción con la fase proteica, haciendo que el índice K también aumente, según los resultados obtenidos por Demirkesen et al. (2024).

3.2.7.3 Efecto en la viscosidad al día 7

Los resultados experimentales obtenidos de viscosidad al día 7 para los gradientes de deformación $50s^{-1}$, $100s^{-1}$, $150s^{-1}$ y $200s^{-1}$ se presentan en la Tabla 39. Además, en la Tabla 40 se presentan los ANOVA correspondientes para el mismo parámetro en los diferentes días de análisis.

En la Tabla 39, se presentan los valores promedios de viscosidad a distinto gradiente de deformación. En estos se puede observar, al igual que al día 1, que el tratamiento mecánico afecta la viscosidad de la muestra, es decir, cuando el gradiente de deformación es mayor, la viscosidad de la muestra decae (comportamiento tixotrópico, también dependiente del tiempo que dure el tratamiento mecánico). En ese sentido, se pudo observar que en todos los tratamientos disminuyó la viscosidad, dicha reducción se encuentra entre el 78 y 85 %, dependiendo del tratamiento.

Como se observa en la Tabla 40, a diferencia del día 1, en este caso los tres factores estudiados, contenido de gelatina, almidón y grasa, presentaron un efecto significativo sobre la viscosidad a distinto gradiente de deformación.

Tabla 41 Valores promedio obtenidos de viscosidad al día 7.

| ALMIDON COD | GELATINA COD | GRASA COD | μ 50d7 (mPa.s) | μ 100d7 (mPa.s) | μ 150d7 (mPa.s) | μ 200d7 (mPa.s) |
|----------------|-----------------|--------------|-----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 0 | 0 | 0 | 7000 ± 1400 | 2200 ± 100 | 1430 ± 40 | 1010 ± 60 |
| 0 | 1 | 1 | 3460 ± 30 | 1440 ± 60 | 910 ± 20 | 690 ± 10 |
| -1 | -1 | 0 | 3800 ± 200 | 1505 ± 9 | 950 ± 20 | 700 ± 10 |
| 0 | -1 | -1 | 5000 ± 200 | 1870 ± 50 | 1120 ± 20 | 809 ± 2 |
| -1 | 0 | -1 | 4220 ± 30 | 1520 ± 30 | 910 ± 10 | 669 ± 9 |
| 1 | 0 | 1 | 2200 ± 100 | 1060 ± 2 | 660 ± 4 | 478 ± 1 |
| 0 | -1 | 1 | 1100 ± 200 | 500 ± 80 | 320 ± 40 | 240 ± 30 |
| 1 | 1 | 0 | 9300 ± 900 | 3200 ± 200 | 1870 ± 60 | 1360 ± 40 |
| -1 | 1 | 0 | 4920 ± 80 | 2000 ± 300 | 1180 ± 60 | 880 ± 40 |
| 0 | 1 | -1 | 6600 ± 400 | 2300 ± 200 | 1370 ± 60 | 1005,35 ± 40 |
| 1 | 0 | -1 | 5300 ± 300 | 2000 ± 100 | 1160 ± 50 | 830 ± 20 |
| -1 | 0 | 1 | 2600 ± 300 | 1000 ± 100 | 650 ± 30 | 470 ± 30 |
| 0 | 0 | 0 | 3200 ± 300 | 1480 ± 50 | 830 ± 40 | 620 ± 30 |
| 1 | -1 | 0 | 4200 ± 300 | 1650 ± 80 | 1020 ± 40 | 740 ± 30 |
| 0 | 0 | 0 | 3500 ± 400 | 1300 ± 100 | 770 ± 80 | 560 ± 40 |

Tabla 42 Análisis de varianza de los modelos obtenidos para viscosidad en el día 7.

| Fuente | G.L | μ_{50d7} | μ_{100d7} | μ_{150d7} | μ_{200d7} |
|---|-----|--------------|---------------|---------------|---------------|
| A:ALMIDON COD | 1 | 7269150** | 872529** | 262908* | 118541* |
| B:GELATINA COD | 1 | 25558200*** | 2881890*** | 929708*** | 519929*** |
| C:GRASA COD | 1 | 34870300*** | 3335510*** | 1031550*** | 514910*** |
| AA | 1 | 2899390* | 169733 | 48239 | 23565,1 |
| AB | 1 | 8153600*** | 542000* | 195457* | 97635,8* |
| AC | 1 | 1122670 | 105201 | 28429,6 | 11717,6 |
| BB | 1 | 8648980*** | 549303* | 196989* | 128418** |
| BC | 1 | 273196 | 135542 | 54461,4 | 31469,3 |
| CC | 1 | 4968710** | 1258100*** | 4,34E+05 | 225872** |
| Error puro | 16 | 6147370 | 1,29E+06 | 5,62E+05 | 2,53E+05 |
| Coefficiente de determinación (R ²) | | 88,4 | 81,8 | 82,2 | 84,4 |

G.L: grados de libertad; * $p \leq 0,05$; ** $p \leq 0,01$; *** $p \leq 0,001$, valores sín * no presentan diferencias significativas.

El modelo obtenido para la viscosidad al día 7 para el gradiente de deformación logró explicar el 88,4% de variabilidad de los datos. Para la viscosidad a gradiente de deformación 100s^{-1} el modelo logró explicar el 81,8% de variabilidad de los datos. En el caso de la viscosidad a gradiente de deformación 150s^{-1} el modelo logró explicar el 82,2% de variabilidad de los datos. Para la viscosidad a gradiente de deformación 200s^{-1} el modelo logró explicar el 84,43% de variabilidad de los datos.

A continuación, se presentan los modelos reducidos obtenidos para los valores de firmeza en todos los días de estudio:

$$\mu_{50d7} = 3785,9 + 674,034xA + 1263,88xB - 1476,28xC + 645,591xA^2 + 1009,55xAxB + 1115,03xB^2 - 845,135xC^2$$

$$\mu_{100d7} = 1758,06 + 233,523xA + 424,403xB - 456,585xC + 260,288xAxB + 261,074xB^2 - 424,418xC^2$$

$$\mu_{150d7} = 1059,39 + 128,186xA + 241,053xB - 253,913xC + 156,308xAxB + 157,11xB^2 - 248,703xC^2$$

$$\mu_{200d7} = 764,979 + 86,0746xA + 180,265xB - 179,393xC + 110,474xAxB + 127,525xB^2 - 179,236xC^2$$

En los modelos de resistencia mecánica (μ), obtenidos para el día 7 a distintas deformaciones (50, 100, 150 y 200s^{-1}), se observa una transición clara en la variable de mayor influencia. En μ_{50d7} , la grasa fue la variable más influyente, con un coeficiente 2,2 veces mayor que el almidón y 1,17 veces superior al de la gelatina. Sin embargo, a medida que la deformación aumenta, la diferencia de la influencia entre grasa y gelatina se reduce significativamente. En μ_{100d7} , la grasa fue 1,95 veces más influyente que el almidón y apenas 1,08 veces más que la gelatina. En μ_{150d7} , el efecto de la grasa fue 1,98 veces mayor que el almidón y solo 1,05 veces superior al de la gelatina, mientras que en μ_{200d7} , la gelatina mostró una influencia ligeramente superior (1,01 veces) a la de la grasa. En todos los modelos, el almidón tuvo la menor contribución relativa. Estos resultados indican que la grasa es determinante en los primeros niveles de deformación, pero su efecto tiende a equilibrarse con el de la gelatina en niveles más altos de cizallamiento, posiblemente debido al reordenamiento estructural de la matriz, donde la gelatina podría jugar un papel estabilizador más marcado a medida que aumenta el cizallamiento.

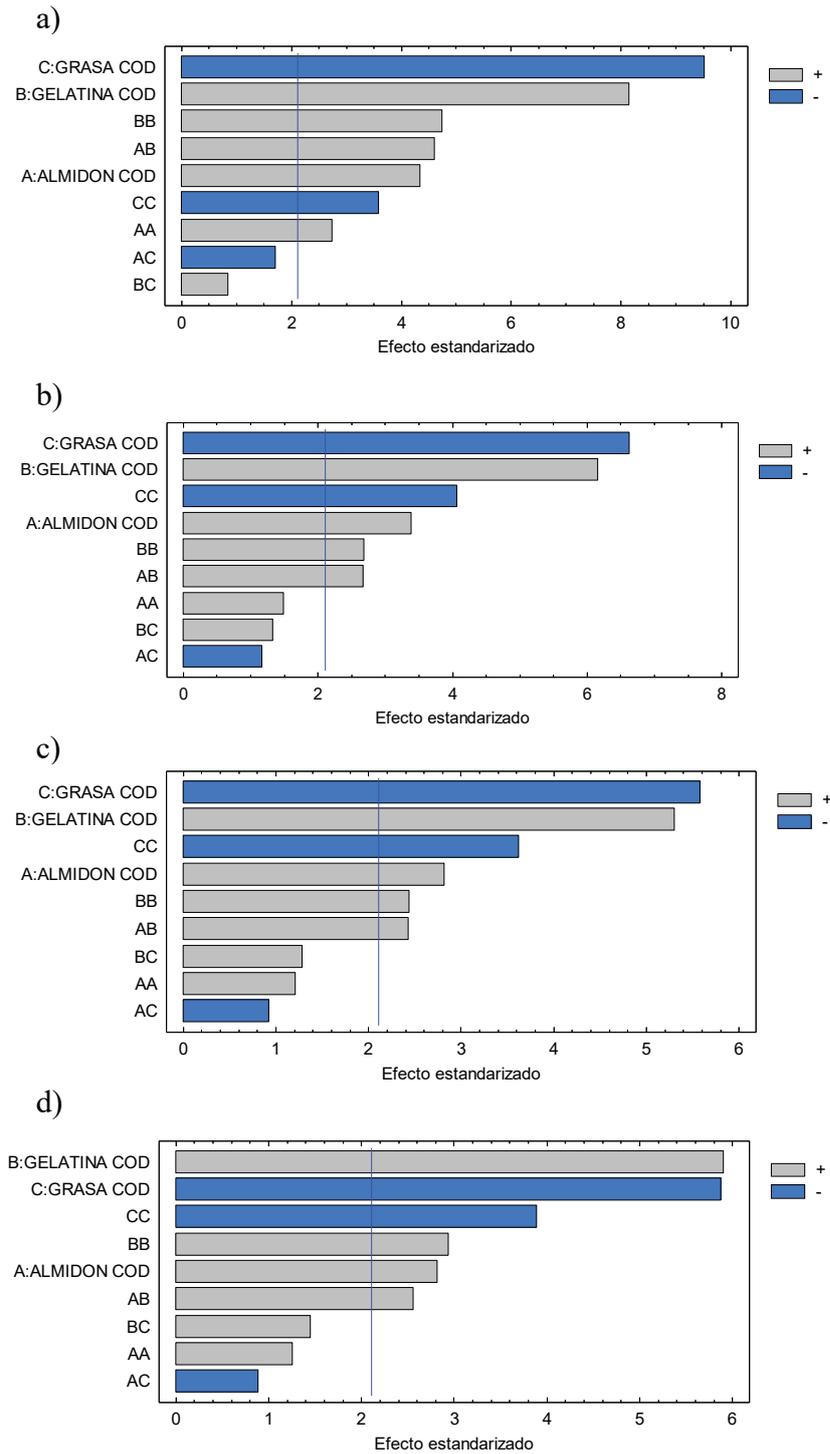


Figura 77. Diagramas de Pareto estandarizado para viscosidad al día 7 para los gradientes de deformación 50s⁻¹ a), 100s⁻¹ b), 150s⁻¹ c) y 200s⁻¹ d).

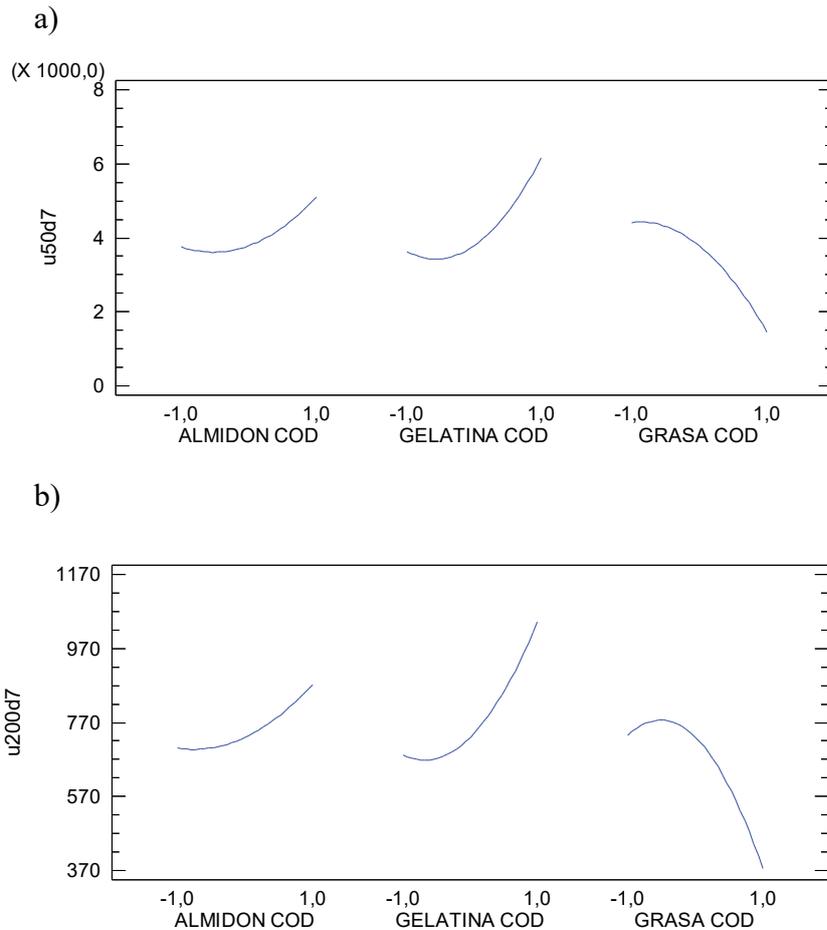


Figura 78. Gráficos de efectos principales para para viscosidad al día 7 para los gradientes de deformación 50s^{-1} a), 200s^{-1} b).

Como se observa en los gráficos de Pareto (Figura 77), al igual que en los gráficos de efectos principales, en todos los gradientes de deformación analizados se pueden observar una tendencia similar, en la que tanto el almidón como la gelatina presentan un efecto positivo, es decir, a medida que incrementa la concentración de estos dos hidrocoloides, la viscosidad también aumenta, influyendo en mayor medida la gelatina. Por el contrario, en los mismos gráficos se observa que el contenido de grasa tiene un efecto inverso sobre la viscosidad, es decir, a medida que el contenido de grasa crece, la viscosidad disminuye.

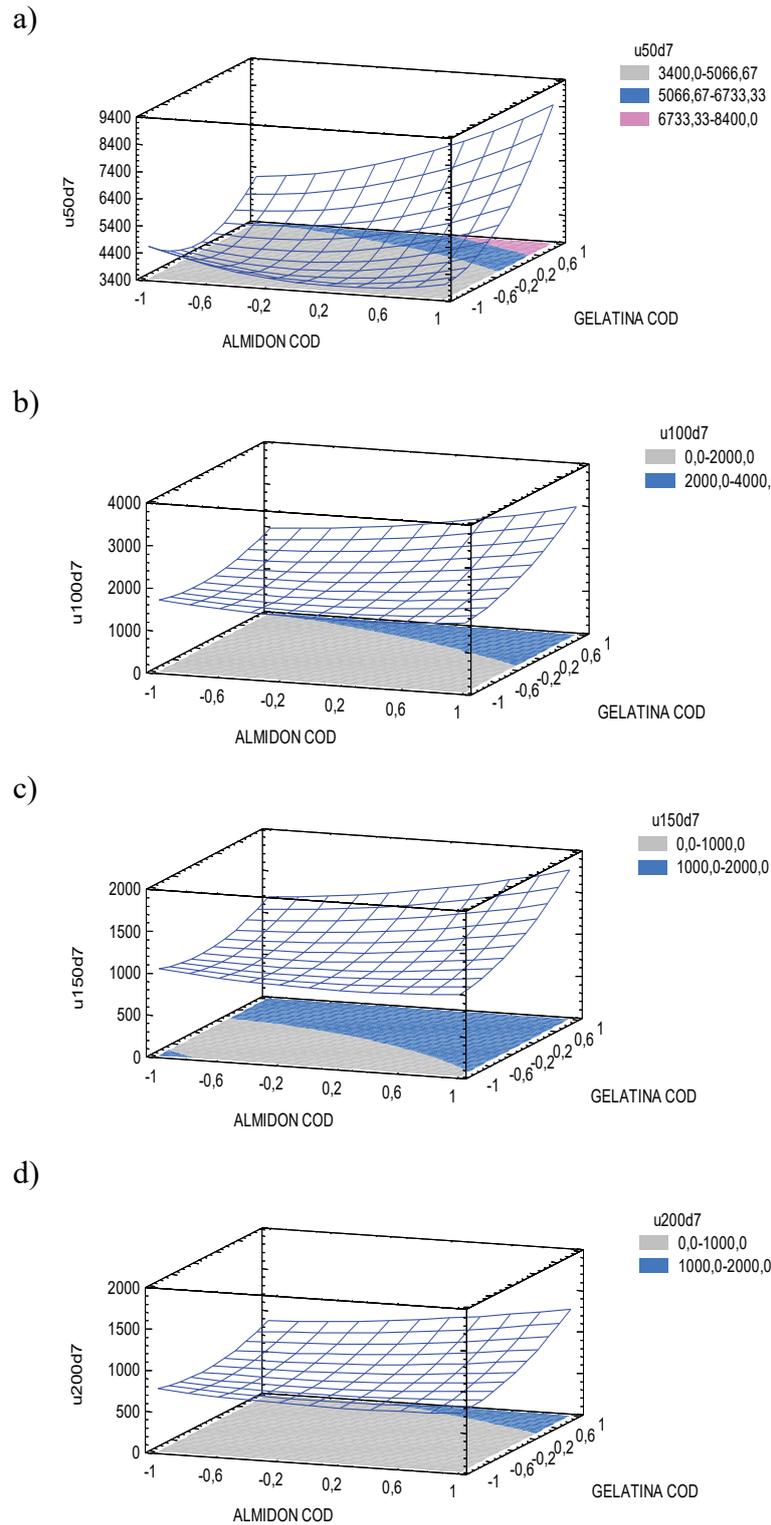


Figura 79. Gráficos de superficie de respuesta estimada para los valores de viscosidad al día 7 en función del contenido de almidón y gelatina en el para los gradientes de deformación $50s^{-1}$ a), $100s^{-1}$ c), $150s^{-1}$ e) y $200s^{-1}$ g) y en función del contenido de grasa y gelatina en los gradientes de deformación $50s^{-1}$ b) y $100s^{-1}$ d), $150s^{-1}$ f) y $200s^{-1}$ h).

Como se explicó anteriormente y al igual como se puede apreciar en la Figura 79, la viscosidad disminuye a medida que aumenta la gradiente de deformación. En todos los casos se aprecia que los valores de viscosidad más altos se obtienen cuando la concentración de almidón y gelatina son los más altos (dentro del rango experimental).

3.2.7.1 Efecto en τ_0 , k , n e IT al día 7

Los resultados experimentales obtenidos para τ_0 , K , n e IT al día 7 se presentan en la Tabla 41. Asimismo, en la Tabla 42 se presentan los valores de suma de cuadrados del ANOVA correspondientes para el mismo parámetro en los diferentes días de análisis.

En comparación con los valores obtenidos en el día 1, en general, todos los parámetros reológicos en el día 7 son más elevados. Dichos resultados coinciden, al igual que los valores de textura obtenidos, de acuerdo a los cuales se apreció que la consistencia y firmeza luego de 7 días de almacenamiento refrigerado aumentaron.

Tabla 43 Valores promedio obtenidos para τ_0 , k, n y IT al día 7.

| ALMIDON COD | GELATINA COD | GRASA COD | τ_{0d7} (Pa) | $Kd7$ (Pa.s) | $nd7$ | ITd7 (Pa.s) |
|----------------|-----------------|--------------|----------------------|-----------------|-------------|----------------|
| 0 | 0 | 0 | 450000 ± 30000 | 174,54 ± 0,04 | -0,3 ± 0,00 | 26000 ± 2000 |
| 0 | 1 | 1 | 305400 ± 200 | 460 ± 20 | -0,3 ± 0,01 | 11000 ± 1000 |
| -1 | -1 | 0 | 339000 ± 3000 | 620 ± 10 | -0,3 ± 0,00 | 18300 ± 200 |
| 0 | -1 | -1 | 366000 ± 3000 | 390 ± 10 | -0,2 ± 0,01 | 19400 ± 700 |
| -1 | 0 | -1 | 269000 ± 4000 | 720 ± 10 | -0,3 ± 0,00 | 14800 ± 600 |
| 1 | 0 | 1 | 142000 ± 2000 | 60 ± 2 | 0,1 ± 0,00 | 8300 ± 200 |
| 0 | -1 | 1 | 74000 ± 7000 | 100 ± 20 | -0,1 ± 0,01 | 4900 ± 500 |
| 1 | 1 | 0 | 700000 ± 10000 | 1170 ± 50 | -0,3 ± 0,01 | 35000 ± 4000 |
| -1 | 1 | 0 | 370000 ± 20000 | 600 ± 100 | -0,2 ± 0,1 | 20000 ± 800 |
| 0 | 1 | -1 | 460000 ± 40000 | 320 ± 80 | -0,1 ± 0,1 | 21000 ± 900 |
| 1 | 0 | -1 | 390000 ± 20000 | 1160 ± 60 | -0,4 ± 0,00 | 18600 ± 900 |
| -1 | 0 | 1 | 170000 ± 10000 | 250 ± 30 | -0,2 ± 0,00 | 9400 ± 500 |
| 0 | 0 | 0 | 210000 ± 20000 | 290 ± 30 | -0,2 ± 0,01 | 12500 ± 900 |
| 1 | -1 | 0 | 360000 ± 20000 | 690 ± 50 | -0,3 ± 0,00 | 20000 ± 1000 |
| 0 | 0 | 0 | 330000 ± 30000 | 180 ± 30 | -0,1 ± 0,1 | 35000 ± 4000 |

Tabla 44 Análisis de varianza de los modelos obtenidos para los parámetros reológicos al día 7 para τ_0 , k, n y IT

| Fuente | G.L | τ_{0d7} | kd7 | nd7 | ITd7 |
|---|-----|-----------------|-----------|--------------|--------------|
| A:ALMIDON COD | 1 | 4652580000** | 210609* | 9,21E-03 | 97567200* |
| B:GELATINA COD | 1 | 121449000000*** | 1,34E+05 | 1,43E-03 | 147828000** |
| C:GRASA COD | 1 | 155330000000*** | 743922*** | 0,0493728*** | 397196000*** |
| AA | 1 | 5,32E+09 | 576486*** | 0,0446979* | 1,48E+07 |
| AB | 1 | 46497100000** | 138902* | 8,74E-04 | 82272700* |
| AC | 1 | 1,19E+10 | 198560* | 0,0614952*** | 1,24E+07 |
| BB | 1 | 51108900000** | 1,71E+04 | 7,25E-03 | 5,43E+07 |
| BC | 1 | 9,88E+09 | 9,16E+04 | 0,0203818* | 1,27E+07 |
| CC | 1 | 95580400000*** | 197785* | 0,0165915* | 383110000*** |
| Falta de ajuste | 3 | 1,86E+10 | 547366** | 0,196206*** | 8,54E+07 |
| Error puro | 17 | 6,21E+10 | 5,22E+05 | 5,03E-02 | 1,96E+08 |
| Coefficiente de determinación (R^2) | | 87,3 | 68,8 | 46,6 | 82,2 |

G.L: grados de libertad; * $p \leq 0,05$; ** $p \leq 0,01$; *** $p \leq 0,001$, valores sín * no presentan diferencias significativas.

El modelo obtenido para τ_0 no presentó falta de ajuste significativa (pfalta de ajuste= 0,2045) y logró explicar el 87,32 % de variabilidad de los datos. Para K el modelo presentó falta de ajuste significativa (pfalta de ajuste = 0,0058) y logró explicar el 68,8 % de variabilidad de los datos, considerando mínimamente adecuado. En el caso del n, el modelo presentó falta de ajuste significativa (pfalta de ajuste = 0,0000) y logró explicar solo el 46,6 % de variabilidad de los datos, considerándose no adecuado. Para el IT, el modelo tampoco presentó falta de ajuste significativa (pfalta de ajuste= 0,1335) y logró explicar el 82,22 % de variabilidad de los datos.

A continuación, se presentan los modelos reducidos obtenidos para los valores de firmeza en todos los días de estudio:

$$\tau_{0d7} = 347722, + 53924,6x_A + 87123,8x_B - 98530,0x_C + 76237,4x_Ax_B - 1,16415E-10x_Ax_C + 81128,4x_B^2 - 2,91038E-10x_Bx_C - 115832x_C^2$$

$$kd7 = 461,8 + 114,73x_A - 215,627x_C + 275,701x_A^2 + 131,768x_Ax_B - 157,544x_Ax_C - 167,358x_C^2$$

$$nd7 = -0,183177 + 0,0239875x_A + 0,0094375x_B + 0,05555x_C - 0,0753904x_A^2 + 0,087675x_Ax_C - 0,050475x_Bx_C + 0,0498096x_C^2$$

$$ITd7 = 21952,0 + 2469,4x_A + 3039,61x_B - 4982,44x_C + 3206,88x_Ax_B - 8475,63x_C^2$$

Como se puede apreciar en los modelos predictivos obtenidos, los cuales coinciden con los gráficos de Pareto y los gráficos de efectos principales, de la Figura 80 y 81, respectivamente, el contenido de grasa, si bien presentó un efecto negativo, éste influyó significativamente en todos los parámetros reológicos.

En el caso de n, fue el único factor lineal que influyó sobre esta respuesta, mientras que las tres variables de estudio influyeron sobre τ_0 e IT. En el modelo t_{0d7} , la grasa presentó un coeficiente 1,13 veces mayor que la gelatina y 1,83 veces superior al del almidón, lo que resalta su influencia dominante en la resistencia inicial al flujo. En $kd7$, la grasa fue 1,88 veces más influyente que el almidón, mientras que la gelatina no estuvo representada linealmente. Para el parámetro de n, la grasa tuvo un efecto 2,3 veces mayor que el almidón y 5,9 veces más alto que la gelatina. Finalmente, en el modelo $ITd7$, la grasa volvió a liderar con un coeficiente 2 veces superior al del almidón y 1,64 veces

mayor que el de la gelatina. Estos resultados confirman que la grasa es un modulador clave de la respuesta reológica del sistema en esta etapa de almacenamiento, posiblemente debido a su capacidad para alterar la microestructura interna, disminuir la cohesión de la matriz y facilitar la deformación bajo carga. La gelatina, aunque relevante, ocupa un papel secundario, y el almidón muestra una contribución más limitada en estos parámetros.

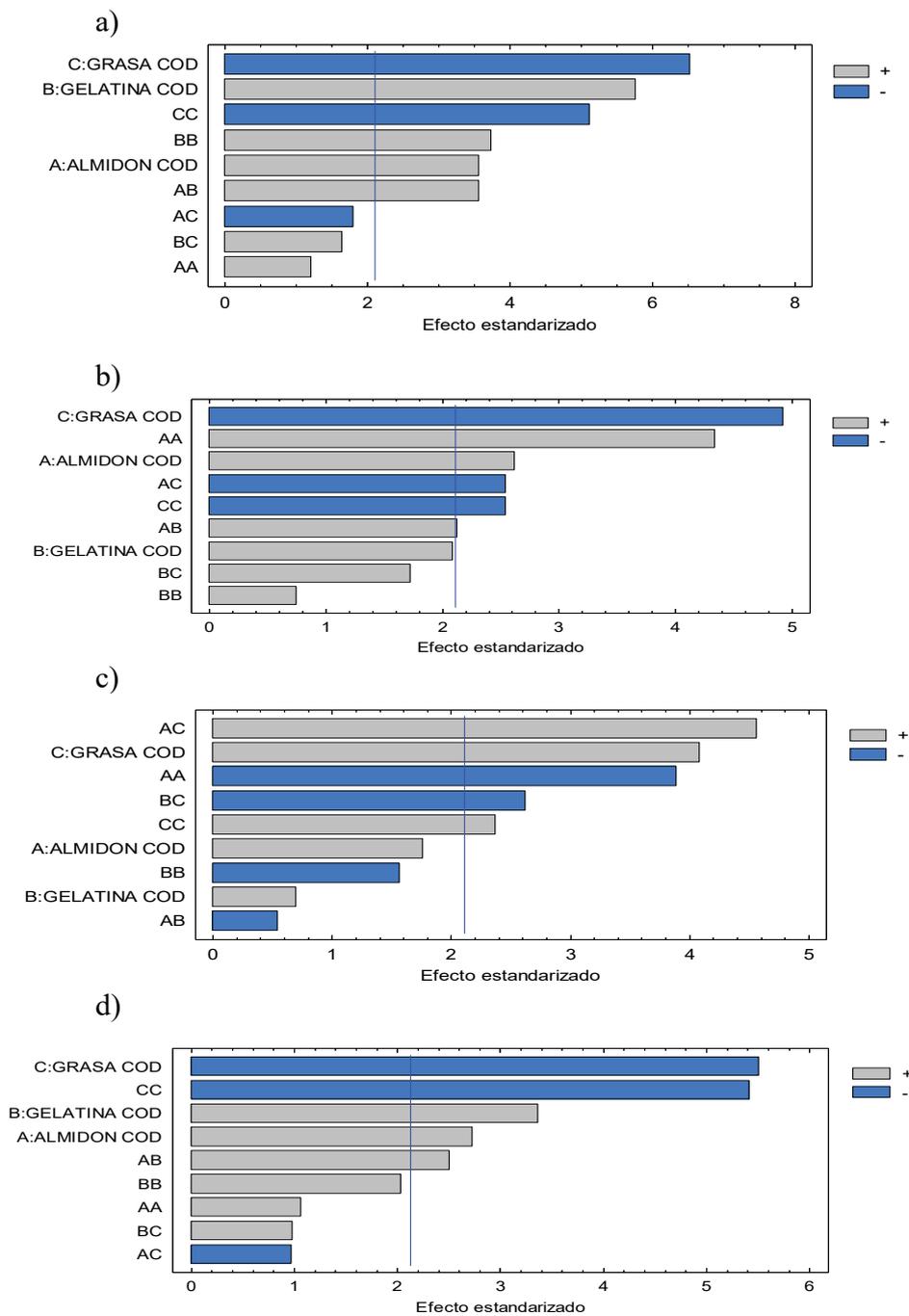


Figura 80. Diagramas de Pareto estandarizado al día 7 para t0 a), k b), n c) y IT d).

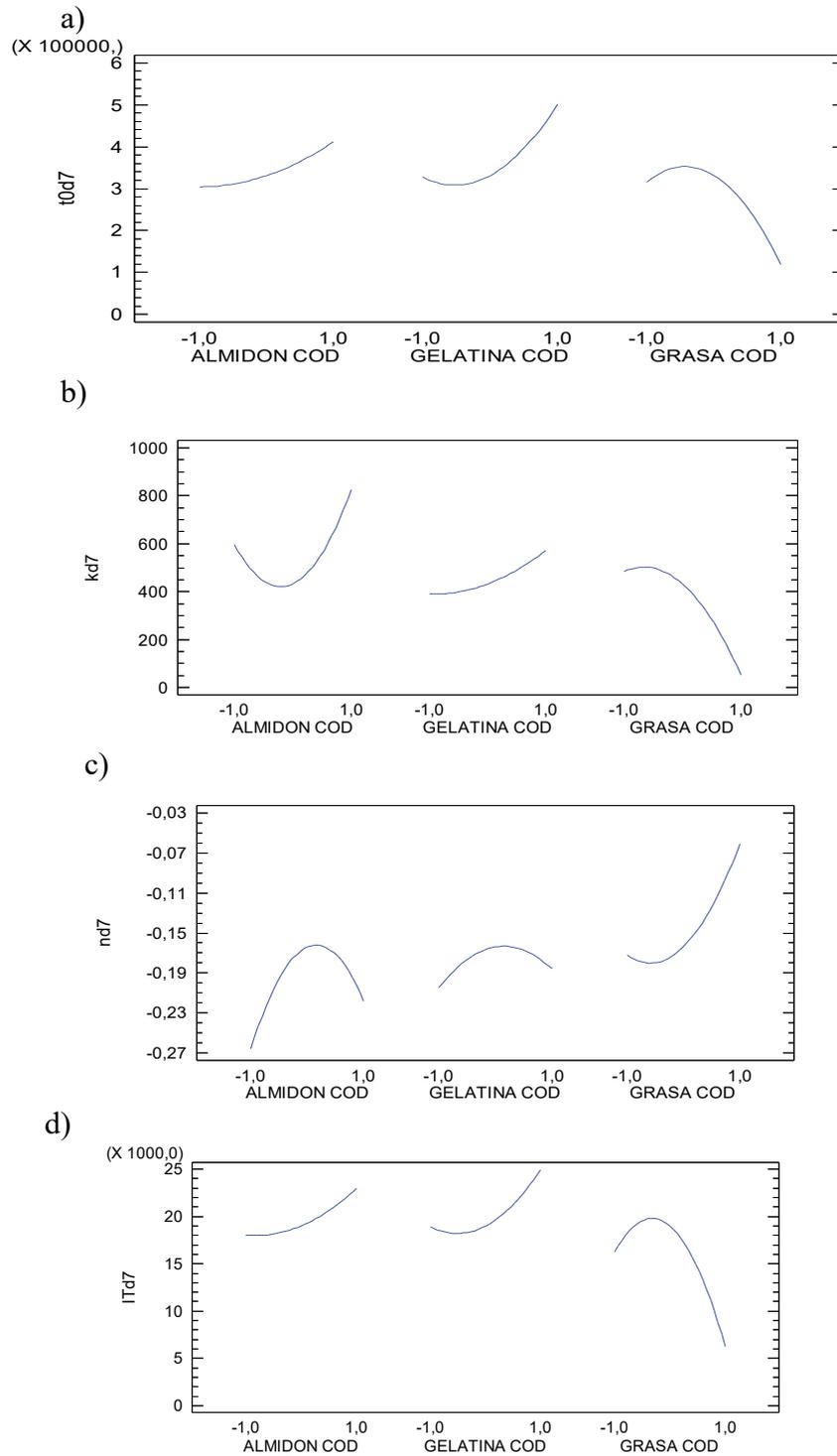
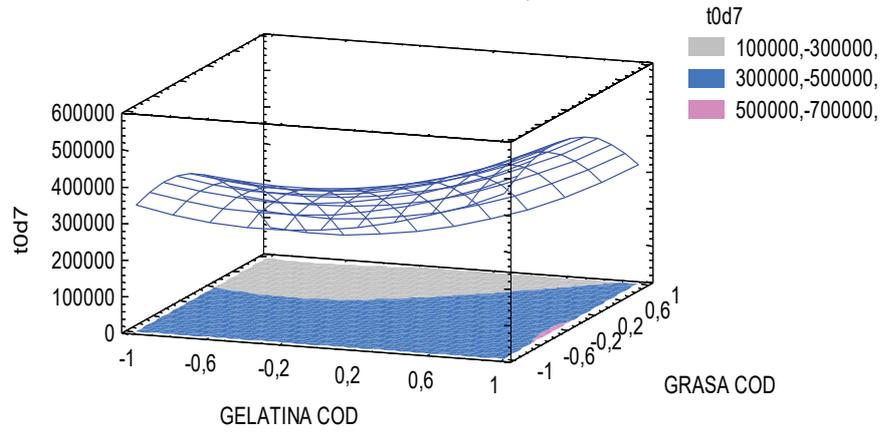
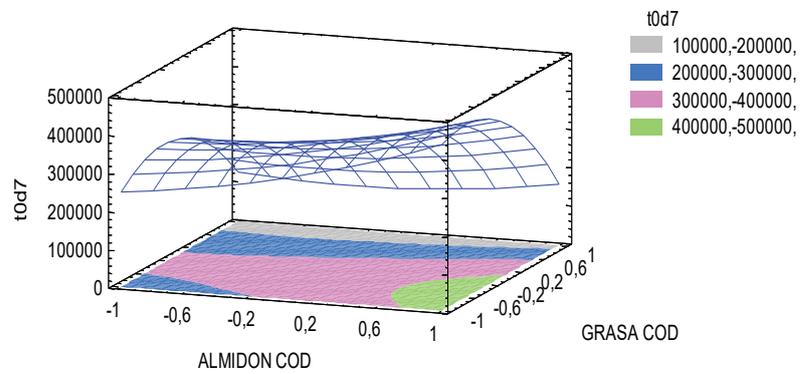


Figura 81. Gráficos de efectos principales para para viscosidad al día 7 para los gradientes de deformación t_0 a), k b), n c) y IT d).

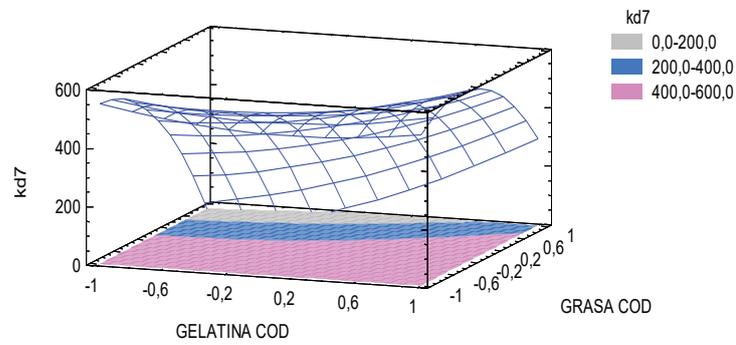
a)



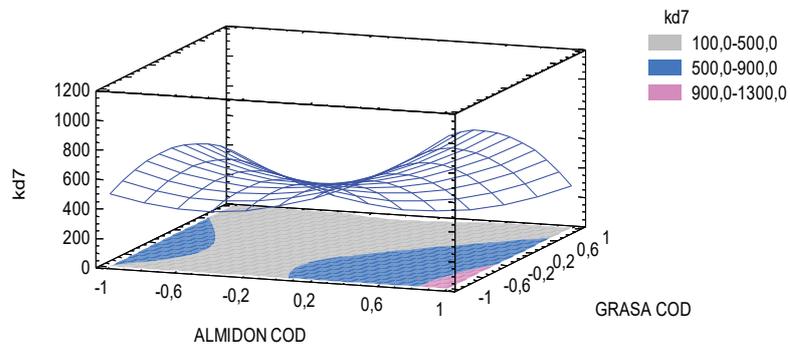
b)



c)



d)



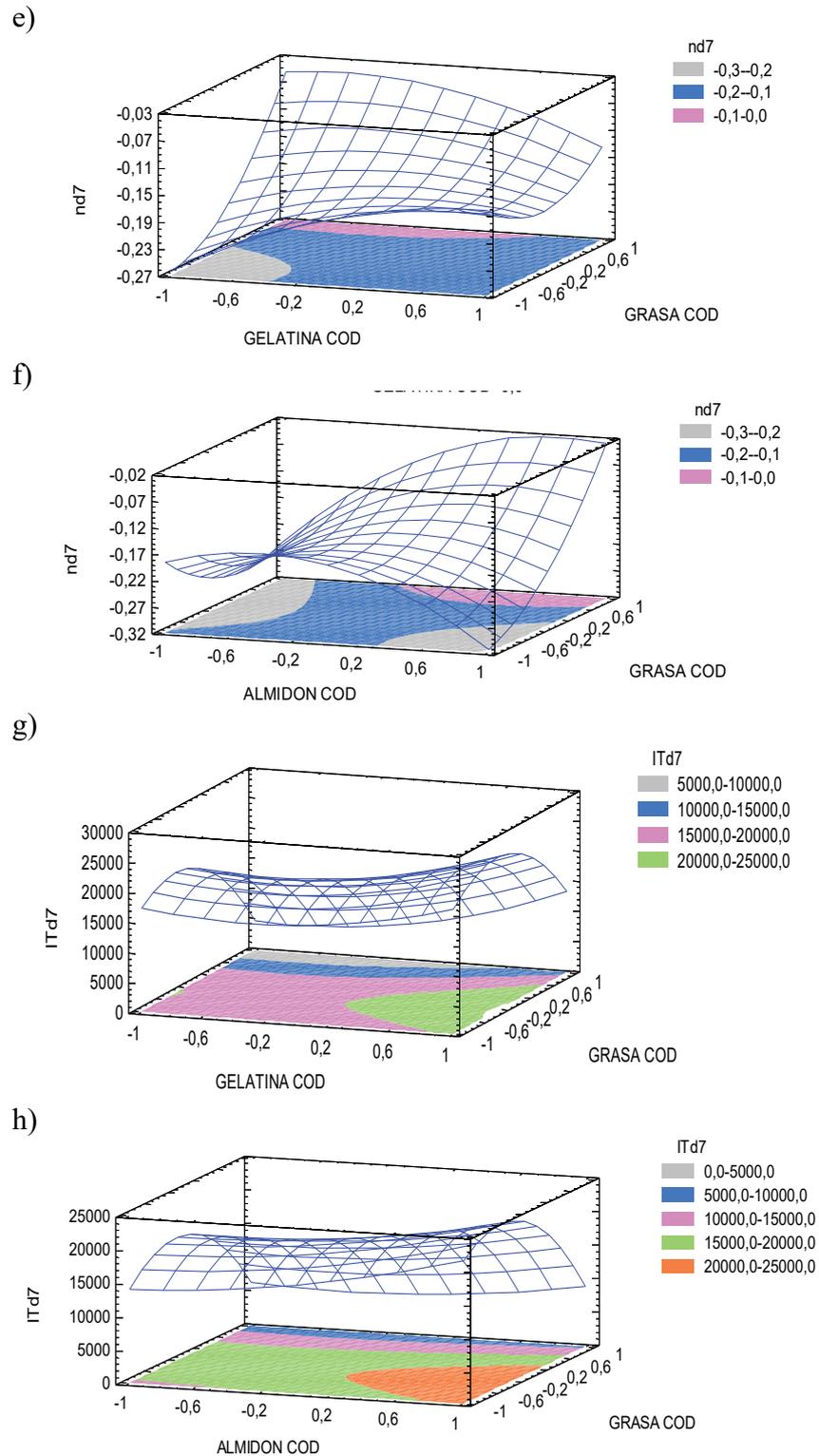


Figura 82. Gráficos de superficie de respuesta estimada al día 7 para los parámetros reológicos función del contenido de grasa y gelatina t0 a), k c), n e) y IT g) y en función del contenido de almidón y grasa en los gradientes de deformación t0b) y k d), n f) IT h).

Como se observa en la Figura 80 (a), para τ_0 , la grasa fue el factor que más influyó sobre esta respuesta, con un efecto negativo, es decir, a medida que el contenido de grasa aumenta, el valor de τ_0 tiende a ser más bajo.

Aumentar el contenido de grasa reduce t_0 , ya que las partículas grasas actúan como lubricantes en la matriz proteica, disminuyendo la fricción interna y facilitando el flujo. Según Lucey y Singh (2023), la grasa interrumpe la red proteica y genera una estructura menos rígida, disminuyendo el esfuerzo necesario para que el queso fluya. Macias-Rodriguez y Marangoni (2020) indicaron que los quesos bajos en grasa tienen esfuerzos de corte significativamente mayores debido a la falta de interrupción de la matriz proteica.

Los resultados presentados por Hesarinejad et al. (2021) han demostrado que, al igual que en el presente trabajo, el contenido de gelatina provoca un incremento en el valor de t_0 . En el caso del IT e n se ha observado una tendencia similar a los otros parámetros reológicos, donde el contenido de almidón y gelatina incrementan el valor de dichos parámetros, mientras que el contenido de grasa disminuye el valor del parámetro en todos los casos, como se observa en las Figuras 81 y 82.

3.2.7.1 Efecto en la viscosidad al día 14.

Los resultados experimentales obtenidos de viscosidad al día 14 para los gradientes de deformación 50s^{-1} , 100s^{-1} , 150s^{-1} y 200s^{-1} se presentan en la Tabla 43 y en la Tabla 44 se muestran los ANOVA correspondientes para el mismo parámetro en los diferentes días de análisis.

La viscosidad a un gradiente de deformación de 50s^{-1} se la conoce comúnmente como viscosidad de Kokini y este gradiente representa la velocidad de cizallamiento que se detecta en la boca para alimentos de baja viscosidad en una masticación normal. De ahí que se la relaciona con la sensación en la boca (*mouthfeel*) percibida sensorialmente por el consumidor y, como consecuencia, con la aceptabilidad del producto (Akhtar et al., 2006).

Como se observa en la Tabla 44, se puede apreciar que al igual que en los días 1 y 7, existe una disminución en la viscosidad a medida que incrementa el gradiente de deformación. Se ha observado aproximadamente una disminución entre el 78 y 85 %, dependiendo del tratamiento.

Tabla 45 Valores promedio obtenidos de viscosidad al día 14.

| ALMIDON COD | GELATINA COD | GRASA COD | μ 50d14 (mPa.s) | μ 100d14 (mPa.s) | μ 150d14 (mPa.s) | μ 200d14 (mPa.s) |
|----------------|-----------------|--------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 0 | 0 | 0 | 8200 ± 900 | 2700 ± 200 | 1500 ± 100 | 1090 ± 70 |
| 0 | 1 | 1 | 3400 ± 80 | 1480 ± 90 | 960 ± 40 | 710 ± 10 |
| -1 | -1 | 0 | 3800 ± 200 | 1520 ± 50 | 950 ± 30 | 700 ± 30 |
| 0 | -1 | -1 | 6275 ± 7 | 2110 ± 7 | 1200 ± 10 | 900 ± 20 |
| -1 | 0 | -1 | 4960 ± 70 | 1810 ± 80 | 1050 ± 30 | 750 ± 20 |
| 1 | 0 | 1 | 2220 ± 10 | 1090 ± 10 | 710 ± 30 | 520 ± 30 |
| 0 | -1 | 1 | 1200 ± 300 | 500 ± 100 | 330 ± 60 | 250 ± 40 |
| 1 | 1 | 0 | 11000 ± 300 | 4180 ± 80 | 2330 ± 80 | 1620 ± 40 |
| -1 | 1 | 0 | 5000 ± 300 | 1900 ± 100 | 1220 ± 80 | 900 ± 60 |
| 0 | 1 | -1 | 4000 ± 800 | 3300 ± 300 | 1650 ± 120 | 1160 ± 10 |
| 1 | 0 | -1 | 5900 ± 90 | 2300 ± 50 | 1320 ± 2 | 940 ± 30 |
| -1 | 0 | 1 | 2600 ± 300 | 1100 ± 100 | 670 ± 60 | 500 ± 30 |
| 0 | 0 | 0 | 3300 ± 300 | 1500 ± 100 | 880 ± 20 | 639,3 ± 0,4 |
| 1 | -1 | 0 | 3900 ± 700 | 1600 ± 300 | 1000 ± 200 | 700 ± 100 |
| 0 | 0 | 0 | 3700 ± 400 | 1400 ± 200 | 800 ± 80 | 620 ± 40 |

Tabla 46 Análisis de varianza de los modelos obtenidos para viscosidad en el día 14.

| Fuente | G.L | μ50d14 | μ100d14 | μ150d14 | μ 200d14 |
|---|------------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| A:ALMIDON COD | 1 | 11340000* | 1976680** | 507502** | 216791** |
| B:GELATINA COD | 1 | 16956800** | 6746560*** | 1793490*** | 856165*** |
| C:GRASA COD | 1 | 34718200*** | 7240680*** | 1685790*** | 790209*** |
| AA | 1 | 2,13E+06 | 60460,6 | 5,13E+04 | 2,69E+04 |
| AB | 1 | 17065100* | 2417420*** | 623192* | 258379** |
| AC | 1 | 847838 | 119326 | 27539,5 | 14517,8 |
| BB | 1 | 864760 | 980456* | 273702* | 139127* |
| BC | 1 | 9927620* | 23797,5 | 2,39E+04 | 21519,9 |
| CC | 1 | 20674600** | 958669* | 412707** | 202924** |
| Error puro | 32 | 3,17E+07 | 2,42E+06 | 7,12E+05 | 320258 |
| Coefficiente de determinación (R ²) | | 67,2 | 84,1 | 83,7 | 84,6 |

G.L: grados de libertad; * $p \leq 0,05$; ** $p \leq 0,01$; *** $p \leq 0,001$, valores sín * no presentan diferencias significativas.

El modelo obtenido para la viscosidad al día 14 para el gradiente de deformación $50s^{-1}$ logró explicar el 67,16 % de variabilidad de los datos. Para la viscosidad a gradiente de deformación $100s^{-1}$ el model 84,1 % de variabilidad de los datos. En el caso de la viscosidad a gradiente de deformación $150s^{-1}$ el modelo logró explicar el 83,72 % de variabilidad de los datos. Para la viscosidad a gradiente de deformación $200s^{-1}$ el modelo logró explicar el 84,56 % de variabilidad de los datos.

A continuación, se presentan los modelos reducidos obtenidos para los valores de firmeza en todos los días de estudio:

$$\mu_{50d14} = 5555,49 + 841,872xA + 1029,46xB - 1473,05xC + 1460,53xAxB + 1113,98xBxC - 1736,03xC^2$$

$$\mu_{100d14} = 1901,31 + 351,486xA + 649,353xB - 672,713xC + 549,706xAxB + 357,416xB^2 - 367,265xC^2$$

$$\mu_{150d14} = 1140,77 + 178,098xA + 334,803xB - 324,595xC + 279,104xAxB + 186,108xB^2 - 242,817xC^2$$

$$\mu_{200d14} = 821,039 + 116,402xA + 231,323xB - 222,234xC + 179,715xAxB + 132,614xB^2 - 170,415xC^2$$

El análisis de los modelos predictivos para μ al día 14 revela que la grasa fue la variable de mayor influencia en los niveles de deformación más bajos, mientras que en deformaciones más elevadas su efecto fue equiparable al de la gelatina. En μ_{50d14} , la grasa fue 1,75 veces más influyente que el almidón y 1,43 veces más que la gelatina, siendo la variable dominante. En μ_{100d14} , la grasa mantuvo el liderazgo con un impacto 1,91 veces mayor que el almidón y apenas 1,04 veces superior al de la gelatina. Sin embargo, en μ_{150d14} , la gelatina y la grasa presentaron efectos prácticamente equivalentes (334,80 vs. 324,60), con la gelatina superando al almidón en 1,88 veces. Finalmente, en μ_{200d14} , la gelatina fue la variable más influyente, superando a la grasa por un margen leve (1,04 veces) y al almidón en 1,99 veces. En todos los modelos, el almidón mostró la menor influencia. Estos resultados sugieren que, mientras la grasa tiene un rol preponderante en la resistencia frente a pequeñas deformaciones, la gelatina adquiere un protagonismo creciente conforme se incrementa la deformación, posiblemente debido a su capacidad para reforzar la red estructural en condiciones de mayor compresión.

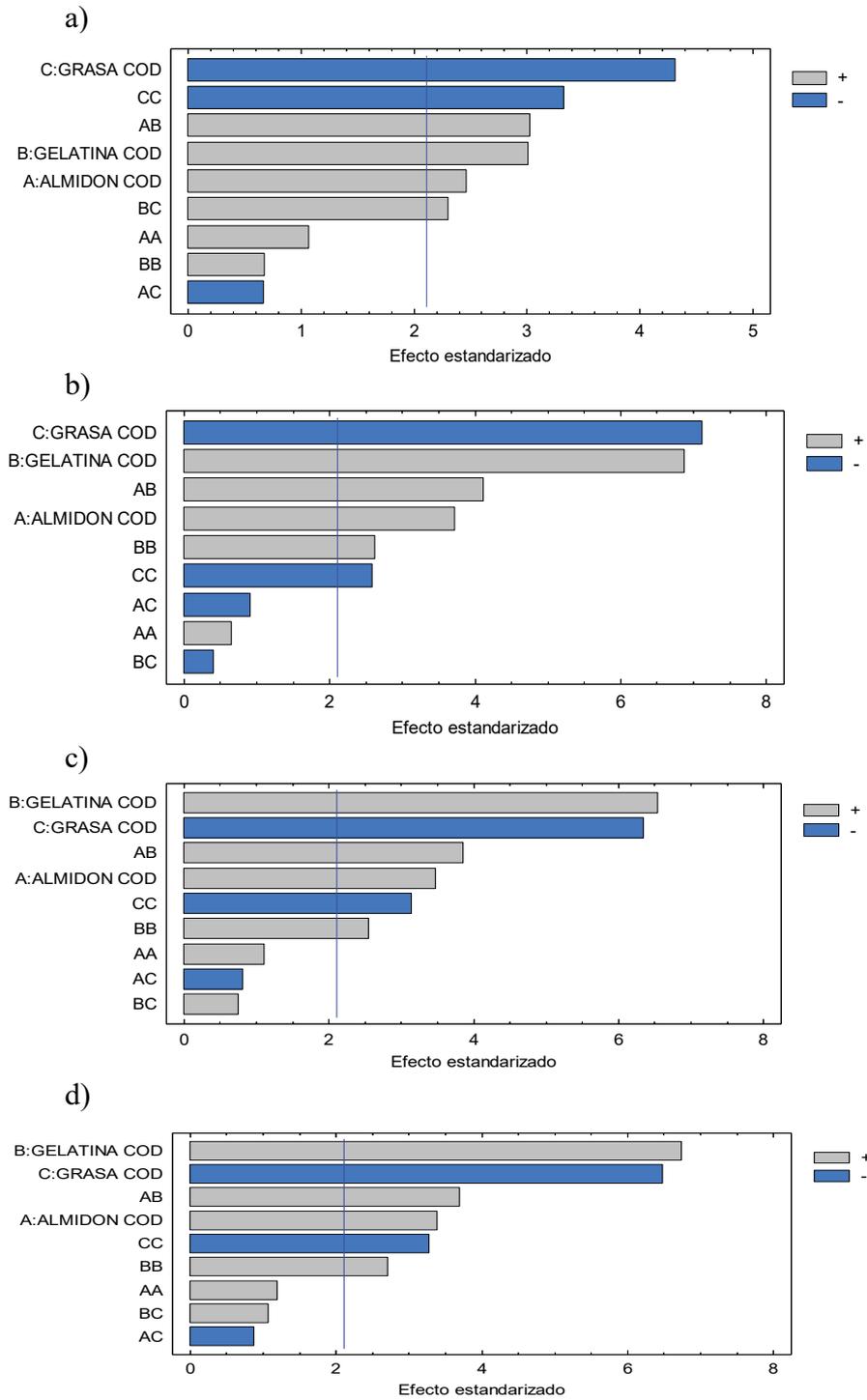


Figura 83. Diagramas de Pareto estandarizado para viscosidad al día 14 para los gradientes de deformación 50s⁻¹ a), 100s⁻¹ b), 150s⁻¹ c) y 200s⁻¹ d).

Como se observa en los gráficos de Pareto (Figura 83), los tres factores estudiados tuvieron efecto significativo sobre la viscosidad a distinto gradiente de deformación.

En el caso de viscosidades bajas (50 y 100s^{-1}), la variable que más influyó fue el porcentaje de grasa, el cual, como se ha visto en los días de análisis anteriores, tiene un efecto negativo sobre la viscosidad. Posteriormente, las variables que influyeron fueron la gelatina y el almidón. En el caso de los gradientes más elevados (150 y 200 s^{-1}), la variable que más influyó fue el contenido de gelatina, seguido del contenido de grasa y posteriormente el contenido de almidón. Esto se puede corroborar también con los coeficientes obtenidos en los modelos predictivos.

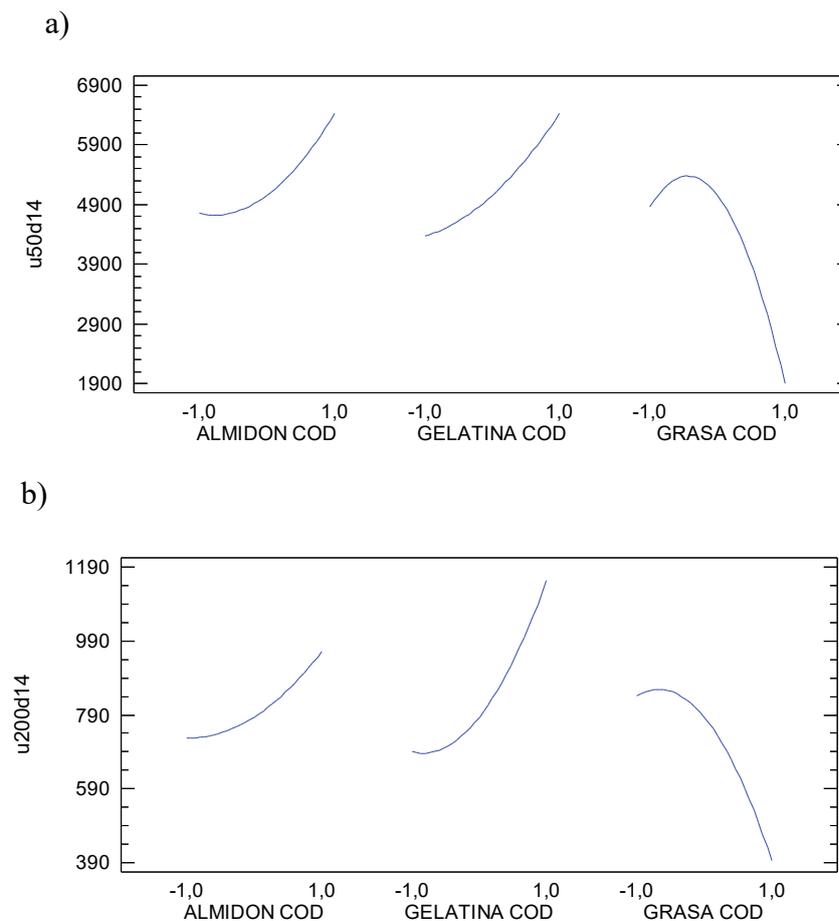
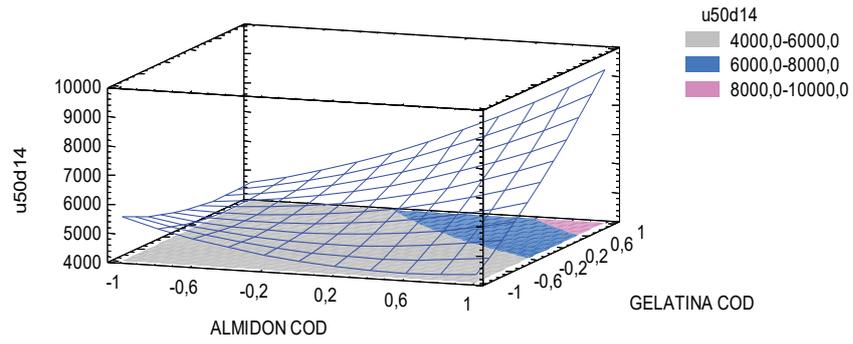


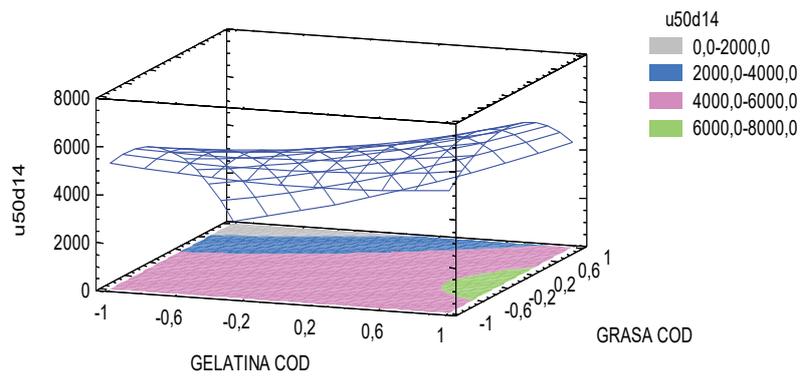
Figura 84. Gráficos de efectos principales para para viscosidad al día 14 para los gradientes de deformación 50s^{-1} a), 200s^{-1} b).

A continuación, se presentan los gráficos de superficie de respuesta para los valores de viscosidad al día 14.

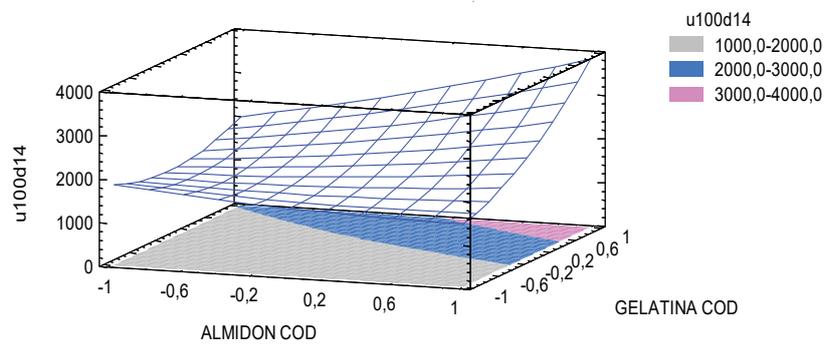
a)



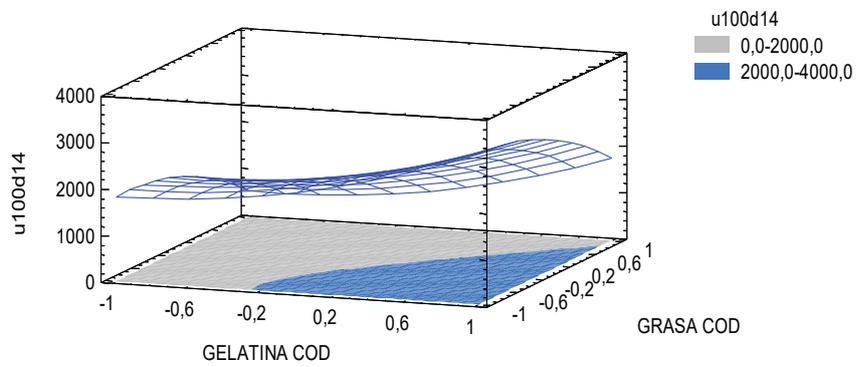
b)



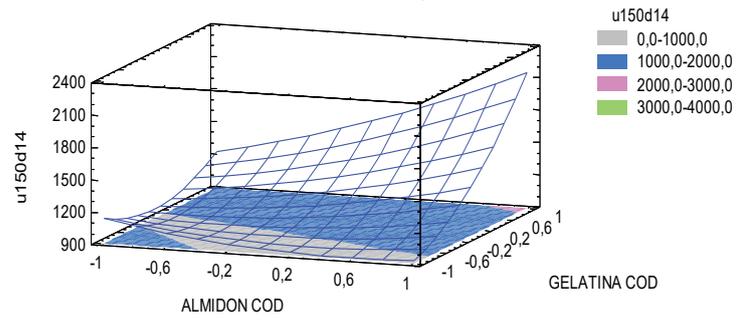
c)



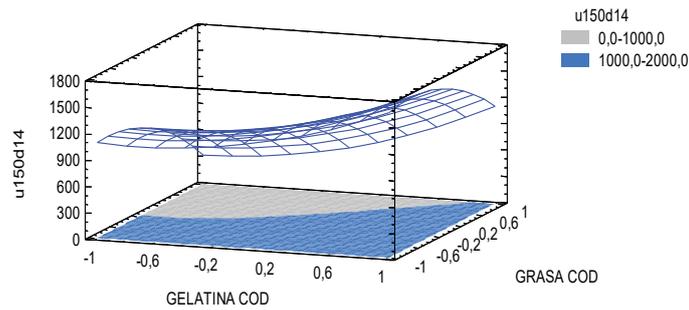
d)



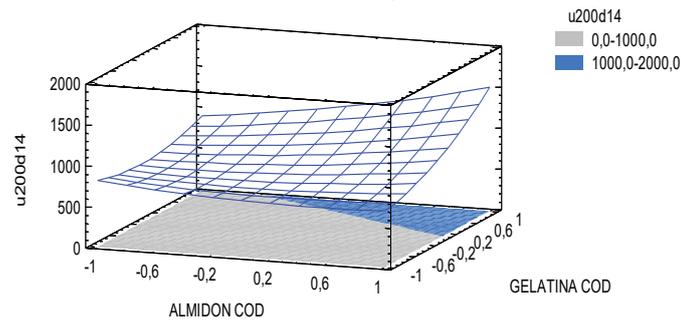
e)



f)



g)



h)

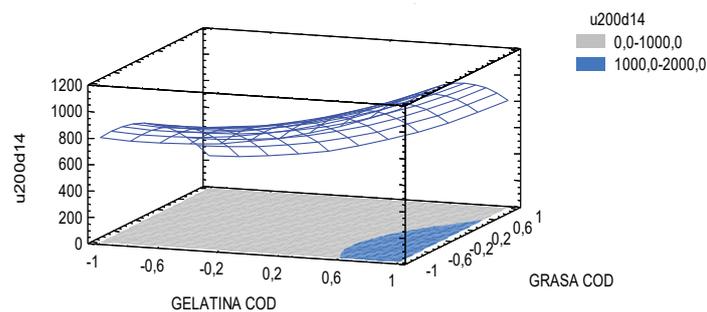


Figura 85. Gráficos de superficie de respuesta estimada para los valores de viscosidad al día 14 en función del contenido de almidón y gelatina en el para los gradientes de deformación $50s^{-1}$ a), $100s^{-1}$ c), $150s^{-1}$ e) y $200s^{-1}$ g) y en función del contenido de grasa y gelatina en los gradientes de deformación $50s^{-1}$ b) y $100s^{-1}$ d), $150s^{-1}$ f) y $200s^{-1}$ h).

Tal como lo sucedido los días 1 y 7 y como se observa en la Figura 85 (a, c, e y g), el esfuerzo de corte disminuye a medida que incrementa el gradiente de deformación como anteriormente se mencionó. Asimismo, se puede observar que, en todos los gradientes, los mayores valores de viscosidad se obtienen cuando la concentración de almidón y gelatina son los más altos, dentro del rango experimental estudiado. Por otro lado, se observa en la Figura 85 (b, d, f y h), que los valores más altos de viscosidad se obtienen cuando el contenido de gelatina es elevado y cuando el contenido de grasa es bajo.

3.2.7.1 Efecto en el τ_0 , K , n e IT al día 14.

Los resultados experimentales obtenidos para τ_0 , K , n e IT al día 14 se presentan en la Tabla 45. Asimismo, en la Tabla 46 se presentan los ANOVA correspondientes para el mismo parámetro en los diferentes días de análisis.

Como se ha mencionado, el estudio de los parámetros reológicos como el τ_0 , K , el n , y IT , es fundamental en la reología de quesos untables por varias razones relacionadas con la calidad, estabilidad, procesamiento y percepción sensorial. Según Steff (1996), el t_0 está relacionado con la estabilidad frente a la sedimentación y al colapso de la estructura. Por otra parte, K , según Barnes et al. (1989), es un indicador de la densidad y resistencia del alimento al flujo y es importante en el control de calidad y la optimización de procesos. Rao (2014) establece que n , como en el caso del presente estudio, cuando es menor a 1 da una percepción sensorial de que el producto es suave y cremoso. Además, según Mezger (2006), el índice de tixotropía es un indicador de la estabilidad estructural del alimento respecto al tratamiento mecánico y en algunos casos afecta la experiencia del consumidor al interactuar con el producto.

Tabla 47 Valores promedio obtenidos de τ_0 , k_n e IT al día 14.

| ALMIDON COD | GELATINA COD | GRASA COD | τ_{0d14} (Pa) | K_{d14} (Pa.s) | nd_{14} | ITd14 (Pa.s) |
|----------------|-----------------|--------------|-----------------------|---------------------|--------------|-----------------|
| 0 | 0 | 0 | 348000 ± 7000 | 350 ± 40 | -0,13 ± 0,01 | 19400 ± 600 |
| 0 | 1 | 1 | 290000 ± 20000 | 390 ± 40 | -0,21 ± 0,02 | 11400 ± 900 |
| -1 | -1 | 0 | 350000 ± 20000 | 630 ± 40 | -0,30 ± 0,00 | 18500 ± 900 |
| 0 | -1 | -1 | 410000 ± 20000 | 410 ± 30 | -0,12 ± 0,01 | 21300 ± 300 |
| -1 | 0 | -1 | 374000 ± 8000 | 1210 ± 60 | -0,40 ± 0,00 | 17100 ± 800 |
| 1 | 0 | 1 | 130000 ± 10000 | 180 ± 10 | -0,09 ± 0,02 | 14800 ± 600 |
| 0 | -1 | 1 | 74000 ± 3000 | 51 ± 5 | 0,00 ± 0,01 | 4600 ± 700 |
| 1 | 1 | 0 | 710000 ± 30000 | 680 ± 40 | -0,10 ± 0,01 | 24000 ± 3000 |
| -1 | 1 | 0 | 41000 ± 10000 | 720 ± 10 | -0,27 ± 0,01 | 21000 ± 1000 |
| 0 | 1 | -1 | 690000 ± 90000 | 1090 ± 20 | -0,76 ± 0,02 | 17700 ± 400 |
| 1 | 0 | -1 | 410000 ± 40000 | 1290 ± 40 | -0,39 ± 0,02 | 21200 ± 900 |
| -1 | 0 | 1 | 190000 ± 20000 | 360 ± 10 | -0,25 ± 0,03 | 9500 ± 700 |
| 0 | 0 | 0 | 350000 ± 50000 | 390 ± 10 | -0,20 ± 0,02 | 18900 ± 900 |
| 1 | -1 | 0 | 340000 ± 30000 | 470 ± 30 | 0,31 ± 0,03 | 19800 ± 800 |
| 0 | 0 | 0 | 330000 ± 20000 | 358 ± 1 | -0,13 ± 0,02 | 18000 ± 900 |

Tabla 48 Análisis de varianza de los modelos obtenidos para los parámetros reológicos al día 14 para τ_0 , k, n e IT

| Fuente | G.L | τ_{0d14} | kd14 | nd14 | ITd14 |
|---|-----|-----------------|-------------|-------------|--------------|
| A:ALMIDON COD | 1 | 1,75E+10 | 23492,8 | 0,122708*** | 81591700*** |
| B:GELATINA COD | 1 | 219374000000*** | 30943500*** | 0,204297*** | 54975300** |
| C:GRASA COD | 1 | 360323000000*** | 41042900*** | 0,299318*** | 342384000*** |
| AA | 1 | 4,58E+09 | 6992950*** | 2,53E-03 | 83946500*** |
| AB | 1 | 4,64E+10 | 8222,36 | 0,0294809** | 1,82E+07 |
| AC | 1 | 3,82E+09 | 32582,5 | 0,00961191 | 699573 |
| BB | 1 | 3,31E+10 | 10646000*** | 2,56E-03 | 19146900* |
| BC | 1 | 1,81E+09 | 51404100*** | 0,102627*** | 53880400** |
| CC | 1 | 89827300000* | 13137100*** | 0,13449*** | 136577000*** |
| Error puro | 17 | 1,93E+11 | 4,56E+06 | 3,47E-02 | 6,19E+07 |
| Coefficiente de determinación (R^2) | | 72,4 | 74,9 | 80,5 | 89,5 |

G.L: grados de libertad; * $p \leq 0,05$; ** $p \leq 0,01$; *** $p \leq 0,001$, valores sin * no presentan diferencias significativas.

El modelo obtenido para τ_0 logró explicar el 76,92 % de variabilidad de los datos. Para el k el modelo y logró explicar el 74,95 % de variabilidad de los datos. En el caso n el modelo logró explicar el 80,48 % de variabilidad de los datos. Para el IT el modelo logró explicar el 89,54 % de variabilidad de los datos.

A continuación, se presentan los modelos reducidos obtenidos para los valores de firmeza en todos los días de estudio:

$$\tau_{0d14} = 433525 + 117093xB - 150067xC - 1,16415E-10xA^2 - 5,52973E-10xBxC - 113294xC^2$$

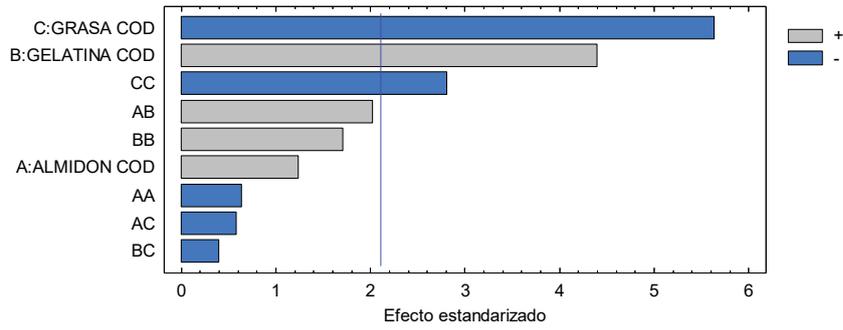
$$kd_{14} = 399,992 - 38,3184xA + 1390,67xB - 1601,62xC - 973,12xA^2 + 1200,68xB^2 - 2534,86xBxC + 1333,78xC^2$$

$$nd_{14} = -0,13745 + 0,101081xA - 0,132219xB + 0,136775xC - 0,0735xAxB + 0,113263xBxC - 0,1456xC^2$$

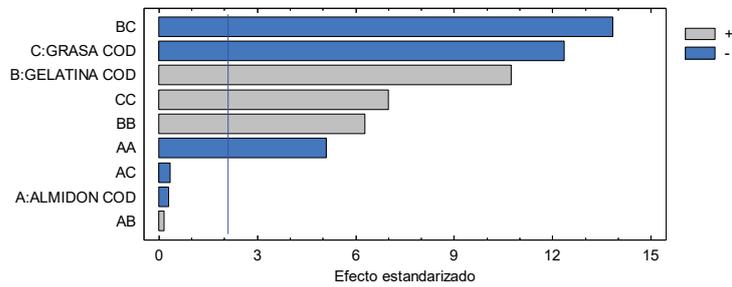
$$ITd_{14} = 16660,2 + 2258,2xA + 1853,63xB - 4625,9xC + 3621,69xA^2 + 1729,65xB^2 + 2595,2xBxC - 4619,54xC^2$$

En los modelos reológicos del día 14 (τ_0 , K , n e IT), se observó una marcada influencia de la grasa, siendo ésta la variable de mayor impacto en tres de los cuatro modelos analizados. En τ_{0d14} , la grasa presentó un coeficiente 1,28 veces mayor que el de la gelatina, evidenciando su efecto predominante en la resistencia inicial al flujo. En el modelo kd_{14} , la grasa fue la variable más influyente, superando a la gelatina en un factor de 1,15 y al almidón en 41,8 veces. En nd_{14} , aunque las diferencias entre variables fueron menores, la grasa mantuvo el mayor efecto (coeficiente 0,137), siendo 1,35 veces más influyente que el almidón y 1,04 veces que la gelatina. En el modelo ITd_{14} , la grasa volvió a dominar con un efecto 2,05 veces mayor que el almidón y 2,5 veces mayor que la gelatina. Estos resultados confirman el rol determinante de la grasa en la modulación del comportamiento viscoelástico del sistema durante esta etapa del almacenamiento, posiblemente por su capacidad de reorganizar la estructura interna de la matriz alimentaria. La gelatina mantuvo una participación relevante, especialmente en los parámetros τ_0 y k , mientras que el almidón mostró efectos considerablemente menores en todos los casos.

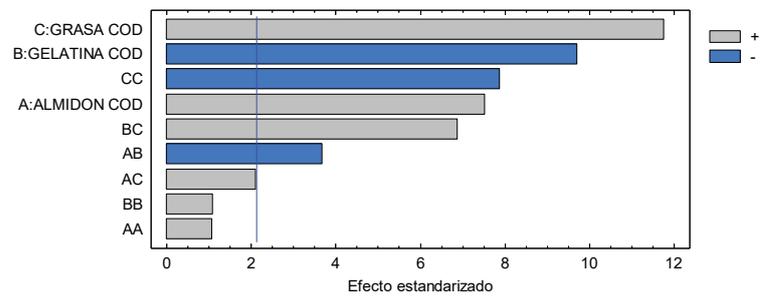
a)



b)



c)



d)

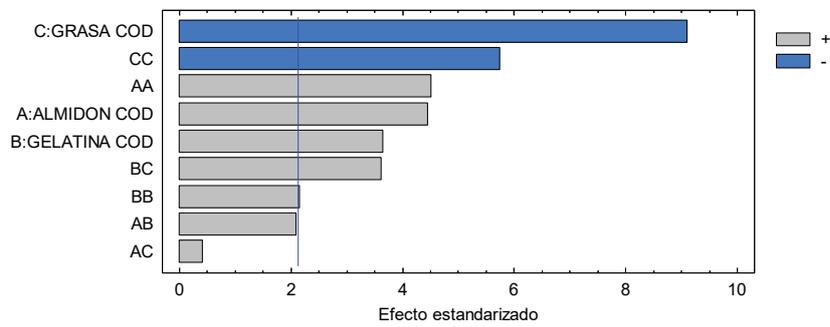


Figura 86. Diagramas de Pareto estandarizado al día 14 para τ_0 a), k b), n c) y IT d).

Como se observa en el diagrama de Pareto (Figura 86), en el caso de τ_0 , la grasa y la gelatina fueron los términos lineales que influyeron sobre esta respuesta al día 14. En el caso del índice de comportamiento, los tres factores en estudio, tuvieron un efecto significativo.

Al igual que el índice de consistencia, el índice de comportamiento a los 14 días también fue influenciado por los tres factores en estudio, siendo el contenido de grasa lo que más influye, seguido del contenido de gelatina y luego el contenido de almidón.

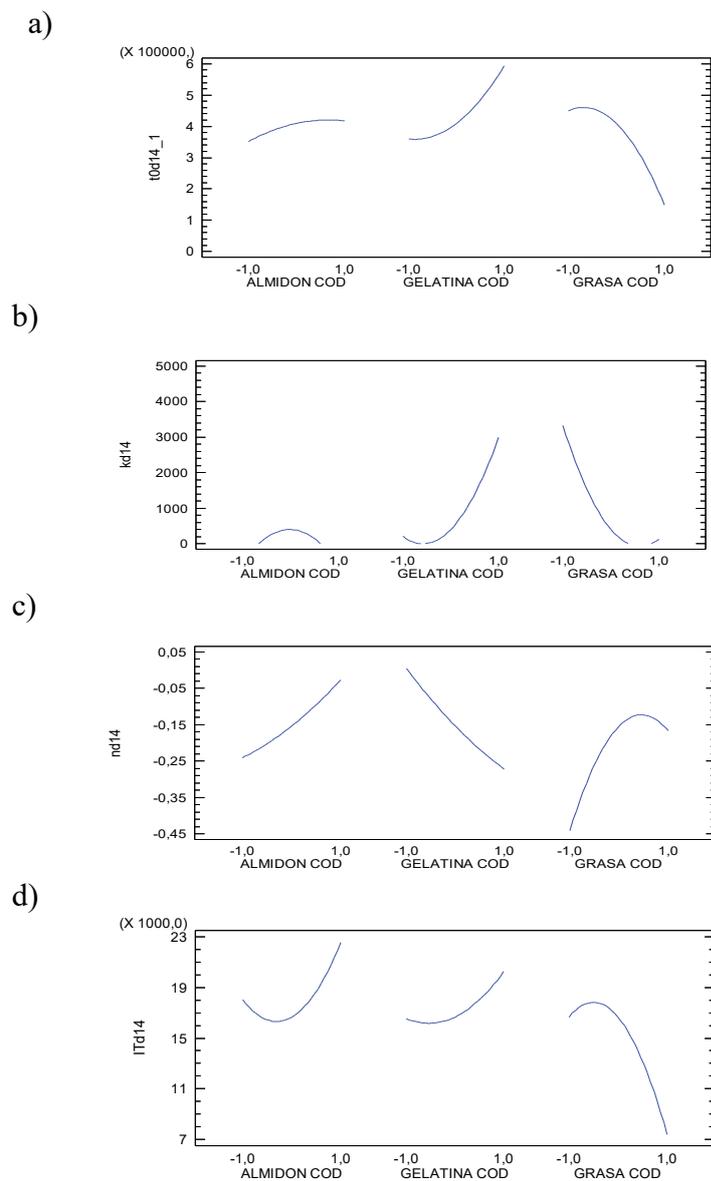
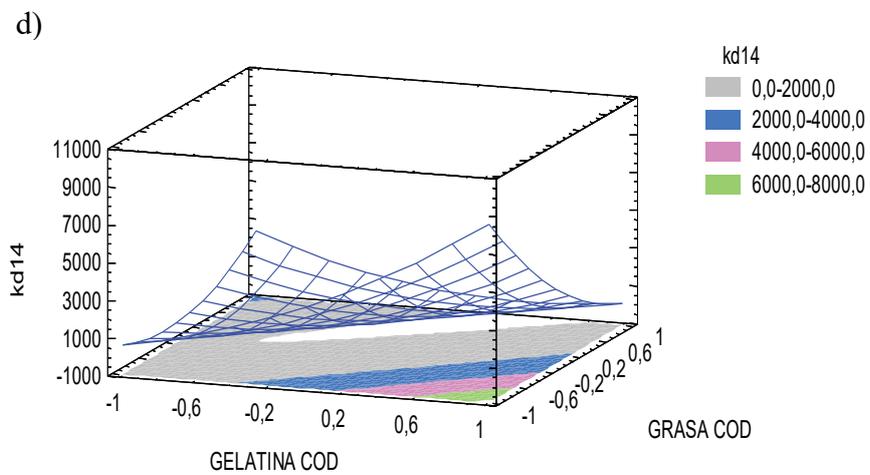
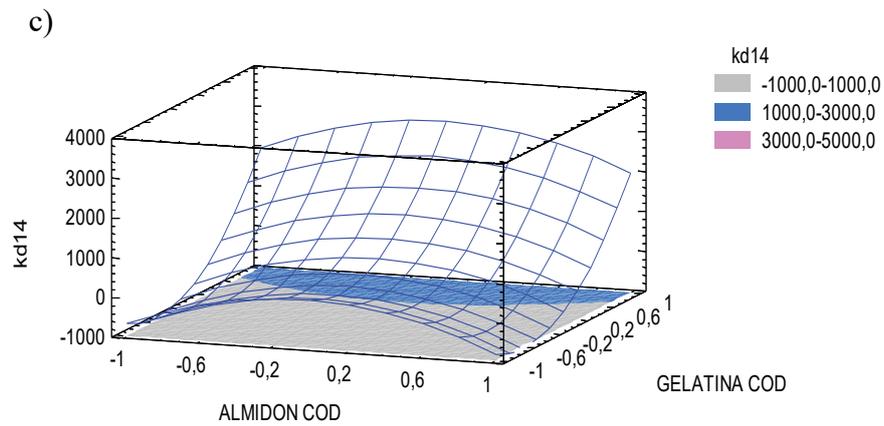
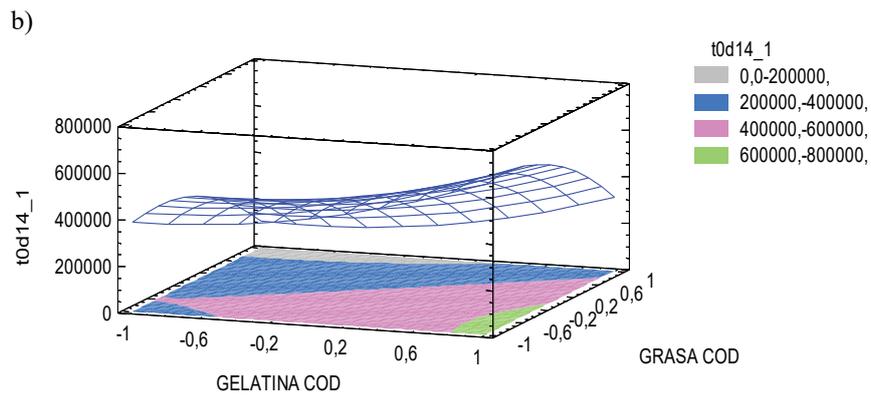
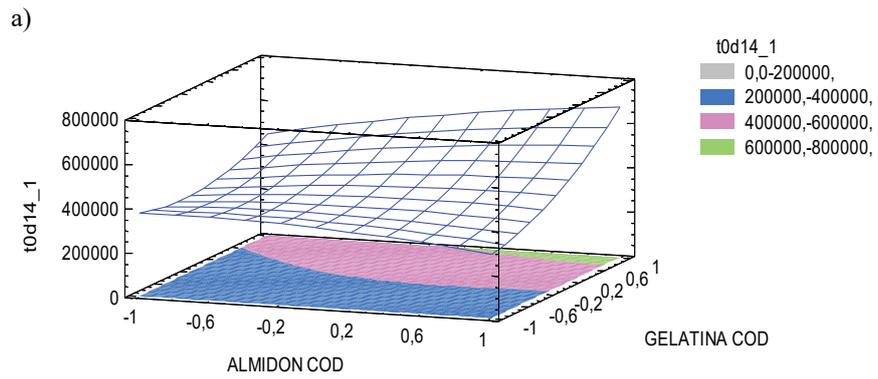
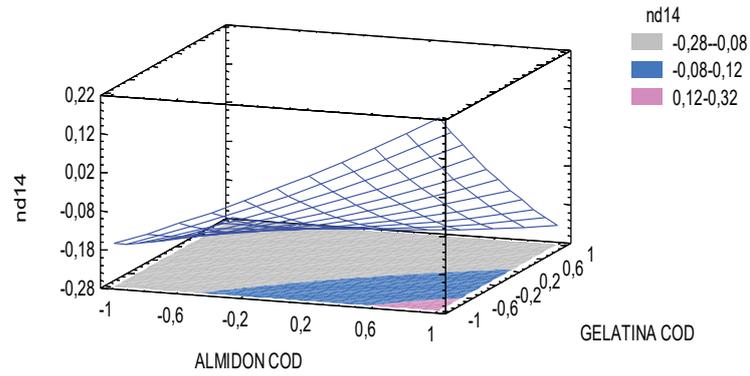


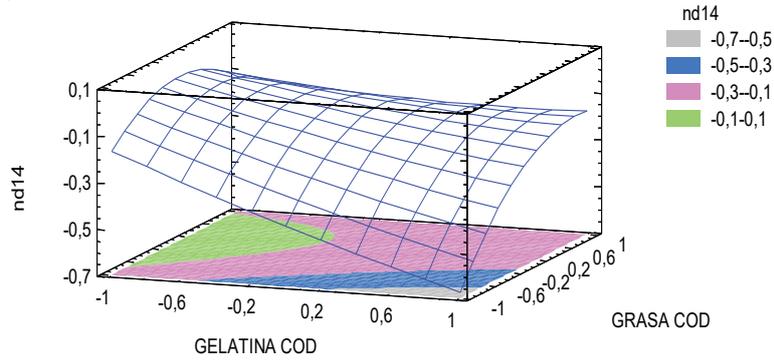
Figura 87. Gráficos de efectos principales para al día 14 para τ_0 a), k b), n c) y IT d).



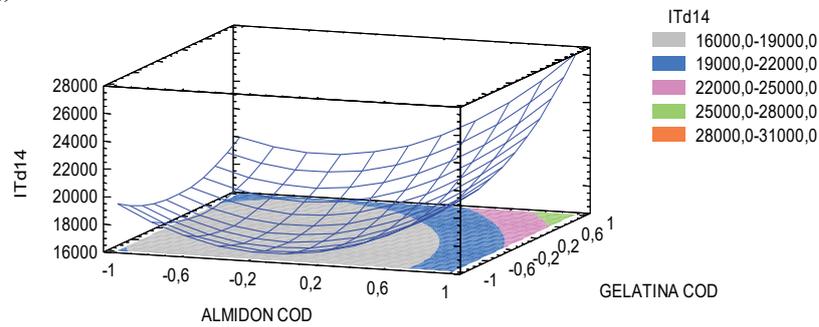
e)



f)



g)



h)

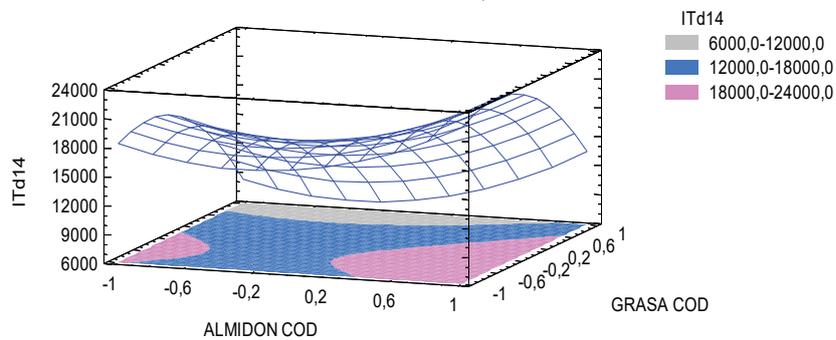


Figura 88. Gráficos de superficie de respuesta estimada al día 14 para los parámetros reológicos función del contenido de grasa y gelatina τ a), k c), n e) y IT g) y en función del contenido de almidón y grasa en los gradientes de deformación t_0 b) y k d), n f) IT h).

3.2.7.1 Efecto en la viscosidad al día 21

Los resultados experimentales obtenidos de viscosidad al día 21 para los gradientes de deformación se presentan en la Tabla 47. Asimismo, en la Tabla 48 se presentan los valores de suma de cuadrados del ANOVA correspondientes para el mismo parámetro en los diferentes días de análisis.

Tal como se observa en la Tabla 48, se evidencia una disminución de la viscosidad entre 78 y 86 % a medida que aumenta el gradiente de deformación de 50 a 200 s⁻¹.

Tabla 49 Valores promedio obtenidos de viscosidad al día 21

| ALMIDON COD | GELATINA COD | GRASA COD | μ 50d21 (mPa.s) | μ 100d21 (mPa.s) | μ 150d21 (mPa.s) | μ 200d21 (mPa.s) |
|----------------|-----------------|--------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 0 | 0 | 0 | 6200 ± 300 | 2398 ± 1 | 1470 ± 40 | 1060 ± 30 |
| 0 | 1 | 1 | 3500 ± 200 | 1600 ± 300 | 1000 ± 100 | 720 ± 60 |
| -1 | -1 | 0 | 3595 ± 9 | 1440 ± 40 | 900 ± 30 | 670 ± 30 |
| 0 | -1 | -1 | 7000 ± 400 | 2400 ± 300 | 1300 ± 100 | 940 ± 70 |
| -1 | 0 | -1 | 5000 ± 30 | 2230 ± 50 | 1210 ± 20 | 840 ± 20 |
| 1 | 0 | 1 | 2200 ± 200 | 1120 ± 50 | 710 ± 30 | 520 ± 20 |
| 0 | -1 | 1 | 1200 ± 100 | 540 ± 90 | 340 ± 60 | 260 ± 40 |
| 1 | 1 | 0 | 7000 ± 2000 | 2800 ± 500 | 1700 ± 200 | 1300 ± 200 |
| -1 | 1 | 0 | 5900 ± 400 | 2230 ± 20 | 1370 ± 40 | 959 ± 7 |
| 0 | 1 | -1 | 7900 ± 200 | 2800 ± 200 | 1570 ± 50 | 1120 ± 3 |
| 1 | 0 | -1 | 6170 ± 80 | 2700 ± 300 | 1500 ± 100 | 1010 ± 60 |
| -1 | 0 | 1 | 2680 ± 60 | 1210 ± 10 | 719 ± 5 | 523 ± 7 |
| 0 | 0 | 0 | 4000 ± 300 | 1500 ± 100 | 940 ± 40 | 700 ± 20 |
| 1 | -1 | 0 | 5000 ± 100 | 1890 ± 30 | 1140 ± 20 | 820 ± 10 |
| 0 | 0 | 0 | 3800 ± 200 | 1500 ± 300 | 900 ± 100 | 630 ± 70 |

Tabla 50 Análisis de varianza de los modelos obtenidos para viscosidad en el día 21 a los diferentes gradientes de deformación estudiados.

| Fuente | G.L | μ_{50d21} | μ_{100d21} | μ_{150d21} | μ_{200d21} |
|---|-----|---------------|----------------|----------------|----------------|
| A:ALMIDON COD | 1 | 3701970* | 454736* | 174691* | 101502* |
| B:GELATINA COD | 1 | 16179700*** | 2544640*** | 956863*** | 486784*** |
| C:GRASA COD | 1 | 68273000*** | 7952120*** | 1950510*** | 892707*** |
| AA | 1 | 4480,95 | 126177 | 46232,2 | 16227,8 |
| AB | 1 | 186815 | 7529,67 | 10168,1 | 13464,7 |
| AC | 1 | 1390860 | 1,37E+05 | 3,04E+04 | 1,49E+04 |
| BB | 1 | 5864540** | 1,69E+05 | 9,65E+04 | 5,41E+04 |
| BC | 1 | 1090460 | 1,60E+05 | 8,51E+04 | 4,10E+04 |
| CC | 1 | 3321530* | 1,32E+05 | 174677* | 1,14E+05 |
| Error puro | 16 | 7981320 | 1,70E+06 | 5,62E+05 | 2,61E+05 |
| Coefficiente de determinación (R^2) | de | 86,04 | 86,0 | 84,9 | 85,1 |

G.L: grados de libertad; * $p \leq 0,05$; ** $p \leq 0,01$; *** $p \leq 0,001$, valores *sín* * no presentan diferencias significativas.

El modelo obtenido para μ_{50d21} logró explicar el 86,04 % de variabilidad de los datos. Para μ_{100d21} el modelo logró explicar el 86,04 % de variabilidad de los datos. En el caso de μ_{150d21} el modelo logró explicar el 84,89 % de variabilidad de los datos. Para μ_{200d21} el modelo logró explicar el 85,06 % de variabilidad de los datos.

A continuación, se presentan los modelos reducidos obtenidos para los valores de firmeza en todos los días de estudio:

$$\mu_{50d21} = 4673,78 + 490,124xA + 1040,32xB - 2065,69xC + 896,288xB^2 - 672,433xC^2$$

$$\mu_{100d21} = 1887,89 + 168,585xA + 398,798xB - 704,987xC$$

$$\mu_{150d21} = 1208,6 + 104,49xA + 244,548xB - 349,152xC - 167,615xC^2$$

$$\mu_{200d21} = 874,945 + 79,6483xA + 174,425xB - 236,208xC - 133,47xC^2$$

Como se observa en los coeficientes de los modelos predictivos obtenidos y que coinciden con las gráficas de Pareto (Figura 89) y el ANOVA presentado, la variable que más influyó sobre la viscosidad a los 21 días de análisis fue el contenido de grasa, seguido del contenido de gelatina y el contenido de almidón.

El análisis de los modelos predictivos para la viscosidad al día 21 muestra un claro efecto de la grasa, codificada como la variable más influyente en todos los niveles de deformación evaluados, seguida por la gelatina, mientras que el almidón evidenció el menor impacto relativo. En el modelo μ_{50d21} , la grasa presentó un efecto 4,2 veces mayor que el almidón y 1,99 veces superior al de la gelatina. En μ_{100d21} , la grasa fue 4,2 veces más influyente que el almidón y 1,77 veces que la gelatina. En μ_{150d21} , los efectos relativos se mantuvieron: la grasa superó al almidón en 3,3 veces y a la gelatina en 1,43 veces. Finalmente, en μ_{200d21} , la grasa tuvo un efecto 3 veces mayor que el almidón y 1,35 veces más alto que la gelatina. Estos resultados indican que, hacia el final del almacenamiento, la grasa ejerce un efecto estructural dominante en la respuesta al esfuerzo de corte, independientemente de la deformación aplicada. Esta influencia puede estar relacionada con el reacomodo de fases lipídicas dentro de la matriz, lo cual podría generar una mayor resistencia mecánica al flujo o deformación, en comparación con los efectos estabilizantes y gelificantes aportados por la gelatina.

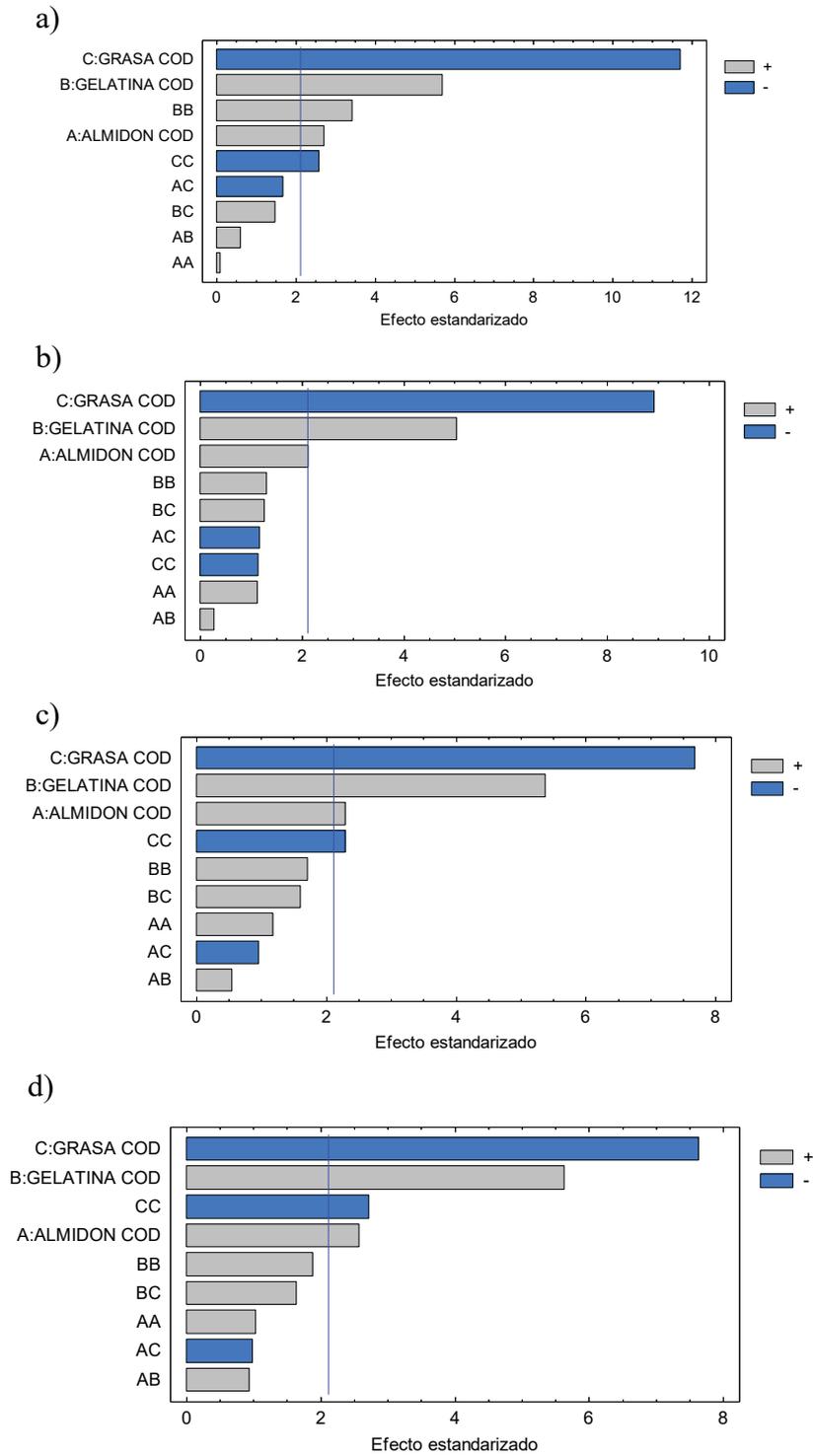


Figura 89. Diagramas de Pareto estandarizado para viscosidad al día 21 para los gradientes de deformación 50s⁻¹ a), 100s⁻¹ b), 150s⁻¹ c) y 200s⁻¹ d).

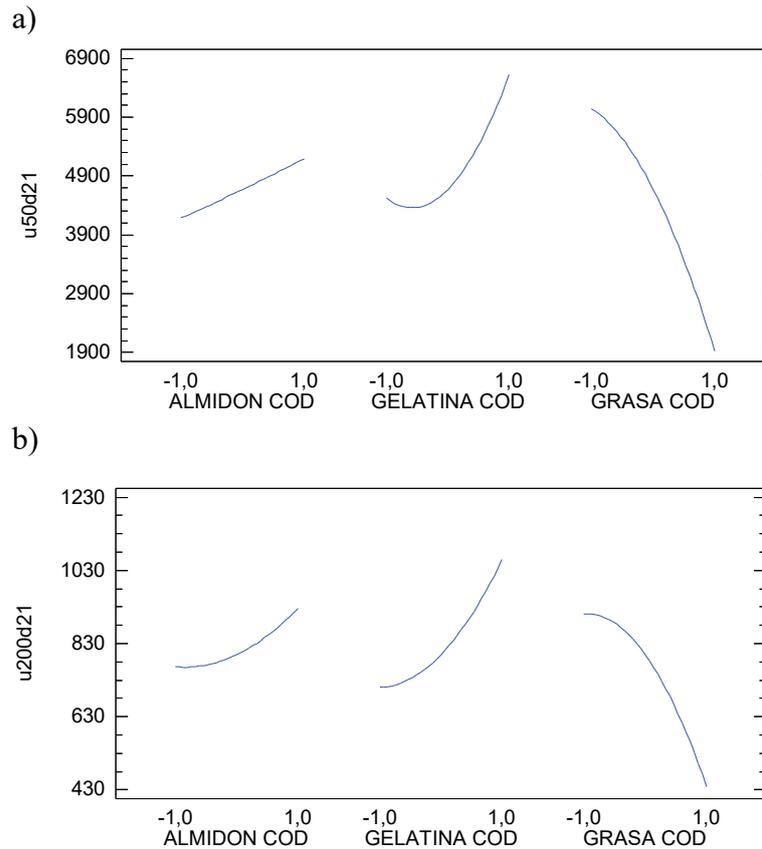


Figura 90. Gráfica de efectos principales para para viscosidad al día 21 para los gradientes de deformación 50s^{-1} a), 200s^{-1} b).

Se puede observar que, al igual que los anteriores días de análisis, tanto el contenido de gelatina como de almidón generan un efecto positivo sobre la viscosidad, es decir, que a medida que se incrementan estos hidrocoloides en la formulación de los quesos untables, la viscosidad también aumenta. Por el contrario, el contenido de grasa tiene un efecto inverso, es decir, a medida que esta aumenta, la viscosidad es más baja (Figura 90).

En el caso del día 21 de análisis, no se observaron interacciones significativas entre ninguno de los factores estudiados sobre la viscosidad a distinto gradiente de deformación.

3.2.7.1 Efecto en el τ_0 , k , n e IT al día 21

Los resultados experimentales obtenidos para τ_0 , k , n e IT al día 21 se presentan en la Tabla 49. Además, en la Tabla 50 se presentan los valores de suma de cuadrado del ANOVA correspondientes para el mismo parámetro en los diferentes días de análisis.

Tabla 51 Valores promedio obtenidos τ_0 , k, n e IT al día 21.

| ALMIDON COD | GELATINA COD | GRASA COD | τ_{0d21} (Pa) | | Kd21 (Pa.s) | | | nd21 | | ITd21 (Pa.s) | |
|----------------|-----------------|--------------|-----------------------|----------|----------------|-------|-------|--------|-------|-----------------|--|
| 0 | 0 | 0 | 510000 | ± 30000 | 1050 | ± 70 | -0,31 | ± 0,01 | 29600 | ± 400 | |
| 0 | 1 | 1 | 330000 | ± 30000 | 550 | ± 20 | -0,27 | ± 0,00 | 11900 | ± 700 | |
| -1 | -1 | 0 | 321000 | ± 5000 | 560 | ± 40 | -0,28 | ± 0,01 | 17400 | ± 100 | |
| 0 | -1 | -1 | 550000 | ± 30000 | 370 | ± 20 | -0,09 | ± 0,03 | 24200 | ± 200 | |
| -1 | 0 | -1 | 475000 | ± 7000 | 2200 | ± 70 | -0,49 | ± 0,00 | 23600 | ± 500 | |
| 1 | 0 | 1 | 141000 | ± 5000 | 203 | ± 9 | -0,13 | ± 0,00 | 8300 | ± 500 | |
| 0 | -1 | 1 | 78000 | ± 4000 | 50 | ± 10 | 0,03 | ± 0,04 | 4700 | ± 200 | |
| 1 | 1 | 0 | 460000 | ± 10000 | 1000 | ± 70 | -0,23 | ± 0,02 | 29600 | ± 900 | |
| -1 | 1 | 0 | 425000 | ± 4000 | 650 | ± 40 | -0,23 | ± 0,01 | 24500 | ± 200 | |
| 0 | 1 | -1 | 640000 | ± 30000 | 4830 | ± 40 | -0,60 | ± 0,03 | 26200 | ± 500 | |
| 1 | 0 | -1 | 550000 | ± 30000 | 2500 | ± 100 | -0,48 | ± 0,00 | 24700 | ± 500 | |
| -1 | 0 | 1 | 170000 | ± 10000 | 520 | ± 10 | -0,31 | ± 0,00 | 10100 | ± 300 | |
| 0 | 0 | 0 | 290000 | ± 10000 | 410 | ± 40 | -0,21 | ± 0,01 | 14500 | ± 800 | |
| 1 | -1 | 0 | 700000 | ± 300000 | 840 | ± 10 | -0,31 | ± 0,00 | 24600 | ± 400 | |
| 0 | 0 | 0 | 300000 | ± 20000 | 200 | ± 20 | -0,06 | ± 0,01 | 18200 | ± 800 | |

Tabla 52 Análisis de varianza de los modelos obtenidos para los parámetros reológicos al día 21 τ_0 , k, n e IT.

| Fuente | G.L | τ_{0d21} | Kd21 | nd21 | ITd21 |
|---|-----|-----------------|-------------|--------------|--------------|
| A:ALMIDON COD | 1 | 1,05E+10 | 529581 | 0,00055015 | 61987200* |
| B:GELATINA COD | 1 | 74624700000** | 8429080*** | 0,0116696* | 171198000** |
| C:GRASA COD | 1 | 559374000000*** | 10737000*** | 0,0775162*** | 979823000*** |
| AA | 1 | 2,86E+08 | 273872 | 0,00093627 | 68198700* |
| AB | 1 | 8,37E+08 | 378386 | 0,00263249 | 7,00E+06 |
| AC | 1 | 5,50E+09 | 4366,71 | 0,014904** | 1,75E+06 |
| BB | 1 | 2,30E+10 | 257211 | 0,00131065 | 84274500* |
| BC | 1 | 1,20E+10 | 7806590*** | 5,22E-02 | 1,34E+07 |
| CC | 1 | 4,71E+09 | 2818440** | 0,0300729*** | 209979000*** |
| Falta de ajuste | 3 | 1,09E+10 | 4488800** | 0,110794*** | 155371000* |
| Error puro | 32 | 8,27E+10 | 3,89E+06 | 1,68E-02 | 1,60E+08 |
| Coefficiente de determinación (R^2) | | 88,02 | 81,6 | 71,5 | 82,9 |

G.L: grados de libertad; * $p \leq 0,05$; ** $p \leq 0,01$; *** $p \leq 0,001$, valores sin * no presentan diferencias significativas.

El modelo obtenido para τ_0 logró explicar el 88,92 % de variabilidad de los datos. Para K el modelo 81,58 % de variabilidad de los datos. En el caso del n el modelo logró explicar el 71,48 % de variabilidad de los datos. Para elIT el modelo logró explicar el 82,91 % de variabilidad de los datos.

A continuación, se presentan los modelos reducidos obtenidos para los valores los parámetros reológicos al día 21:

$$\tau_{0d21} = 376344 + 73083,3xB - 186978xC$$

$$Kd_{21} = 744,959 + 715,167xB - 1047,68xC - 987,838xBxC + 677,086xC^2$$

$$nd_{21} = -0,276929 + 0,00857788xA - 0,0340023xB + 0,0881493xC + 0,0431625xAxC + 0,121489xBxC - 0,0783653xC^2$$

$$ITd_{21} = 18822,5 + 1978,97xA + 3345,33xB - 7825,53xC + 3113,01xA^2 + 3470,04xB^2 - 5526,8xC^2$$

Como se observa en los modelos predictivos obtenidos, en el caso de τ_0 y K, únicamente el contenido de grasa y de gelatina influyeron sobre el esfuerzo inicial. En este segundo caso, se observa que la interacción entre el contenido de grasa y gelatina tiene un efecto negativo sobre K. En el caso del n, también se observa influencia significativa por el contenido de grasa seguida del contenido de gelatina. Sin embargo, en este caso se observó que la interacción entre estas dos variables tiene un efecto positivo sobre esta respuesta, en este caso, la gelatina presenta un efecto negativo y esto se debe a que mientras más bajo es este valor, el queso tiene un comportamiento no newtoniano en mayor medida. Wang et al. (2024) también encontraron que el queso untable exhibe un comportamiento de Herschel–Bulkley, con un esfuerzo de fluencia (τ_0) claramente definido y un índice de flujo bajo que indica un comportamiento *shear-thinning*.

En el caso del índice de tixotropía se observó que los tres factores tuvieron un efecto sobre esta respuesta, presentando el almidón y la gelatina un efecto positivo, mientras que la grasa presentó un efecto negativo. En el modelo τ_{0d21} , la grasa presentó un efecto 2,56 veces superior al de la gelatina, reflejando su impacto sustancial sobre la resistencia inicial al flujo. En kd_{21} , la grasa fue 1,46 veces más influyente que la gelatina. Esta tendencia se mantuvo en ITd_{21} , donde la grasa superó al almidón en 3,95 veces y a la

gelatina en 2,34 veces. En el modelo nd21, aunque las magnitudes fueron más bajas, la grasa también fue la variable más influyente, con un coeficiente 10,3 veces mayor que el almidón y 2,6 veces superior al de la gelatina. En todos los casos, el almidón representó la menor contribución relativa. Estos resultados refuerzan la evidencia de que la grasa es un factor crítico en la modulación de las propiedades viscoelásticas y estructurales del sistema, principalmente en etapas avanzadas de almacenamiento, posiblemente por su capacidad de modificar la cohesión interna de la matriz y alterar la resistencia al flujo y a la deformación.

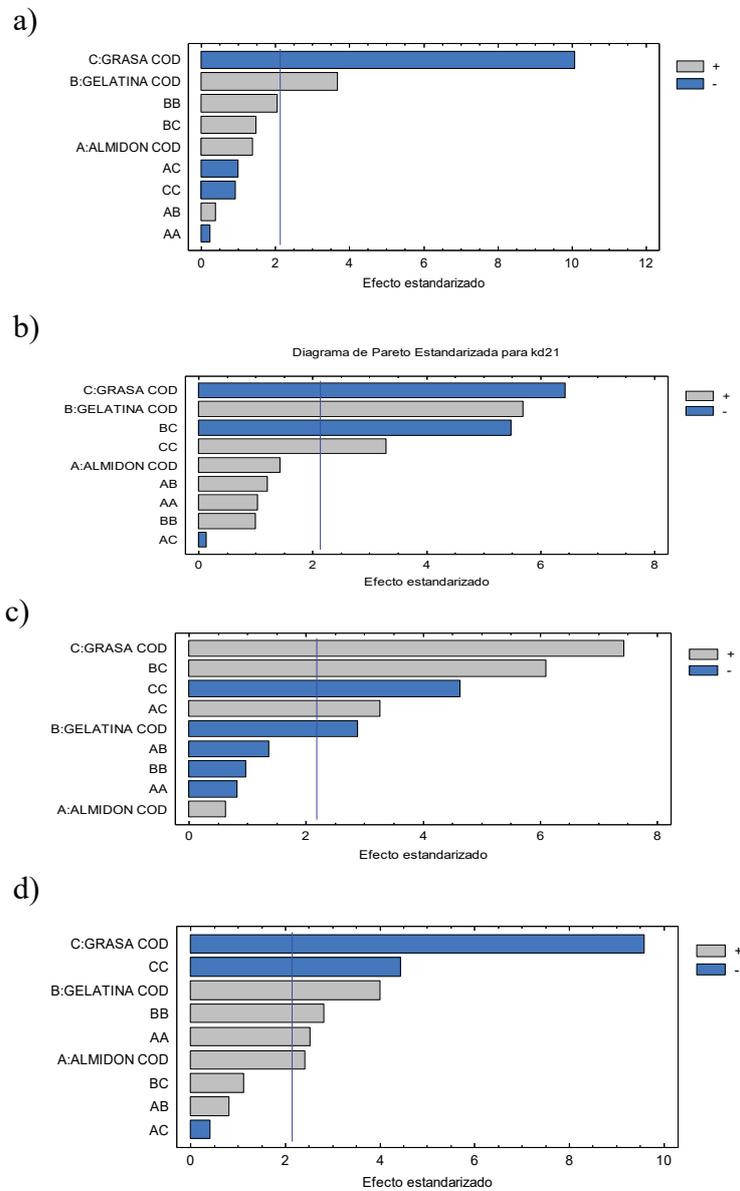


Figura 91. Diagramas de Pareto estandarizado al día 21 para τ_0 a), k b), n c) y IT d).

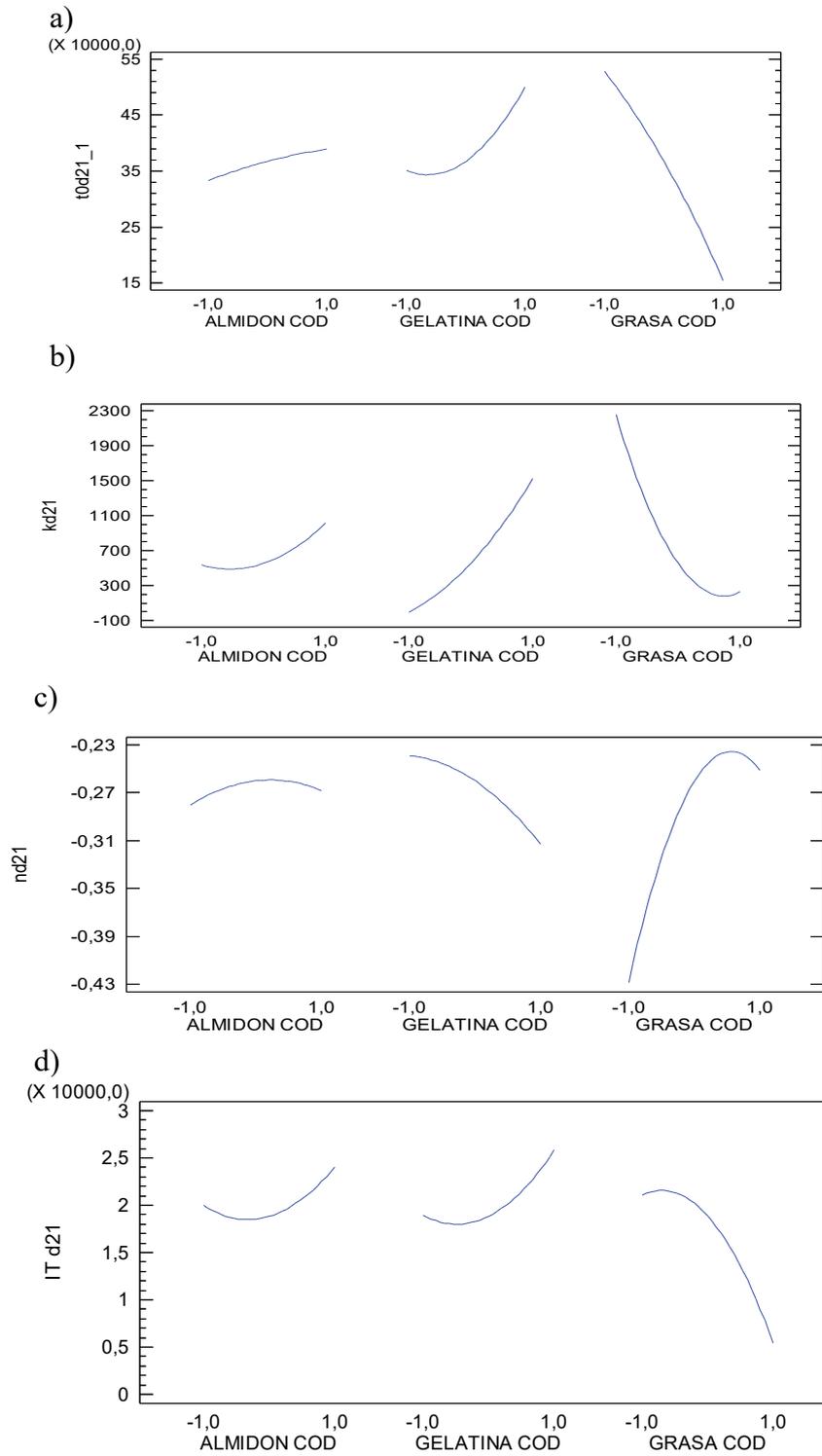


Figura 92. Gráficos de efectos principales para para viscosidad al día 21 para los parámetros reológicos τ_0 a), k b), n c) y IT d).

Durante la vida útil del queso, sus parámetros reológicos que describen su comportamiento mecánico y textural experimentaron efectos significativos debido a procesos bioquímicos y fisicoquímicos. Estos efectos varían según el tipo de queso, su composición y las condiciones de almacenamiento.

A medida que avanza la vida útil, la firmeza del queso untable tiende a aumentar debido a la sinéresis (pérdida de agua) y a la reorganización de la red proteica. Este fenómeno provoca un incremento en τ_0 , disminuyendo la capacidad de untado del producto (Bayarri et al., 2012). En estudios realizados en quesos procesados, se ha observado una disminución de los parámetros reológicos en productos con alto contenido de grasa, lo que indica una menor resistencia a la deformación (Guneser et al., 2023). La estabilidad de las propiedades reológicas de los quesos untables está influenciada por factores como la composición química, las técnicas de procesamiento y las condiciones de almacenamiento. Un control adecuado de estos factores es crucial para mantener la calidad del producto durante su vida útil (Ramírez-López et al., 2012; Delmonte et al., 2022).

3.3 DETERMINACIÓN DE LAS CONDICIONES ÓPTIMAS DE PROCESO

Para la determinación de las condiciones óptimas de proceso de quesos untables con lactosuero, se utilizó la metodología de optimización de respuestas múltiples, tal como se indicó en la sección 2.2.3.2. Las respuestas seleccionadas corresponden a los parámetros reológicos, texturales y colorimétricos. Para cada uno se fijó como objetivo, es decir, valores deseados, los resultados obtenidos en la caracterización del queso CasanCrem Clásico. Además, se otorgó mayor impacto a los parámetros reológicos y texturales, debido a que son parámetros claves para obtener características semejantes a las del producto de referencia.

En la Tabla 51 se presentan los resúmenes de las respuestas utilizadas para la optimización múltiple y los objetivos fijados en la función de deseabilidad de Derringer. También se presentan los valores mínimos y máximos obtenidos experimentalmente para las respuestas seleccionadas.

Tabla 53 Valores mínimos y máximos observados, objetivos e impactos de cada una de las respuestas utilizados para la optimización de respuestas múltiples.

| Respuesta | Mínimo observado | Máximo observado | Objetivo | Impacto |
|------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------|----------------|
| μ_{50} | 2005,7 | 11419,9 | 8546,7 | 5,00 |
| μ_{100} | 917,2 | 4240,7 | 3985,9 | 5,00 |
| μ_{150} | 586,5 | 2482,2 | 2481,7 | 5,00 |
| μ_{200} | 431,0 | 1810,5 | 1807,4 | 5,00 |
| K | 207,3 | 988,2 | 700,3 | 5,00 |
| Firmeza | 67,1 | 175,7 | 67,6 | 5,00 |
| Consistencia | 1454,7 | 4045,1 | 1582,4 | 5,00 |
| Cohesividad | -100,3 | -42,6 | -60,1 | 5,00 |
| Adhesividad | -231,3 | -99,2 | -142,6 | 5,00 |
| L* | 86,3 | 93,0 | 92,9 | 3,00 |
| b* | 13,9 | 18,7 | 16,2 | 3,00 |

El valor máximo de deseabilidad obtenido y las concentraciones de almidón, gelatina y grasa requeridas para alcanzar las condiciones óptimas se presentan en la Tabla 52.

Tabla 54 Valor de deseabilidad y valores óptimos de concentración de almidón, gelatina y grasa.

| Factor | Bajo | Alto | Óptimo | Valores en % obtenidos por interpolación |
|---------------|-------------|-------------|--------------------------------|---|
| | | | Deseabilidad = 0,60 | |
| Almidón COD | -1 | 1 | 0,10 | 0,7 |
| Gelatina COD | -1 | 1 | -0,31 | 0,6 |
| Grasa COD | -1 | 1 | 0 | 15 |

3.4 VALIDACIÓN DE LOS MODELOS OBTENIDOS

Se procedió a validar los modelos obtenidos procesando quesos untables con adición de lactosuero tal como se indicó en la sección 2.2.5 y con las concentraciones de almidón, gelatina y contenido de grasa obtenidas de la optimización de respuesta múltiples. En la Tabla 53 se presentan los valores de las respuestas predichas y experimentales para el queso obtenido en las condiciones optimizadas (almidón COD: 0,1; gelatina COD: -0,31 y grasa COD: 0,0) los cuales equivalen a 0,72%, 0,64% y 15%, respectivamente.

Tabla 55 Valores de las respuestas predichas y experimentales para el queso obtenido en las condiciones de optimización.

| Respuesta | Valor Predicho | Intervalos de confianza | | Valor Experimental |
|--------------|----------------|-------------------------|--------|--------------------|
| μ_{50} | 4811,1 | 3668,9 | 5953,2 | 4704,5 |
| μ_{100} | 1698,4 | 1382,7 | 2013,9 | 1502,5 |
| μ_{150} | 10014,2 | 843,1 | 1185,3 | 901,2 |
| μ_{200} | 732,0 | 617,3 | 846,8 | 657,9 |
| K | 169,7 | -362,5 | 502,9 | 256,5 |
| Firmeza | 59,9 | 55,1 | 64,7 | 57,2 |
| Consistencia | 1363,3 | 1262,5 | 1464,0 | 1300,2 |
| Cohesividad | -37,6 | -39,5 | -35,6 | -38,0 |
| Adhesividad | -83,2 | -88,8 | -77,6 | -84,6 |
| L* | 88,6 | 88,4 | 88,9 | 88,7 |
| b* | 17,8 | 17,7 | 17,8 | 17,8 |

Como se puede observar en la Tabla 53, todos los valores experimentales obtenidos para validar cada uno de los modelos en las condiciones optimizadas no difieren de los valores predichos y además se encuentran dentro de los intervalos de confianza, por lo cual se aceptan los modelos obtenidos. K está dentro del intervalo de confianza, pero el experimental difiere en más del triple respecto del predicho.

3.5 FORTIFICACIÓN A PARTIR DE LA VALIDACIÓN

Para incrementar el poder saludable de los quesos untables obtenidos con la adición de lactosuero, se usaron diferentes fuentes de hierro con el fin de fortificar dicha matriz

alimenticia. Por lo que se usaron dos fuentes diferentes de hierro: Hierro amino quelado (T02) y pirofosfato férrico (T03). El tratamiento testigo será la formulación óptima y validada sin agregado de hierro (T01). Todos los fortificantes fueron provistos por la empresa Nutralia (Argentina).

Para observar diferencias significativas entre los diferentes tratamientos realizados, se realizó un ANOVA simple para cada una de las respuestas analizadas.

3.5.1 Efecto sobre el pH

Como se muestra en la Tabla 54, se observaron diferencias significativas en la estabilidad del pH entre las muestras ($p < 0,05$). Con respecto a T01, el pH inicial fue de $4,74 \pm 0,01$, aumentando ligeramente a $4,86 \pm 0,05$ al día 7 y manteniéndose en $4,77 \pm 0,00$ y $4,78 \pm 0,01$ en los días 14 y 21, respectivamente. Este comportamiento sugiere una estabilidad relativa del pH en el producto no fortificado. En el caso de T02, el pH se mantuvo constante en $5,03 \pm 0,01$ durante todo el período de almacenamiento indicando que la adición de este fortificante no afectó significativamente este parámetro del queso untable. Con respecto a T03 el pH inicial fue de $4,98 \pm 0,01$, y aumentó ligeramente a $5,04 \pm 0,01$ al día 7, estabilizándose en $5,06 \pm 0,01$ en los días 14 y 21. En ese sentido, se puede pensar que la incorporación de pirofosfato férrico podría influir en el pH del producto durante el almacenamiento. Gómez Huamaní y Terres Quispe (2023) estudiaron la fortificación de leche pasteurizada y queso andino con pirofosfato férrico liposomal, observando que la adición de este compuesto puede influir en parámetros como el pH. Esto respalda la hipótesis de que el tipo de hierro utilizado tiene un impacto directo en las características fisicoquímicas del queso untable.

Tabla 56 Efecto del fortificante férrico sobre el pH.

| TRATAMIENTO | pHd1 | pHd7 | pHd14 | pHd21 |
|-------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| T01 | 4,74 ± 0,01 ^{aA} | 4,86 ± 0,03 ^{aAB} | 4,77 ± 0,00 ^{aAB} | 4,78 ± 0,01 ^{aB} |
| T02 | 5,03 ± 0,01 ^{bA} | 5,04 ± 0,00 ^{bbB} | 5,04 ± 0,00 ^{bbB} | 5,04 ± 0,00 ^{bbB} |
| T03 | 4,98 ± 0,01 ^{cA} | 5,04 ± 0,01 ^{bbB} | 5,06 ± 0,01 ^{bbB} | 5,06 ± 0,01 ^{bbB} |

T01: Tratamiento testigo; T02: Hierro amino; T03: Pirofosfato férrico. Letras minúsculas diferentes en la misma columna representan diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos ($p < 0,05$), Letras mayúsculas diferentes en la misma fila representan diferencias estadísticamente significativas entre días por tratamiento ($p < 0,05$).

Según Smith et al. (2015) Los quelatos de hierro con aminoácidos aportan ligandos ácidos ($-\text{COO}^-$, $-\text{NH}_2$) cuya capacidad tamponante desplaza el equilibrio del pH hacia valores más

elevados. Por otro lado, aunque el pirofosfato férrico es poco soluble en agua neutra, estudios de su comportamiento en sistemas alimentarios demuestran que la presencia de iones pirofosfato aumenta la solubilidad de Fe^{3+} entre pH 5–8.5, lo cual coincide con un ligero aumento de pH en el alimento fortificado al reducir la concentración de H^+ libre (Tian et al., 2016).

3.5.2 Efecto sobre la acidez

Como se observa en la Tabla 55 el T01 presentó los valores de acidez más altos durante todo el almacenamiento ($92,34 \pm 0,79$ en el día 1), con una reducción progresiva hasta $77,15 \pm 0,38$ en el día 21. Esto sugiere que la acidez disminuye en el tiempo. Por el contrario, el T02 tuvo valores iniciales significativamente más bajos ($57,42 \pm 0,46$ en el día 1) con un ligero aumento en el día 14 ($67,49 \pm 0,74$) y un leve descenso al final del almacenamiento ($65,72 \pm 0,82$). Finalmente, el T03 mostró un patrón similar a T02 con acidez inicial ($60,83 \pm 1,35$ en el día 1) y un ligero aumento hacia el día 14 ($65,58 \pm 0,54$), estabilizándose al final del almacenamiento ($64,71 \pm 0,78$). Este comportamiento coincide con estudios previos que han reportado que la adición de hierro en forma de pirofosfato puede afectar la fermentación y producción de ácido en quesos, debido a su menor solubilidad y biodisponibilidad en medios lácteos (Santillán, 2019).

Tabla 57 Efecto del fortificante férrico sobre la acidez.

| TRATAMIENTO | acidez d1 | | acidez d7 | | acidezd14 | | acidezd21 | |
|-------------|-----------|-------------------------|-----------|--------------------------|-----------|-------------------------|-----------|-------------------------|
| T01 | 92 | ± 1 ^{aA} | 80,5 | $\pm 0,1$ ^{aB} | 75,7 | $\pm 0,4$ ^{aC} | 77,2 | $\pm 0,4$ ^{aC} |
| T02 | 57,4 | $\pm 0,5$ ^{bA} | 56,9 | $\pm 0,1$ ^{bA} | 67,5 | $\pm 0,7$ ^{bB} | 65,7 | $\pm 0,8$ ^{bB} |
| T03 | 61 | ± 1 ^{bA} | 59,92 | $\pm 0,04$ ^{cA} | 65,6 | $\pm 0,5$ ^{bB} | 64,7 | $\pm 0,8$ ^{bB} |

T01: Tratamiento testigo; T02: Hierro amino; T03: Pirofosfato férrico. Letras minúsculas diferentes en la misma columna representan diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos ($p < 0,05$), Letras mayúsculas diferentes en la misma fila representan diferencias estadísticamente significativas entre días por tratamiento ($p < 0,05$).

3.5.3 Efecto sobre la aw

Como se observa en la Tabla 56 no se observaron diferencias significativas entre tratamientos cuando se analiza la aw.

La aw en los quesos untables elaborados con lactosuero que han sido fortificados con hierro se mantuvo estable durante el tiempo del almacenamiento en la presente investigación, por lo cual, la adición de hierro en forma de aminoquelado o pirofosfato no influye sobre este parámetro.

Tabla 58 Efecto del fortificante férrico sobre la aw.

| TRATAMIENTO | awd1 | | awd7 | | awd15 | | awd21 | |
|-------------|-------|-----------------------|-------|-----------------------|-------|-----------------------|-------|-----------------------|
| T01 | 0,983 | ± 0,003 ^{aa} | 0,987 | ± 0,001 ^{aA} | 0,984 | ± 0,001 ^{aA} | 0,981 | ± 0,002 ^{aa} |
| T02 | 0,980 | ± 0,002 ^{aA} | 0,987 | ± 0,002 ^{aA} | 0,983 | ± 0,001 ^{aA} | 0,980 | ± 0,002 ^{aA} |
| T03 | 0,984 | ± 0,001 ^{aA} | 0,984 | ± 0,001 ^{aA} | 0,982 | ± 0,001 ^{aA} | 0,984 | ± 0,001 ^{aA} |

T01: Tratamiento testigo; T02: Hierro amino; T03: Pirofosfato férrico.

Letras minúsculas diferentes en la misma columna representan diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos ($p < 0,05$), Letras mayúsculas diferentes en la misma fila representan diferencias estadísticamente significativas entre días por tratamiento ($p < 0,05$).

3.5.4 Efecto sobre el porcentaje de sólidos totales, grasa, proteína, sinéresis y cenizas

Los resultados presentados en la Tabla 57 muestran que la elección del tipo de hierro para la fortificación no influye significativamente sobre estos parámetros de los quesos untables con lactosuero.

Tabla 59 Efecto del fortificante férrico sobre el porcentaje de sólidos totales, grasa, proteína, sinéresis y cenizas.

| TRATAMIENTO | % ST | | % Grasa | | %Sinéresis | | %Cenizas | | %Proteína | |
|-------------|------|--------------------|---------|--------------------|------------|---------------------|----------|--------------------|-----------|--------------------|
| T01 | 32,2 | ± 0,3 ^a | 18,0 | ± 0,0 ^a | 0,01 | ± 0,01 ^a | 1 | ± 0,5 ^a | 5,8 | ± 0,3 ^a |
| T02 | 30,3 | ± 0,2 ^a | 19 | ± 1 ^a | 0,01 | ± 0,01 ^a | 1 | ± 0,0 ^a | 5,7 | ± 0,2 ^a |
| T03 | 31,1 | ± 0,3 ^a | 18,0 | ± 0,0 ^a | 0,01 | ± 0,01 ^a | 1,0 | ± 0,1 ^a | 6,0 | ± 0,2 ^a |

ST: Sólidos totales; T01: Tratamiento testigo; T02: Hierro amino; T03: Pirofosfato férrico.

Letras minúsculas diferentes en la misma columna representan diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos ($p < 0,05$).

3.5.5 Efecto sobre el parámetro de color L*

Con respecto a L*, se puede observar que en el tratamiento T01 este parámetro se mantuvo constante en el tiempo de almacenamiento. Con respecto a T02 este presentó los valores más bajos de L*, con una reducción significativa en los primeros días (86,6 → 83,0) y una ligera recuperación en el día 21 (87,9). Esto pudo ser debido a la interacción del hierro con los componentes lácteos. Y finalmente el tratamiento T03 se comportó de manera similar al testigo con una disminución de la luminosidad más leve en comparación con T02. Esto indica que el pirofosfato férrico tiene menor impacto en el color del queso, posiblemente debido a su menor solubilidad y reactividad con proteínas y grasas (Tabla 58).

Tabla 60 Efecto del fortificante férrico sobre el parámetro de color L*.

| TRATAMIENTO | L*d1 | | | L*d7 | | | L*d15 | | | L*d21 | | |
|-------------|------|---|--------------------|------|---|--------------------|-------|---|------------------|-------|---|--------------------|
| T01 | 90 | ± | 1 ^{aA} | 90 | ± | 1 ^{aAB} | 89 | ± | 1 ^{aB} | 87 | ± | 1 ^{aC} |
| T02 | 86,6 | ± | 0,2 ^{baA} | 84,3 | ± | 0,2 ^{bbB} | 83 | ± | 1 ^{bc} | 87,9 | ± | 0,2 ^{adD} |
| T03 | 90,2 | ± | 0,3 ^{aA} | 89 | ± | 1 ^{cbB} | 88 | ± | 1 ^{aBC} | 88 | ± | 1 ^{aC} |

T01: Tratamiento testigo; T02: Hierro amino; T03: Pirofosfato férrico. Letras minúsculas diferentes en la misma columna representan diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos ($p < 0,05$), Letras mayúsculas diferentes en la misma fila representan diferencias estadísticamente significativas entre días por tratamiento ($p < 0,05$).

3.5.6 Efecto sobre el parámetro de color a*

El parámetro a* en el sistema CIELAB indica coloración roja si es positivo o verde si es negativo. En productos lácteos, los valores cercanos a 0 representan tonalidades neutras, mientras que un aumento en a* sugiere una tendencia hacia colores más rojizos, lo cual puede estar relacionado con oxidación lipídica o reacciones de Maillard (Pinto et al., 2021). En la Tabla 59 se presentan los valores promedios obtenidos para el parámetro de color a*.

Tabla 61 Efecto del fortificante férrico sobre el parámetro de color a*.

| TRATAMIENTO | a*d1 | | | a*d7 | | | a*d15 | | | a*d21 | | |
|-------------|------|---|--------------------|------|---|--------------------|-------|---|--------------------|-------|---|-------------------|
| T01 | -0,1 | ± | 0,0 ^{aA} | 0,1 | ± | 0,0 ^{aB} | 0,2 | ± | 0,1 ^{aC} | 0,4 | ± | 0,1 ^{aD} |
| T02 | 0,4 | ± | 0,0 ^{baA} | 0,4 | ± | 0,0 ^{baA} | 1,5 | ± | 0,2 ^{bbB} | 0,7 | ± | 0,2 ^{bc} |
| T03 | -0,1 | ± | 0,0 ^{caA} | 0,0 | ± | 0,1 ^{cbB} | 0,1 | ± | 0,1 ^{cbC} | 0,1 | ± | 0,1 ^{cc} |

T01: Tratamiento testigo; T02: Hierro amino; T03: Pirofosfato férrico. Letras minúsculas diferentes en la misma columna representan diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos ($p < 0,05$), Letras mayúsculas diferentes en la misma fila representan diferencias estadísticamente significativas entre días por tratamiento ($p < 0,05$).

En la Tabla 59, se observa un leve aumento en el valor de a* (-0,1 → 0,4) para el tratamiento T01, lo que indica que los quesos son ligeramente más rojizos con el pasar del tiempo. Esto puede ser consecuencia de la oxidación natural de lípidos y proteínas en el queso (Silva et al., 2022). En el caso de T02, se observó un incremento más pronunciado en los valores de a*, alcanzando 1,5 en el día 15. Esto sugiere que la adición de hierro puede acelerar reacciones de oxidación, resultando en una coloración más rojiza Darwish et al. (2021). Y en el caso del tratamiento T03, los valores de a* se mantuvieron

parecidos a los del control, indicando que este compuesto tiene un impacto mínimo en la coloración del queso.

3.5.7 Efecto sobre el parámetro de color b^*

El parámetro b^* en el sistema de color CIELAB indica la tendencia del color hacia tonos amarillos (valores positivos) o azules (valores negativos). En productos lácteos, como el queso, valores más altos de b^* reflejan una coloración más amarilla, mientras que valores más bajos sugieren una tonalidad menos intensa.

El tipo de fortificante férrico usado en el queso es crucial para mantener su calidad sensorial. La T03 muestra un impacto mínimo en la tonalidad amarilla del queso, mientras que el T02 presentó una reducción mayor en los valores de b^* , indicando una disminución en la coloración amarilla. Estos hallazgos sugieren que el tipo de hierro utilizado en la fortificación puede influir en la apariencia del producto final y deben considerarse cuidadosamente para preservar las características deseadas del queso. En todos los casos, como se observa en la Tabla 60, hubo una ligera reducción en los diferentes tratamientos durante el tiempo de análisis.

Tabla 62 Efecto del fortificante férrico sobre el parámetro de color b*.

| TRATAMIENTO | b*d1 | b*d7 | b*d15 | b*d21 |
|-------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|
| T01 | 16,8 ± 0,2 ^{aA} | 16,7 ± 0,2 ^{aAB} | 16,6 ± 0,2 ^{aBC} | 16,4 ± 0,2 ^{aC} |
| T02 | 14,5 ± 0,1 ^{bA} | 13,8 ± 0,1 ^{bAB} | 13,8 ± 0,2 ^{bB} | 13 ± 1 ^{bC} |
| T03 | 16,7 ± 0,4 ^{aA} | 16,6 ± 0,0 ^{aB} | 16,7 ± 0,3 ^{aB} | 15,5 ± 0,3 ^{cB} |

T01: Tratamiento testigo; T02: Hierro amino; T03: Pirofosfato férrico. Letras minúsculas diferentes en la misma columna representan diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos ($p < 0,05$), Letras mayúsculas diferentes en la misma fila representan diferencias estadísticamente significativas entre días por tratamiento ($p < 0,05$).

3.5.8 Efecto sobre la firmeza

La firmeza es un parámetro clave en la evaluación de la textura de quesos untables, ya que influye directamente en la aceptabilidad sensorial y la estabilidad estructural del producto.

Como se observa en la Tabla 61, el T01 presentó un incremento progresivo en la firmeza, pasando de 41,5 N (día 1) a 77,2 N (día 15), con una leve disminución en el día 21 (70,65 N). Este comportamiento puede atribuirse a la reorganización estructural de la matriz proteica y la reducción de agua libre durante el almacenamiento.

Con respecto al T02, la firmeza presentó valores significativamente menores que T01 en todos los días de análisis, con un aumento más moderado en el tiempo (34,1 N en D1 a 42,01 N en D21). La menor firmeza podría deberse a la interacción del hierro con las proteínas, alterando la reticulación de la matriz del queso. La fortificación con hierro aminoquelado mantiene una firmeza intermedia, posiblemente debido a su mayor solubilidad y menor interacción con proteína de caseína, evitando una estructura demasiado rígida.

Y finalmente el tratamiento T03 (Pirofosfato férrico) obtuvo la menor firmeza entre todos los tratamientos, con un aumento lento desde 24,9 N en D1 a 36,23 N en D21. Esto sugiere que la incorporación de pirofosfato férrico afecta significativamente la estructura proteica, generando una textura más blanda. El pirofosfato férrico (T03), al ser menos soluble, puede generar un efecto plastificante en la matriz, impidiendo la formación de una estructura más firme.

Tabla 63 Efecto del fortificante férrico sobre la firmeza.

| TRATAMIENTO | Firmeza D1 (N) | | Firmeza D7 (N) | | Firmeza D15 (N) | | Firmeza D21 (N) | |
|-------------|-------------------|---------------------|-------------------|---------------------|--------------------|----------------------|--------------------|-------------------|
| T01 | 42 | ± 2 ^{aA} | 64 | ± 2 ^{aAB} | 77,2 | ± 0,2 ^{aBC} | 71 | ± 1 ^{aC} |
| T02 | 34 | ± 1 ^{bA} | 42 | ± 1 ^{bB} | 42 | ± 1 ^{bB} | 42 | ± 1 ^{bB} |
| T03 | 24,9 | ± 0,4 ^{cA} | 30,9 | ± 0,4 ^{cB} | 32,4 | ± 0,1 ^{cB} | 36 | ± 2 ^{cC} |

T01: Tratamiento testigo; T02: Hierro amino; T03: Pirofosfato férrico. Letras minúsculas diferentes en la misma columna representan diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos ($p < 0,05$), Letras mayúsculas diferentes en la misma fila representan diferencias estadísticamente significativas entre días por tratamiento ($p < 0,05$).

Algunos estudios han demostrado que la fortificación con hierro puede modificar la textura de productos lácteos debido a su interacción con algunos componentes como proteínas y grasas. Según Kerry & Kerry (1998), la adición de hierro en quesos puede afectar la formación de enlaces proteicos, reduciendo la firmeza en función del tipo de hierro utilizado. Asimismo, Siddique y Park (2019), observaron que la fortificación con microencapsulados de hierro altera las propiedades viscoelásticas del queso, resultando en una menor firmeza en comparación con productos no fortificados.

El tratamiento sin fortificación mostró la mayor firmeza, lo que indica que la adición de hierro impacta negativamente en la red proteica.

3.5.9 Efecto sobre la cohesividad

Como se ha mencionado anteriormente, la cohesividad es un parámetro de textural sumamente importante en quesos untables, ya que representa la resistencia de la matriz alimenticia a la deformación y su capacidad para mantener la estructura después de la aplicación de una fuerza (Steffe, 1996).

Como se observa en la Tabla 62, en el caso de T01, se observaron los valores más negativos a lo largo del tiempo, lo cual hace referencia a que tiene una mayor resistencia a la deformación, por lo tanto, una mayor cohesividad. La cohesividad disminuyó significativamente de -27,8 N el día 1 a -53,03 N el día 15, antes de estabilizarse en -43,62 N el día 21, es decir, la muestra es más cohesiva luego del almacenamiento.

En tanto, el T02 presentó valores intermedios de cohesividad, con respecto a los otros tratamientos, con una menor resistencia a la deformación en comparación con el control. También se observó una ligera reducción a lo largo del almacenamiento, alcanzando un valor final de -23,20 N el día 21.

El T03 fue el tratamiento con menor cohesividad, reflejando una matriz más débil y menos estructurada. Los valores oscilaron entre -16,5 N el día 1 y -21,08 N el día 21. Su menor impacto sobre la cohesividad en comparación con el control podría deberse a su mejor solubilidad y menor reactividad con proteínas caseínicas, lo que limita su efecto desestabilizador en la matriz del queso (Martínez et al., 2021).

Tabla 64 Efecto del fortificante férrico sobre la cohesividad.

| TRATAMI ENTO | Cohesividad D1 (N) | | | Cohesividad D7 (N) | | | Cohesividad D15 (N) | | | Cohesividad D21 (N) | | |
|-----------------|-----------------------|---|-------------------|-----------------------|---|------------------|------------------------|---|-------------------|------------------------|---|------------------|
| T01 | -28 | ± | 1 ^{aA} | -43 | ± | 3 ^{aB} | -43 | ± | 0,3 ^{aB} | -44 | ± | 2 ^{aB} |
| T02 | -21 | ± | 1 ^{bA} | -24 | ± | 2 ^{bBC} | -25 | ± | 1 ^{bC} | -23 | ± | 2 ^{bBC} |
| T03 | -16,5 | ± | 0,3 ^{cA} | -18 | ± | 1 ^{cB} | -19 | ± | 1 ^{cBC} | -21 | ± | 1 ^{bC} |

T01: Tratamiento testigo; T02: Hierro amino; T03: Pirofosfato férrico.

Letras minúsculas diferentes en la misma columna representan diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos ($p < 0,05$), Letras mayúsculas diferentes en la misma fila representan diferencias estadísticamente significativas entre días por tratamiento ($p < 0,05$).

Se ha observado que la fortificación con hierro afecta significativamente la cohesividad del queso untable. Lo cual concuerda con otros estudios que indican que la interacción entre el hierro y las proteínas lácteas puede alterar la estructura del gel proteico, afectando su capacidad de retención de agua y resistencia mecánica (Kerry y Kerry, 1998; Siddique y Park, 2019).

Por el contrario, el queso untable fortificado con pirofosfato férrico (T03) generó la menor cohesividad, lo que sugiere que este tipo de hierro interfiere con la red proteica de manera más agresiva, posiblemente debido a su baja solubilidad y su tendencia a formar agregados que debilitan la estructura del gel (Guo et al., 2020). Un estudio realizado por Gaucheron (2019), indicó que la adición de minerales como el hierro, puede inducir un efecto en la estabilidad de las micelas de caseína, alterando la cohesividad del queso. Asimismo, Ayyash et al. (2022) señalaron que el tipo de hierro utilizado en la fortificación influye en la sinéresis y la textura de los productos lácteos, con resultados similares a los observados en este estudio, donde el pirofosfato férrico mostró mayores efectos desestabilizadores en comparación con otras formas de hierro.

3.5.10 Efecto sobre la consistencia

En la Tabla 63 se presentan los valores correspondientes a los tratamientos optimizados con y sin fortificación con hierro. En el caso del tratamiento control (T01),

se observó un aumento progresivo de la consistencia durante el almacenamiento, alcanzando un pico en el día 14 (1800 N·s) antes de disminuir ligeramente al día 21 (1644.13 N·s). En el caso del T02 (Hierro aminoquelado), este presentó valores significativamente más bajos de consistencia en comparación con el testigo. Aunque la consistencia aumentó de 742,4 N·s (D1) a 940,90 N·s (D14), se mantuvo estable hasta el final del almacenamiento (929,97 N·s en D21). La menor reducción de consistencia observada en este tratamiento puede deberse a una menor reactividad de este tipo de hierro con las proteínas lácteas, lo que preserva parcialmente la red estructural del queso (Martínez et al., 2021).

El tratamiento T03 fue el tratamiento con menor consistencia en todo el período de almacenamiento. Este aumentó ligeramente con el tiempo, no obstante, los valores finales (810 N·s en D21) fueron significativamente menores que los del control y T02, lo que sugiere una alteración estructural más pronunciada en la red proteica del queso. Se puede apreciar una menor consistencia debido a su baja solubilidad y su tendencia a formar agregados, lo cual debilita la red de caseína y reduce la capacidad del gel para mantener su estructura (Guo et al., 2020).

Tabla 65 Efecto del fortificante férrico sobre la consistencia.

| TRATAMI ENTO | Consistencia (N.s)D1 | | | Consistencia (N.s)D7 | | | Consistencia (N.s)D14 | | | Consistencia (N.s)D21 | | |
|-----------------|-------------------------|---|------------------|-------------------------|---|------------------|--------------------------|---|------------------|--------------------------|---|------------------|
| T01 | 980 | ± | 30 ^{aA} | 1480 | ± | 50 ^{aB} | 1800 | ± | 20 ^{aC} | 1640 | ± | 20 ^{aC} |
| T02 | 740 | ± | 10 ^{bA} | 915 | ± | 30 ^{bB} | 940 | ± | 20 ^{bB} | 930 | ± | 20 ^{aB} |
| T03 | 569 | ± | 3 ^{cA} | 722 | ± | 30 ^{cB} | 740 | ± | 30 ^{cB} | 810 | ± | 30 ^{aC} |

T01: Tratamiento testigo; T02: Hierro amino; T03: Pirofosfato férrico. Letras minúsculas diferentes en la misma columna representan diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos ($p < 0,05$), Letras mayúsculas diferentes en la misma fila representan diferencias estadísticamente significativas entre días por tratamiento ($p < 0,05$).

3.5.11 Efecto sobre la adhesividad

La adhesividad es un parámetro de textura que describe la fuerza necesaria para separar un producto de una superficie después de haber sido comprimido. En quesos untables, este parámetro afecta la percepción sensorial y la facilidad de consumo. Este parámetro está influenciado por la interacción entre proteínas, grasas y minerales, incluyendo algunos fortificantes como el hierro (González et al., 2022).

Tal como se observa en la Tabla 64, en el tratamiento T01 (Control) se observó que la adhesividad aumentó con el tiempo, alcanzando valores de -114,91 N.s al día 14. Este comportamiento es debido a la progresiva reticulación de proteínas y la migración de agua en la matriz del queso (Kim et al., 2023).

Respecto al tratamiento T02 (Hierro aminoquelado), este presentó valores intermedios de adhesividad, con un aumento hasta el día 14 y una ligera reducción posterior. Esto indica que el hierro aminoquelado tiene cierta interacción con proteínas y afecta la estructura del gel, reduciendo la adhesividad en comparación con el control (Fox et al., 2023).

En el caso del tratamiento T03 se observó la menor adhesividad en todos los tiempos, lo que sugiere que su baja solubilidad limita la interacción con la matriz proteica, reduciendo la capacidad de retención de agua y evitando un incremento en la adhesividad (Zhao et al., 2023).

Tabla 66 Efecto del fortificante férrico sobre la adhesividad.

| TRATAM IENTO | Adhesividad D1 (N.s) | | | Adhesividad D7 (N.s) | | | Adhesividad D15 (N.s) | | | Adhesividad D21 (N.s) | | |
|-----------------|-------------------------|---|-------------------|-------------------------|---|------------------|--------------------------|---|------------------|--------------------------|---|-----------------|
| T01 | -67 | ± | 1 ^{aA} | -95 | ± | 2 ^{aB} | -115 | ± | 2 ^{aB} | -101 | ± | 2 ^{aC} |
| T02 | -48,0 | ± | 0,3 ^{bA} | -58 | ± | 6 ^{bAB} | -62 | ± | 1 ^{bB} | -57 | ± | 6 ^{bB} |
| T03 | -40 | ± | 1 ^{cA} | -44 | ± | 2 ^{cAB} | -45 | ± | 3 ^{cAB} | -49 | ± | 2 ^{bB} |

T01: Tratamiento testigo; T02: Hierro amino; T03: Pirofosfato férrico.

Letras minúsculas diferentes en la misma columna representan diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos ($p < 0,05$), Letras mayúsculas diferentes en la misma fila representan diferencias estadísticamente significativas entre días por tratamiento ($p < 0,05$).

3.5.12 Efecto sobre la viscosidad

La viscosidad de los quesos untables es un parámetro clave que está relacionado con la percepción sensorial y funcionalidad durante su consumo. Los resultados obtenidos muestran una disminución de la viscosidad con el aumento del gradiente de deformación, lo cual es característico de fluidos no newtonianos con comportamiento pseudoplástico y en el caso de quesos untables son tixotrópicos por su dependencia con el tiempo de tratamiento mecánico (Bourne, 2002; Steffe, 1996).

En el caso del T01, se observó que presenta la viscosidad más alta en todas las velocidades de corte (Tabla 65), lo cual representa una estructura más resistente a la deformación. La disminución de la viscosidad con el gradiente de deformación sugiere la

presencia de una red estructural bien formada, posiblemente debido a interacciones entre proteínas y la fase grasa (Rao, 2014).

Cuando se fortificó con hierro amino quelado (T02), no se observan diferencias significativas con T01 en ningún gradiente de deformación, lo que indica que este tipo de hierro no afecta sustancialmente la estructura del queso, esto podría deberse a que el hierro amino quelado tiene menor interacción con las proteínas lácteas y no induce efectos significativos en la matriz del gel (Tabla 65) (Kim et al., 2020).

Sin embargo, cuando se fortificó con pirofosfato férrico (T03), se observó una disminución significativa de la viscosidad en comparación con los otros tratamientos en todas las velocidades de corte. Esto puede deberse a una menor cohesión estructural en la matriz del queso, lo que podría estar relacionado con la baja solubilidad del pirofosfato férrico y su posible interferencia con las interacciones proteicas (Seth y Bajwa, 2021).

A velocidades altas (200 s^{-1}), la viscosidad se redujo de manera importante en comparación con los otros tratamientos debido a que posee estructura más débil y menos resistente a la deformación bajo esfuerzo mecánico.

Tabla 67 Efecto del fortificante férrico sobre la viscosidad.

| TRATAMIENTO | μ_{50d1} | μ_{100d1} | μ_{150d1} | μ_{200d1} |
|-------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| T01 | 2730 \pm 50 ^{aA} | 1040 \pm 20 ^{aB} | 650 \pm 10 ^{aC} | 490 \pm 10 ^{aD} |
| T02 | 2800 \pm 40 ^{aA} | 1060 \pm 20 ^{aB} | 670 \pm 10 ^{aC} | 500 \pm 10 ^{aD} |
| T03 | 1720 \pm 20 ^{bA} | 730 \pm 20 ^{bB} | 480 \pm 10 ^{bC} | 370 \pm 10 ^{bD} |

T01: Tratamiento testigo; T02: Hierro amino; T03: Pirofosfato férrico.

Letras minúsculas diferentes en la misma columna representan diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos ($p < 0,05$), Letras mayúsculas diferentes en la misma fila representan diferencias estadísticamente significativas entre días por tratamiento ($p < 0,05$).

3.5.13 Efecto sobre los atributos sensoriales

El análisis sensorial fue realizando con 10 evaluadores semi entrenados. En la imagen 93 se presenta el gráfico de araña obtenido para comparar cada atributo sensorial de los tres tratamientos optimizados, con y sin fortificación con hierro.

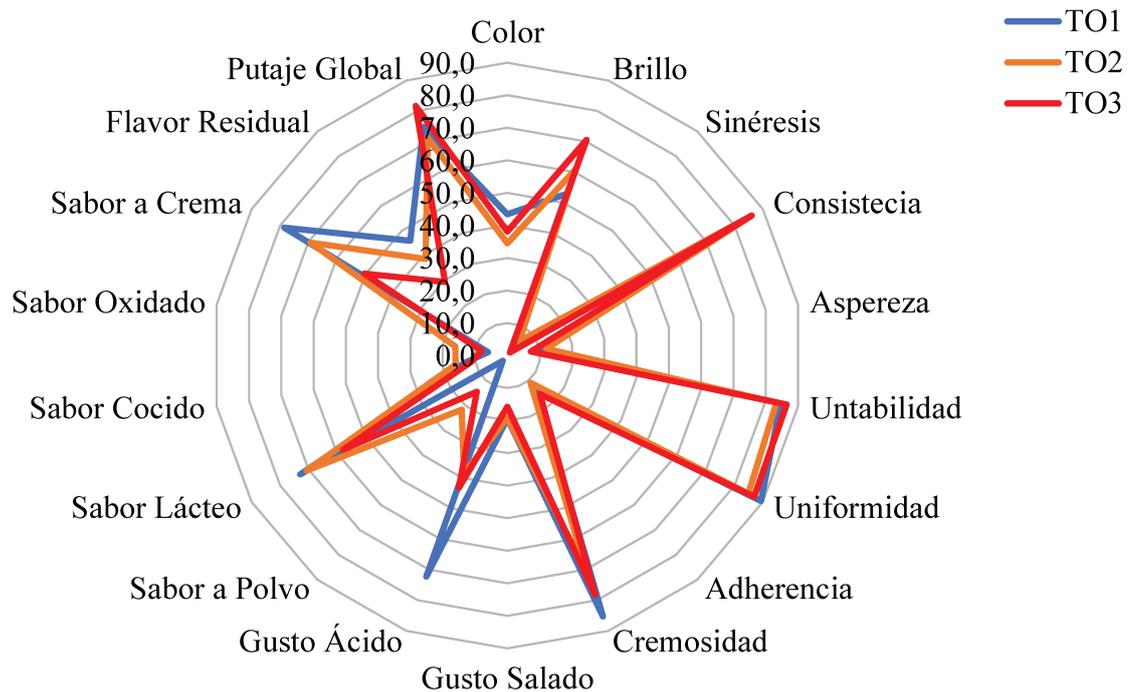


Figura 93. Análisis cuantitativo descriptivo de quesos untables elaborados con lactosuero de quesería fortificados con diferentes fuentes de hierro (T01: tratamiento testigo; T02: hierro amino; T03: pirofosfato férrico)

Con respecto al color, se observó que el T01 presentó el mayor valor de color (43,4), mientras que el T02 tuvo el menor (34,4), lo cual coincide con los valores medidos por colorimetría. Esto indica que la adición de hierro afectó la apariencia visual, posiblemente por la coloración del aditivo que es un polvo color blanco. Para el caso del brillo, el T03 presentó el mayor valor (70,5), lo que sugiere que este tipo de hierro mejora la reflectancia de la superficie, en contraste con T01 (52,9) y T02 (61,0). Boccio y Monteiro (2004) mencionan que la elección del compuesto de hierro es fundamental para evitar efectos sensoriales no deseados en los alimentos fortificados.

La sinéresis fue menor en T03 (1,3), lo que indica que la fortificación con pirofosfato férrico mejora la retención de agua. Mientras que T02 (5,7) presentó la mayor sinéresis, lo cual sugiere un menor grado de estabilidad estructural. Según Ugarte, Giraudo y Sánchez Tuero (2011), el pirofosfato férrico disperso presenta propiedades fisicoquímicas favorables para la fortificación de productos lácteos, mejorando su estabilidad.

Con respecto a la consistencia, ésta se incrementó en los tratamientos fortificados (T02: 86,1; T03: 86,0) en comparación con el testigo (T01: 82,4), lo que indica que la adición de hierro incrementa la firmeza sensorial del producto.

Por otro lado, el tratamiento con hierro amino quelado (T02) mostró la mayor aspereza (12,1), lo que puede atribuirse a una posible interacción del hierro con proteínas, afectando la textura.

En el caso de la untabilidad, esta se mantuvo alta en todos los tratamientos, siendo T03 (86,5) el que presentó mejor untabilidad, seguido por T01 (84,7) y T02 (83,3).

La uniformidad fue mayor en T03 (86,9), indicando que la fortificación con pirofosfato férrico no altera significativamente la estructura del queso untable.

La adherencia fue mayor en T03 (15,4), mientras que el T02 (11,0) presentó menor pegajosidad.

La cremosidad del T01 (85,3) tuvo la mayor puntuación, mientras que el T02 (70,7) mostró la menor, lo que sugiere que la fortificación con hierro amino quelado podría reducir la percepción de cremosidad.

El gusto salado fue similar en todos los tratamientos T01 (19,3) y T02 (19,2), mientras que hubo una percepción de menor tenor de salado en T03 (15,8).

Con respecto al gusto ácido, se observó una disminución en T03 (43,3) en comparación con T01 (72,3), lo que sugiere una posible interacción del hierro con compuestos ácidos (Santillán, 2019).

Sabor a polvo: Aumentó en T02 (21,7), lo que podría deberse a la presencia del hierro amino quelado en la matriz del queso.

El sabor lácteo fue mayor en T01 (73,0) y menor en T03 (57,8), indicando que la fortificación con hierro modifica las características lácteas del producto.

Sabor cocido y sabor oxidado: T02 (16,0 y 16,1) presentó valores más altos, sugiriendo que la presencia de hierro amino quelado puede favorecer estos sabores indeseables.

Con respecto al *flavor* residual, se observó que el T01 (46,1) tuvo el mayor valor, indicando una mayor persistencia del sabor en boca, mientras que T03 (29,6) mostró el menor.

Puntaje global: El T03 (81,6) obtuvo la mejor aceptación sensorial, mientras que T02 (71,3) tuvo la menor, lo que sugiere que el tipo de hierro utilizado influye en la aceptación

del producto. En este caso el tratamiento con fortificación con pirofosfato de hierro no influye en los parámetros sensoriales. Lo cual es un aspecto muy importante al momento de fortificar con hierro.

3. CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos previamente, se obtuvieron las siguientes conclusiones parciales:

- Mediante la caracterización del queso untable comercial CasaCrem, como ensayo preliminar, se pudo obtener una referencia sobre la cual fueron elaborados los quesos untables elaborados con lactosuero y desarrollados en la presente tesis, así como también, permitió poner a punto cada una de las metodologías para cada una de las respuestas estudiadas.
- A través del uso del diseño experimental de superficie de respuesta Box Bhenken, se obtuvieron modelos predictivos para: pH, acidez, parámetros de color (L^* , a^* y b^*), aw, grasa, proteína y cenizas, parámetros de textura (firmeza, cohesividad, consistencia y adhesividad), parámetros reológicos (viscosidad, esfuerzo de corte inicial, índice de consistencia, índice de comportamiento y tixotropía).
- No se obtuvieron modelos predictivos para sólidos totales y sinéresis.
- El pH de los quesos untables desarrollados se mantuvo dentro del rango óptimo (4,8-5,0), similar al producto comercial de referencia (CasanCrem Clásico), por lo que se obtuvo una adecuada acidificación y estabilidad del producto, clave para su conservación y características sensoriales.
- Los valores de acidez titulable fueron consistentes con los estándares del mercado, reflejando un adecuado equilibrio entre los componentes ácidos, lo que contribuye al perfil de sabor deseado.
- El porcentaje de grasa influyó significativamente en la untabilidad y cremosidad del producto. Las formulaciones con mayor contenido graso (20%) replicaron mejor las características del producto comercial, aunque se deben considerar alternativas para reducir el contenido de grasa como en el presente estudio donde se utilizó el valor intermedio de grasa dentro del rango experimental para la optimización.
- Los niveles de proteína, principalmente aportados por el WPC-35 y las leches en polvo, fueron adecuados para mantener la estructura del queso. La proteína también contribuyó a la retención de agua y a la estabilidad del producto al igual que los hidrocoloides usados.

- El contenido de cenizas reflejó una buena proporción de minerales, esenciales para las propiedades nutricionales y funcionales del queso.
- La sinéresis se controló eficazmente con el uso de hidrocoloides (gelatina y almidón modificado).
- Los parámetros de color se mantuvieron cercanos a los del producto comercial, con una luminosidad (L) alta y tonos neutros (a^* y b^* cercanos a cero). Lo cual refleja una apariencia atractiva y uniforme.
- La textura fue afectada principalmente por el contenido de grasa y de los hidrocoloides. Las muestras con mayor grasa y gelatina mostraron mayor firmeza y cohesividad, mientras que el almidón modificado mejoró la adhesividad y untabilidad.
- Los quesos untables exhibieron un comportamiento pseudoplástico ($n < 1$) de acuerdo al modelo obtenido de la curva superior, típico de productos untables. La viscosidad disminuyó con el aumento del gradiente de deformación, facilitando su aplicación y consumo. Cabe mencionar que luego de los ensayos se evidenció que todos los quesos son tixotrópicos por su dependencia con el tiempo de cizalla.
- La validación de los valores optimizados resultó satisfactoria, al encontrarse las respuestas dentro de los límites mínimos y máximos, lo cual significa que hubo un adecuado ajuste de los modelos obtenidos.
- Los quesos untables desarrollados elaborados con lactosuero demostraron propiedades fisicoquímicas, reológicas y sensoriales comparable a las del producto comerciales analizado en el presente estudio. La optimización de variables como el contenido de grasa y el uso de hidrocoloides permitió obtener un producto con características deseables.

Como conclusión final estos resultados validan la viabilidad técnica de revalorizar el lactosuero en la elaboración de quesos de muy alta humedad, ofreciendo una alternativa innovadora y sostenible para la industria láctea.

4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Agudelo Chaparro, J., Sepúlveda Valencia, J. U., & Restrepo Molina, D. A. (2015). Efecto de la adición de dos tipos de almidones en las propiedades texturales de queso análogo. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 68(1), 7545-7555.
2. Akhtar, M., Murray, B. S., y Dickinson, E. (2006). Perception of creaminess of model oil-in-water dairy emulsions: Influence of the shear-thinning nature of a viscosity-controlling hydrocolloid. *Food Hydrocolloids*, 20(6), 839–847.
3. Ayyash, M., Sherkat, F., Francis, D., & Shah, N. P. (2022). Impact of iron fortification on texture and microstructure of dairy products: A review. *Food Research International*, 156, 111107. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111107>
4. Bailey, R. L., West, K. P., & Black, R. E. (2015). The epidemiology of global micronutrient deficiencies. *Annals of Nutrition and Metabolism*, 66(Suppl. 2), 22-33. <https://doi.org/10.1159/000371618>
5. Banes, J., Helm, T., & Taylor, D. (2014). Modified whey proteins as texturizers in reduced and low-fat foods. *Food Texture Design and Optimization*, 14, 108-127.
6. Barnes, H. A. (1989). *An Introduction to Rheology* (Vol. 37). Elsevier Science Publishers.
7. Bayarri, S., Carbonell, I., & Costell, E. (2012). Viscoelasticity and texture of spreadable cheeses with different fat contents at refrigeration and room temperatures. *Journal of Dairy Science*, 95(12), 6926-6936.
8. Bergamini, C. V., Wolf, I. V., Perotti, M. C., & Zalazar, C. A. (2010). Characterization of biochemical changes during ripening in Argentinean sheep cheeses. *Small Ruminant Research*, 94, 79-89.
9. Brighenti, M., Govindasamy-Lucey, S., Lim, K., Nelson, K., & Lucey, J. A. (2008). Characterization of the rheological, textural, and sensory properties of samples of commercial US cream cheese with different fat contents. *Journal of Dairy Science*, 91(12), 4501-4517.

10. Boccio, J., & Monteiro, J. B. (2004). Fortificación de alimentos con hierro y zinc: pros y contras desde un punto de vista alimenticio y nutricional. *Revista de Nutrição*, 17(1), 71-79. <https://doi.org/10.1590/S1415-52732004000100008>
11. Bounous, G. (2000). Review: Whey Protein Concentrate (WPC) and Glutathione Modulation in Cancer Treatment. *Anticancer Research*, 20, 4785-4792.
12. Bourne, M. (2002). *Food Texture and Viscosity: Concept and Measurement*. Elsevier.
13. Burrows, A. (2009). Palette of our palates: a brief history of food coloring & its regulation. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 8, 394-408.
14. Candiotti, M. C., Hynes, E. R., Quiberoni, A., Palma, S. B., & Zalazar, C. A. (2002a). Reggianito Argentino cheese: Influence of *Lactobacillus helveticus* strains isolated from natural whey cultures on cheese making and ripening processes. *International Dairy Journal*, 12, 923-931.
15. Candiotti, M. C., Palma, S. B., Sabbag, N. G., Perotti, M. C., Bernal, S. M., & Zalazar, C. A. (2002b). Estudio comparativo de distintas alternativas para la producción de quesos semiduros de pasta lavada bajos en grasa. *Grasas y Aceites*, 53(4), 384-390.
16. Candiotti, M. C., Bergamini, C. V., Palma, S. B., Buseti, M., Meinardi, C. A., & Zalazar, C. A. (2009). Characterisation of proteolysis profile of Argentinean sheep cheeses made by two different production methods. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 90, 36-42.
17. Carvalho, F., Prazeres, A. R., & Rivas, J. (2013). Cheese whey wastewater: Characterization and treatment. *Science of the Total Environment*, 445, 385-396.
18. Castells, M., Gonzalez, M., Mattos, C., Juliano, P., Mellinger, S., Sepulveda, J., Jorcin, S., Krolow, C., Di Risio, J., & Lopez, T. (2017). Alternativas de valorización de sueros de quesería. En *Valorización de Lactosueros (Capítulo 2)*. ISBN 978-950-532-341-8.
19. Chambers, E. (2020). *Sensory Evaluation of Foods: Current Practice and Future Perspectives*. MDPI.
20. Choi, J., Horne, D. S., Johnson, M. E., & Lucey, J. A. (2008). Effects of the concentration of insoluble calcium phosphate associated with casein micelles on the

- functionality of directly acidified cheese. *Journal of Dairy Science*, 91(2), 513-522.
<https://doi.org/10.3168/jds.2007-0454>
21. Código Alimentario Argentino (CAA). (2018). Alimentos Lácteos. A.N.M.A.T. Capítulo VIII, Artículos 553-642. Recuperado de http://www.anmat.gov.ar/alimentos/normativas_alimentos_caa.asp
 22. Cortez Latorre, J. D. (2018). Lechería e industria quesera en la República del Ecuador (Trabajo Final de Especialización).
 23. Chatterje, S., Sarkar, A., & Boland, M. (2014). The world supply of food and the role of the dairy protein. En Singh, H., Boland, M., & Thompson, A. (Eds.), *Milk Proteins: From Expression to Food* (pp. 3-16). Elsevier.
 24. Chatziantoniou, S. E., Thomareis, A. S., & Kontominas, M. G. (2015). Effect of chemical composition on physico-chemical, rheological and sensory properties of spreadable processed whey cheese. *European Food Research and Technology*, 241, 737-748.
 25. Cheng, J., Dudu, O. E., Zhang, J., Wang, Y., Meng, L., Wei, W., ... & Yan, T. (2023). Impact of binding interaction modes between whey protein concentrate and quercetin on protein structural and functional characteristics. *Food Hydrocolloids*, 142, 108787.
 26. Chiang, M.-H., Chang, C.-I., & Hsieh, T.-J. (2023). Influence of starch on the rheological, textural, and microstructural properties of imitation cheese. *Fermentation*, 9(2), 41. <https://doi.org/10.3390/fermentation9020041>
 27. Clark, S., Costello, M., Drake, M., & Bodyfelt, F. (Eds.). (2009). *The Sensory Evaluation of Dairy Products* (Vol. 571). Springer.
 28. Costabel, L., Bergamini, C., Pozza, L., Cuffia, F., Candiotti, M., & Hynes, E. R. (2015). Influence of chymosin type and curd scalding temperature on proteolysis of hard cooked cheeses. *Journal of Dairy Research*, 82, 375-384.
 29. Cuffia, F., Candiotti, M. C., & Bergamini, C. B. (2015). Influence of brine concentration on the ripening of a soft sheep's milk cheese. *Small Ruminant Research*, 132, 60-66.

30. Cunha, C. R., Dias, A. I., & Viotto, W. H. (2010). Microstructure, texture, colour and sensory evaluation of a spreadable processed cheese analogue made with vegetable fat. *Food Research International*, 43(3), 723-729.
31. Daubert, C. R., Tkachuk, J. A., & Truong, V. D. (1998). Quantitative measurement of food spreadability using the vane method. *Journal of Texture Studies*, 29, 427-435.
32. Darwish, A., Soliman, T., Elhendy, H., & El-Kholy, W. M. (2021). Nano-encapsulated iron and folic acid-fortified functional yogurt enhance anemia in albino rats: Physicochemical, oxidative, and sensory evaluations. *Frontiers in Nutrition*, 8, 654624. <https://doi.org/10.3389/fnut.2021.654624>
33. Dejmek, P., & Walstra, P. (2004). The syneresis of rennet-coagulated curd. En Fox, P. F., McSweeney, P. L. H., Cogan, T. M., & Guinee, T. P. (Eds.), *Cheese, Chemistry, Physics and Microbiology* (Vol. 1, pp. 71-103). Elsevier Academic Press.
34. Delmonte, A., Cortez-Latorre, J. D., & Rozycki, S. D. (2022). Whey revalorization through the development of spreadable cheeses. *ESPOCH Congresses: The Ecuadorian Journal of STEAM*, 228-244.
35. Demirkesen, I., Mert, B., Costa, R., & Szablewski, T. (2024). Rheological and textural properties of food analogues. En *Food Analogues: Emerging Methods and Challenges* (pp. 291-328). Springer Nature.
36. Dimitreli, G., & Thomareis, A. S. (2007). Effect of chemical composition on the linear viscoelastic properties of processed cheese. *Journal of Food Engineering*, 84(3), 368-374.
37. Emon, D. D., Islam, M. S., Mazumder, M. A. R., Aziz, M. G., & Rahman, M. S. (2025). Recent applications of microencapsulation techniques for delivery of functional ingredient in food products: A comprehensive review. *Food Chemistry Advances*, 6, 100923.
38. Espinosa Manfugás, J. (2007). *Evaluación sensorial de los alimentos*. Editorial Universitaria.
39. FAO. (2017). *Milk and Milk Products: Price and Trade Update*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

40. FAO. (2018). Leche y productos lácteos, peligros para la salud. Recuperado de <http://www.fao.org/dairy-production-products/products/peligros-para-la-salud/es/>
41. FAOSTAT. (2017). Producción mundial de leche de distintas especies. Recuperado de <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QL>
42. Feng, R., van der Berg, F. W. J., Mokso, R., Lillevang, S. K., & Ahrné, L. (2023). Structural, rheological and functional properties of extruded mozzarella cheese influenced by the properties of the renneted casein gels. *Food Hydrocolloids*, 137, 108322.
43. Feng, R., Wu, S., Yu, M., Xu, B., Tao, H., Chen, Y., ... & Zhang, B. (2025). Cheese fat replacement: categories, techniques, and recent research trends. *International Dairy Journal*, 106211.
44. Figura, L. O., & Teixeira, A. A. (2007). *Food Physics: Physical Properties, Measurement and Applications*. Springer-Verlag.
45. Fiszman, S. M., & Salvador, A. (1999). Effect of gelatine on the texture of yoghurt and of acid-heat-induced milk gels. *Zeitschrift für Lebensmitteluntersuchung und-Forschung A*, 208(2), 100-105.
46. Fox, P. F., & McSweeney, P. L. H. (1998). *Dairy Chemistry and Biochemistry*. Blackie Academic & Professional.
47. Fox, P. F., & McSweeney, P. L. H. (2022). *Advanced Dairy Chemistry: Volume 1A – Proteins: Basic Aspects* (5th ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-81935-7>
48. Fox, P. F., Guinee, T. P., Cogan, T. M., & McSweeney, P. L. H. (2000). Overview of cheese manufacture. En *Fundamentals of Cheese Science* (pp. 10-69). Aspen Publishers.
49. Fox, P. F., Guinee, T. P., Cogan, T. M., & McSweeney, P. L. H. (2017a). *Fundamentals of Cheese Science* (2nd ed., pp. 755-768). Springer.
50. Fox, P. F., Guinee, T. P., Cogan, T. M., & McSweeney, P. L. H. (2017b). Enzymatic coagulation of milk. En *Fundamentals of Cheese Science* (2nd ed., pp. 185-226). Springer.

51. Fox, P. F., Guinee, T. P., Cogan, T. M., & McSweeney, P. L. H. (2017c). Salting of cheese curd. En *Fundamentals of Cheese Science* (2nd ed., pp. 251-278). Springer.
52. Fox, P. F., Uniacke-Lowe, T., McSweeney, P. L. H., & O'Mahony, J. A. (2015). *Dairy Chemistry and Biochemistry* (2nd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-14892-2>
53. Garofalo, G., Gaglio, R., & Settanni, L. (2025). Modern advances in cheese making: Biopreservation, functionalization, and reusing agri-food by-products. *International Dairy Journal*, 106245.
54. Gaucheron, F. (2019). Iron-fortified dairy products: Effect on casein micelle structure and functionality. *Trends in Food Science & Technology*, 88, 27-36. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.02.003>
55. Gauna, A. (2005). Elaboración de quesos de pasta semidura con ojos. Cuaderno tecnológico N° 3 Lácteos. Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI Lácteos).
56. Gómez Huamaní, K. J., & Terres Quispe, J. J. (2023). Efecto de la fortificación de la leche pasteurizada y queso andino con pirofosfato férrico liposomal, ácido ascórbico y retinol en los niveles de hemoglobina y aceptabilidad en niños entre 5 a 10 años. Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga. Recuperado de <https://renati.sunedu.gob.pe/handle/renati/279555>
57. Gonzalez, M., Castells, M. L., Mellinger, C., Juliano, P., & Sepulveda, J. (2017). Escenario y posibilidades del lactosuero. En: Muset, G. & Castells, M. L. (Eds.), *Valorización del lactosuero* (pp. 11-13).
58. Guinee, T. P., Pudja, P. D., & Farkye, N. Y. (1993). Fresh acid-curd cheese varieties. En Fox, P. F. (Ed.), *Cheese: Chemistry, Physics and Microbiology* (pp. 363-419). Chapman & Hall.
59. Guinee, T. P. (2004). Salting and the role of salt in cheese. *International Journal of Dairy Technology*, 57(2/3), 99-109.
60. Guinee, T. P., & Sutherland, B. J. (2011). Salting of cheese. En *Encyclopedia of Dairy Science* (2ª ed., Vol. 1, pp. 595-606). Elsevier.

61. Guinee, T. P., & O'Callaghan, D. J. (2013). Effect of increasing the protein-to-fat ratio and reducing fat content on the chemical and physical properties of processed cheese product. *Journal of Dairy Science*, 96(11), 6830-6849.
62. Guinee, T. P. (2016). Cheese | Cheese as a food ingredient. En J. W. Fuquay (Ed.), *Encyclopedia of Dairy Sciences* (2^a ed., pp. 56-68). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374407-4.00097-2>
63. Gaucheron, F. (2019). Iron-fortified dairy products: Effect on casein micelle structure and functionality. *Trends in Food Science & Technology*, 88, 27-36. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.02.003>
64. González, R., Pérez, M., & Ramírez, J. (2022). Impact of iron fortification on dairy product texture: A structural and sensory analysis. *Journal of Dairy Science*, 105(8), 6325-6337. <https://doi.org/10.3168/jds.2021-21567>
65. Gunasekaran, S., & Ak, M. M. (2003). *Cheese Rheology and Texture*. CRC Press.
66. Guneser, B. A., Aklale, B., & Guneser, O. (2023). Characterization of physicochemical, rheological, aroma, and sensory properties of spreadable processed cheese supplemented with chia, quinoa, and teff seeds. *Mljekarstvo*, 73(1), 22-37.
67. Guo, M., Fox, P. F., & McSweeney, P. L. (2020). *Dairy Chemistry and Biochemistry*. Springer.
68. Guo, M., & Wang, G. (2019). History of whey production and whey protein manufacturing. En Guo, M. (Ed.), *Whey Protein Production, Chemistry, Functionality, and Applications* (pp. 1-12).
69. Hardy, J. (1990). La actividad del agua y el salado de los quesos. En Eck, A. (Coord.), *El Queso* (Parte I, Cap. 3, pp. 35-57). Editorial Omega.
70. Haug, A., Høstmark, A. T., & Harstad, O. M. (2007). Bovine milk in human nutrition—A review. *Lipids in Health and Disease*, 6, 25. <https://doi.org/10.1186/1476-511X-6-25>
71. Hesarinejad, M. A., Lorenzo, J. M., & Rafe, A. (2021). Influence of gelatin/guar gum mixture on the rheological and textural properties of restructured ricotta cheese.

- Carbohydrate Polymer Technologies and Applications, 2, 100130.
<https://doi.org/10.1016/j.carpta.2021.100130>
72. Hynes, E. R., Delacroix-Buchet, A., Meinardi, C. A., & Zalazar, C. A. (1999). Relation between pH, degree of proteolysis and consistency in soft cheeses. *Australian Journal of Dairy Technology*, 54, 24-27.
73. Horton, S., & Ross, J. (2003). The economics of iron deficiency. *Food Policy*, 28(1), 51-75. [https://doi.org/10.1016/S0306-9192\(02\)00070-2](https://doi.org/10.1016/S0306-9192(02)00070-2)
74. Huffman, L., & Barros-Ferreira, L. (2011). Whey-based ingredients. En Chandan, R. & Kilara, A. (Eds.), *Dairy Ingredients for Food Processing*. Wiley-Blackwell.
75. Hui, Y. K. (Ed.). (1993). Manufacture of cheese. En *Dairy Science and Technology Handbook* (Vol. 2, pp. 197-235). Wiley-VCH.
76. Hynes, E. R., Aparo, L., & Candiotti, M. C. (2004). Influence of residual milk-clotting enzyme on α 1-casein hydrolysis during ripening of Reggianito Argentino cheese. *Journal of Dairy Science*, 87, 565-573.
77. Johnson, M., & Law, B. A. (2010). The origins, development and basic operations of cheesemaking technology. En Law, B. A. & Tamime, A. Y. (Eds.), *Technology of Cheesemaking* (2^a ed., pp. 68-97). Wiley-Blackwell.
78. Kapoor, R., & Metzger, L. E. (2008). Process cheese: Scientific and technological aspects—A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 7(2), 194-214.
79. Karim, A., & Aider, M. (2022). Production of prebiotic lactulose through isomerisation of lactose as a part of integrated approach through whey and whey permeate complete valorisation: A review. *International Dairy Journal*, 126, 105249.
80. Kerry, J., & Kerry, J. (1998). *Milk Proteins: Functional Properties in Food Systems*. Springer.
81. Khezri, S., Seyedsaleh, M. M., Hasanpour, I., Dastras, M., & Dehghan, P. (2016). *Whey: Characteristics, applications and health aspects*.

82. Kim, H., Lee, J., & Park, Y. (2023). Effect of iron fortification on the textural and functional properties of cheese spreads. *Food Hydrocolloids*, 144, 108057. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.108057>
83. Kinsella, J. E., & Whitehead, D. M. (1989). Proteins in whey: chemical, physical, and functional properties. *Advances in Food and Nutrition Research*, 33, 343-438. [https://doi.org/10.1016/S1043-4526\(08\)60130-8](https://doi.org/10.1016/S1043-4526(08)60130-8)
84. Kreczmann, B., Alonso, A., Liloia, M., Zamboni, E., Cerutti, R., Baroni, D., & Poluján, D. (2015). Procesamiento del lactosuero: elaboración de lactosa y aprovechamiento de proteínas. *Tecnología Láctea Latinoamericana*, 18.
85. Korhonen, H., & Pihlanto, A. (2006). Bioactive peptides: Production and functionality. *International Dairy Journal*, 16(9), 945-960. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2005.10.012>
86. Kosfaj, A., Lee, C.-H., & Chin, K.-B. (2025). Effects of gelatin hydrolysates addition on technological properties of meat products: Calibration and colorimetric analysis. *Journal of Food Science and Animal Resources*, 42(2), 1033–1045.
87. Kumar, V., & Smith, A. (2023). pH, the Fundamentals for Milk and Dairy Processing: A Review. *MDPI Foods*, 4(3), 26.
88. Lappa, I. K., Papadaki, A., Kachrimanidou, V., Terpou, A., Koulougliotis, D., Eriotou, E., & Kopsahelis, N. (2019). Cheese whey processing: Integrated biorefinery concepts and emerging food applications. *Foods*, 8(8), 347.
89. Lee, S. K., Anema, S., & Klostermeyer, H. (2004). The influence of moisture content on the rheological properties of processed cheese spreads. *International Journal of Food Science & Technology*, 39(7), 763-771.
90. Lesgards, J. F. (2023). Benefits of whey proteins on type 2 diabetes mellitus parameters and prevention of cardiovascular diseases. *Nutrients*, 15(5), 1294.
91. Liu, H., Xu, X. M., & Guo, S. D. (2007). Rheological, texture and sensory properties of low-fat mayonnaise with different fat mimetics. *LWT – Food Science and Technology*, 40(6), 946-954.

92. Lozoff, B., Jiménez, E., & Smith, J. B. (2006). Double burden of iron deficiency in infancy and low socioeconomic status: A longitudinal analysis of cognitive test scores to age 19 years. *Archives of Pediatrics & Adolescent Medicine*, 160(11), 1108-1113. <https://doi.org/10.1001/archpedi.160.11.1108>
93. Lorenzen, M., van den Berg, F. W., Lillevang, S. K., & Ahrné, L. (2024). The effect of milk fat content on microstructure and rheological properties of rennet casein gel emulsions. *Food Hydrocolloids*, 146, 109243.
94. Lucey, J. A., Johnson, M. E., & Horne, D. S. (2003). Invited review: Perspectives on the basis of the rheology and texture properties of cheese. *Journal of Dairy Science*, 86(9), 2725-2743.
95. Lucey, J. A. (2011). Cheese: Curd syneresis. En *Encyclopedia of Dairy Science* (2^a ed., Vol. 1, pp. 591-594). Elsevier.
96. Martín-Diana, A. B., Pérez-Alonso, C., & Villarán, M. D. C. (2023). Relationship between the perception of complex textural attributes and instrumental TPA parameters in spreadable cheese. *Food Quality and Preference*, 104, 104552. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2022.104552>
97. Martínez, D., López, R., Pérez, A., & Gómez, E. (2023). Evaluation of starch–protein interactions as a function of pH. *Foods*, 12(5), 155. <https://doi.org/10.3390/foods12050155>
98. Martínez, C., Rodríguez, A., & Pérez, M. (2021). Effect of chelated iron on the physicochemical and sensory properties of fortified dairy foods. *Journal of Dairy Science*, 104(7), 7451-7463. <https://doi.org/10.3168/jds.2020-19512>
99. Mangano, K. M., Bao, Y., & Zhao, C. (2019). Nutritional properties of whey proteins. En Guo, M. (Ed.), *Whey Protein Production, Chemistry, Functionality, and Applications* (pp. 103-140).
100. Masotti, F., Cattaneo, S., Stuknyté, M., & De Noni, I. (2018). Status and developments in analogue cheese formulations and functionalities. *Trends in Food Science & Technology*, 74, 158-169.
101. Mathias-Rettig, K., & Ah-Hen, K. (2014). El color en los alimentos: un criterio de calidad medible. *Agro Sur*, 42(2), 57-66.

102. Meinardi, C. (2015). *Tecnología quesera: Clase de Posgrado Industrias Lácteas I*. Universidad Nacional del Litoral.
103. Meleti, E., Manouras, A., & Malissiova, E. (2024). The physicochemical characterization, fatty acid profile, and nutritional indices of the Greek traditional cheese "Tsalafouti". *Dietetics*, 3(1), 63-74. <https://doi.org/10.3390/dietetics3010006>
104. Melilli, C., Barbano, D. M., Manenti, M., Lynch, J. M., Carpino, S., & Licitra, G. (2004). Lipolysis and proteolysis in Ragusano cheese during brine salting at different temperatures. *Journal of Dairy Science*, 87, 2359-2374.
105. Ménard, O., Ahmad, S., & Dupont, D. (2022). Iron-fortified dairy matrices: Effect on texture, digestibility, and bioavailability. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 62(4), 987-1001. <https://doi.org/10.1080/10408398.2021.1906762>
106. Kapoor, R., & Metzger, L. E. (2008). Process cheese: Scientific and technological aspects. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 7(2), 194-214. <https://doi.org/10.1111/j.1541-4337.2008.00040.x>
107. Mezger, T. G. (2014). *Applied Rheology: With Joe Flow on Rheology Road*. Anton Paar.
108. Milovanovic, B., Djekic, I., Miocinovic, J., Djordjevic, V., Lorenzo, J. M., Barba, F. J., & Tomasevic, I. (2020). What is the color of milk and dairy products and how is it measured? *Foods*, 9(11), 1629.
109. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca – MAGyP. (2021). *Producción industrial*. Disponible en https://www.agroindustria.gob.ar/sitio/areas/ss_lecheria/.
110. Miri, T. (2011). Viscosity and oscillatory rheology. En *Practical Food Rheology: An Interpretive Approach* (pp. 7-28).
111. Moatsou, G., & Moschopoulou, E. (2021). Cheese and whey: The outcome of milk curdling. *Foods*, 10(5), 1008.
112. Mollea, C., Marmo, L., & Bosco, F. (2013). Valorisation of cheese whey, a by-product from the dairy industry. En *Food Industry*. IntechOpen.
113. Ningtyas, D. W., Bhandari, B., Bansal, N., & Prakash, S. (2019). The viability of probiotic *Lactobacillus rhamnosus* (non-encapsulated and encapsulated) in functional

- reduced-fat cream cheese and its textural properties during storage. *Food Control*, 100, 8-16.
114. Observatorio de la Cadena Láctea Argentina – OCLA. (2024). Producción de leche. Disponible en <https://www.ocla.org.ar/>.
115. Oliszewski, R., Wolf, I. V., Bergamini, C. V., Candiotti, M. C., & Perotti, M. C. (2013). Influence of autochthonous adjunct cultures on ripening parameters of Argentinean goat's milk cheeses. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 93, 2730-2742.
116. Page, J., Meyer, D., Haines, B., & Lagrange, V. (2014). Reference Manual for U.S. Whey and Lactose Products. U.S. Dairy Export Council.
117. Parzanese, M. (2017). Procesamiento del lactosuero. *Tecnologías para la Industria Alimentaria: Ficha No. 13. Alimentos Argentinos*.
118. Pearce, J. (1992). Whey processing. En Zadow, J. (Ed.), *Whey and Lactose Processing* (pp. 73-88). Elsevier Applied Science.
119. Perveen, R., et al. (2020). Changes in pH and acidity of cream cheese during storage at different temperatures. *African Journal of Biotechnology*, 19(10), 16932-16938.
120. Pires, A. F., Marnotes, N. G., Rubio, O. D., Garcia, A. C., & Pereira, C. D. (2021). Dairy by-products: A review on the valorization of whey and second cheese whey. *Foods*, 10(5), 1067.
121. Pinto, M., Fernández, A., & Silva, L. (2021). Evaluación del color en productos lácteos fortificados con hierro: impacto en la calidad sensorial y aceptación del consumidor. *Revista de Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 18(3), 45-57.
122. Pompei, C., Lucisano, M., Zanoni, B., & Casiraghi, E. (1988). Evaluation of spreadability of food products by penetration tests and panel scores. *Journal of Food Science*, 53(2), 592-596.
123. Porras, W. (1999). Elaboración de queso Ricotta a partir de suero lácteos. Trabajo de graduación, EARTH, Costa Rica.
124. Rajinder Nath, K. (1993). Cheese. En Hui, Y. H. (Ed.), *Dairy Science and Technology Handbook* (Vol. 2, pp. 161-255). Wiley-VCH.

125. Ramírez-López, C., & Vélez-Ruiz, J. F. (2012). Quesos frescos: Propiedades, métodos de determinación y factores que afectan su calidad. *Temas Selectos de Ingeniería de Alimentos*, 6(2), 131-148.
126. Rao, M. A. (2014). *Rheology of Fluid, Semisolid, and Solid Foods: Principles and Applications*. Springer.
127. Roefs, S. P. F. M., De Groot-Mostert, A. E. A., & Van Vliet, T. (1990). Structure of acid casein gels 1. Formation and model of gel network. *Colloids and Surfaces*, 50, 141-159. [https://doi.org/10.1016/0166-6622\(90\)80259-7](https://doi.org/10.1016/0166-6622(90)80259-7)
128. Rozycki, S. D., & Seguro, E. F. (1995). Yogur: Cuantificación e influencia de los parámetros reológicos. *Revista Argentina de Lactología*, 11, 39-57.
129. Rustagi, N., et al. (2020). Instrumental methods for texture analysis of food products: Review and challenges. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 19(4), 2517-2542.
130. Sabatier, M., Egli, I., Hurrell, R., Hoppler, M., Gysler, C., Georgeon, S., Mukherje, R., Richon, P. A., Vigo, M., Foman, J. T., & Zeder, C. (2017). Iron bioavailability from fresh cheese fortified with iron-enriched yeast. *European Journal of Nutrition*, 56(4), 1551–1560. <https://doi.org/10.1007/s00394-016-1200-6>
131. Sanprasert, S., Kummerdsiri, P., Seubsai, A. (2025). Techno-Functional, Rheological, and Physico-Chemical Properties of Gelatin Capsule By-Product for Future Functional Food Ingredients. *Foods*, 14(7), 1279. <https://doi.org/10.3390/foods14071279>
132. Santillan, G. (2019). Evaluación de propiedades fisicoquímicas y físicas de dos alimentos lácteos (yogur y queso) enriquecidos con nanopartículas de Ca, Fe y Zn. *Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustriales*.
133. Seth, D., & Bajwa, U. (2021). Influence of iron fortification on microstructure and rheological properties of dairy-based food matrices. *International Dairy Journal*, 113, 104876.
134. Schulz-Collins, D., & Senge, B. (2004). Acid- and acid/rennet-curd cheeses part A: Quark, cream cheese and related varieties. En Fox, P. F. et al. (Eds.), *Cheese:*

- Chemistry, Physics and Microbiology (Vol. 2, pp. 301-328). Academic Press.
[https://doi.org/10.1016/S1874-558X\(04\)80049-6](https://doi.org/10.1016/S1874-558X(04)80049-6)
135. Silva, R., Gómez, D., & Méndez, P. (2022). Efectos de la oxidación lipídica en quesos frescos y su impacto en la estabilidad del color y el sabor. *Food Science Journal*, 22(2), 112-125.
136. Siddique, F., & Park, Y. W. (2019). Effect of iron fortification on the physicochemical and rheological properties of dairy products: A review. *Journal of Dairy Science*, 102(5), 3895-3907. <https://doi.org/10.3168/jds.2018-15672>
137. Singh, A., & Park, Y. W. (2024). Evaluation of the physicochemical, bioactive and sensory properties of yogurt fortified with microencapsulated iron. *Food Chemistry*, 360, 130452. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.130452>
138. Smithers, G. W. (2008). Whey and whey proteins—from ‘gutter-to-gold’. *International Dairy Journal*, 18(7), 695-704.
139. Smith, G. N., Ustunol, Z., & Menevseoglu, A. (2015). Iron fortification of yogurt and pasteurized milk: effect of encapsulated and chelated iron salts on pH, microbial activity and sensory properties. *Journal of Dairy Science*, 98(10), 683–694. <https://doi.org/10.3168/jds.2015-9456>
140. Smith, J. L., & Prakash, S. (2021). Effect of fat content on adhesive properties of cream cheese. *Journal of Dairy Science*, 104(5), 5123–5130. <https://doi.org/10.3168/jds.2020-19876> [basado en datos citados en Prakash et al., tesis UQ 2025]
141. Sousa, M. J., Ardö, Y., & McSweeney, P. L. H. (2001). Advances in the study of proteolysis during cheese ripening. *International Dairy Journal*, 11, 327-345.
142. Smithers, G. W. (2015). Whey-ing up the options—Yesterday, today and tomorrow. *International Dairy Journal*, 48, 2-14.
143. Spreer, E. (2017). *Milk and Dairy Products*. Taylor & Francis.
144. Stable Micro Systems. Recuperado de www.stablemicrosystems.com
145. Steffe, J. F. (1996). *Rheological Methods in Food Process Engineering*. Freeman Press.

146. Stefos, G. C., Dalaka, E., Papoutsi, G., Palamidi, I., Andreou, V., Katsaros, G., Bossis, I., Politis, I., & Theodorou, G. (2024). In vitro evaluation of the effect of yogurt acid whey fractions on iron bioavailability. *Journal of Dairy Science*, 107(2), 683–694. <https://doi.org/10.3168/jds.2023-23643>
147. Taha, S., El-Sherbiny, I., Enomoto, T., Salem, A., Nagai, E., Askar, A., ... & Abdel-Hamid, M. (2020). Improving the functional activities of curcumin using milk proteins as nanocarriers. *Foods*, 9(8), 986.
148. Tian, Y., Blanco, C. A., & Smoukov, S. K. (2016). Dissolution behaviour of ferric pyrophosphate and its mixtures with soluble pyrophosphates: potential strategy for increasing iron bioavailability. *Food Hydrocolloids*, 63, 234–242. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.06.017>
149. Tan, J. (2019). Overview: Semisolid foods. En *Rheology of Semisolid Foods* (pp. 31-62).
150. Tsermoula, P., Khakimov, B., Nielsen, J. H., & Engelsen, S. B. (2021). Whey—the waste-stream that became more valuable than the food product. *Trends in Food Science & Technology*.
151. Tunick, M. (2008). Whey protein production and utilization: A brief history. En Onwulata, C. & Huth, P. (Eds.), *Whey Processing, Functionality and Health Benefits*. Wiley.
152. Tunick, M. H. (2000). Rheology of dairy foods that gel, stretch, and fracture. *Journal of Dairy Science*, 83(8), 1892-1898. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(00\)75062-4](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(00)75062-4)
153. Vasconcelos, Q. D. J. S., Bachur, T. P. R., & Aragão, G. F. (2021). Whey protein supplementation and its potentially adverse effects on health: a systematic review. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*, 46(1), 27-33.
154. Veisseyre, R. (1988). *Técnicas Queseras*. Lactología Técnica. Editorial Acribia.
155. Visser, S. (1993). Proteolytic enzymes and their relation to cheese ripening and *flavor*: An overview. *Journal of Dairy Science*, 76, 329-350.

156. Walstra, P., Wouters, J. T. M., & Geurts, T. J. (2006). Fermented milks. En *Dairy Science and Technology* (pp. 551-573; 583-638). Taylor & Francis.
157. Wang, C., Killpatric, A., Humphrey, A., & Guo, M. (2019). Whey protein functional properties and applications in food formulations. En *Whey Protein Production, Chemistry, Functionality, and Applications*. Wiley.
158. Wang, Q., Espert, M., Hernández, M. J., Salvador, A., & Sanz, T. (2024). Effect of cellulose ether emulsion and oleogel as healthy fat alternatives in cream cheese: Linear and nonlinear rheology, texture and sensory properties. *Food Hydrocolloids*, 150, Article 109740. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2024.109740>
159. Wit, J. N. (2001). Processing of whey ingredients. *Lecturer's Handbook on Whey and Whey Products*. European Whey Products Association.
160. Wolf, I. V., Meinardi, C. A., & Zalazar, C. A. (2009). Production of *flavor* compounds from fat during cheese ripening by action of lipases and esterases. *Protein & Peptide Letters*, 16, 1235-1246.
161. Wolf, I. V., Perotti, M. C., & Zalazar, C. A. (2011). Composition and volatile profiles of commercial Argentinean blue cheeses. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 91(2), 385-393.
162. Yang, J., & Lee, J. (2020). Application of sensory descriptive analysis and consumer studies to investigate traditional and authentic foods: A review. *Foods*, 8(2), 56. <https://doi.org/10.3390/foods8020054>
163. Yusof, Y. A., Rahman, R. A., & Al-Mahrouqi, A. (2019). Texture Profile Analysis of lychee jelly prepared using commercial and high-pressure-treated gelatin. *Malaysian Journal of Fundamental and Applied Sciences*, 15(4), 604–608.
164. Zalazar, C. A. (1994). Coagulación de la leche y enzimas coagulantes. En *Ciencia y Tecnología de los Productos Lácteos*. CERIDE.
165. Zalazar, C., Meinardi, C., & Candiotti, M. (1994). The effect of microbial proteases on Pategrás cheese ripening. *Microbiologie – Aliments – Nutrition*, 12, 295-301.

166. Zalazar, C. A., Meinardi, C. A., & Hynes, E. R. (1999). Los quesos argentinos. En Quesos Típicos Argentinos (Cap. 3, pp. 20-49). Centro de Publicaciones, Universidad Nacional del Litoral.
167. Zhao, X., Wang, Y., & Lu, J. (2023). Influence of iron salts on physicochemical and sensory properties of dairy gels. *LWT – Food Science and Technology*, 183, 114908. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.114908>
168. Zheng, H. (2019). Introduction: Measuring rheological properties of foods. En *Rheology of Semisolid Foods* (pp. 3-30).
169. Zięćko-Grodzka, E., Dziki, D., & Różyło, R. (2016). Effect of pH and modified maize starches on texture, rheological properties and meltability of processed cheese analogues. *European Food Research and Technology*, 242(10), 1687–1696. <https://doi.org/10.1007/s00217-016-2658-4>