



Revista de Ingeniería y Ciencias Aplicadas



UNCUYO
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE CUYO



FACULTAD DE
CIENCIAS APLICADAS
A LA INDUSTRIA

INDICE

Desarrollo de una bebida saludable a base de ingredientes regionales.....	1
Comparación de modelos newtoniano y no newtoniano mediante fluidodinámica computacional en aneurismas cerebrales: análisis de dos casos específicos de pacientes.....	7
Composición nutricional de ricota de la planta piloto de la Universidad Nacional de Luján. Evaluación estadística y tabla nutricional	20
Remoción de metales pesados en efluentes ganaderos mediante el uso de microalgas inmovilizadas.....	37
Estudio de dieta de la trucha arco-iris (<i>Oncorhynchus mykiss</i>) en el Valle Pehuenche (Malargüe, Mendoza, Argentina).....	48
Empleo de alginato para el encapsulado de alimento balanceado de uso acuícola.....	55
Desarrollo de galletitas sin gluten con salvado de arroz y evaluación nutricional para la incorporación de sellos de advertencia.....	63
Análisis del perfil de textura de panes sin gluten a base de harinas de arroz y quinoa modificada	71

Desarrollo de una bebida saludable a base de ingredientes regionales

María Margarita Montenegro¹, Gabriela Isabel Alaniz¹, Pablo Quiroga Silvera¹,
Liliana Myriam Grzona^{1,2*}

1. Laboratorio de Desarrollo y Conservación de Alimentos. Facultad de Ingeniería y Ciencias Agropecuarias (UNSL), Ruta 55 extremo norte. Villa Mercedes, San Luis, Argentina.
2. INTEQUI (CONICET), Ruta 55 extremo norte, Villa Mercedes (S.L.) Argentina.

*E-mail: myriam.grzona@gmail.com

PALABRAS CLAVES

Algarroba
Goma brea
Bebidas vegetales

RESUMEN

El objetivo del estudio fue evaluar la composición química proximal, compuestos fenólicos totales y actividad antioxidante en una bebida saludable a base de algarroba, jugo de naranja y goma brea como estabilizante natural. Para la preparación de las formulaciones se utilizaron las siguientes proporciones (muestra 1 = 80:11:1; muestra 2 = 40:51:1, muestra 3 = 40:51,5:0,5; muestra 4 = 80:11,5:0,5 de extracto de algarroba, jugo de naranjas y goma brea respectivamente. Los compuestos fenólicos totales fueron evaluados mediante Folin-Ciocateu. La actividad antioxidante fue determinada a través del método del radical libre 2,2-difenil-1-picrilhidracilo (DPPH). Los valores de turbidez oscilaron entre 149 ± 0,1 y 466 ± 0,1, y los parámetros L, a, b del sistema Cielab mostraron diferencias significativas ($p < 0,5$) cuando se modificó el contenido de extracto de algarroba. La bebida con 80% de extracto de algarroba y 0,5% de goma brea fue seleccionada como la mejor formulación basada en atributos sensoriales con un contenido total de polifenoles de 1093,3 mg equivalentes de ácido gálico en 100 g de bebida, lo que permite inferir que se trata de un producto con características potencialmente antioxidantes.

Development of a healthy beverage based on regional ingredients

KEYWORDS

Carob
Brea gum
Vegetable beverage

ABSTRACT

The objective of this study was to evaluate the proximate chemical composition, total phenolic compounds, and antioxidant activity of a health beverage based on carob, orange juice, and brea gum as a natural stabilizer. For the preparation of the formulations, the following proportions were used (sample 1 = 80:11:1; sample 2 = 40:51:1, sample 3 = 40:51,5:0,5; sample 4 = 80:11,5:0,5 of carob extract, orange juice and brea gum respectively. Total phenolic compounds were evaluated by Folin-Ciocateu. Antioxidant activity was determined by the 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) free radical method. Turbidity values ranged from 149 ± 0,1 to 466 ± 0,1, and the L, a, b parameters of the Cielab system showed significant differences ($p < 0,5$) when the carob extract content was modified. The beverage with 80% carob extract and 0,5% brea gum was selected as the best formulation based on sensory attributes. A total polyphenol content of 1093,3 mg of gallic acid equivalent in 100 g of beverage, which allows us to infer that it is a product with potentially antioxidant characteristics.

1. Introducción

En los últimos años se ha desarrollado considerablemente el mercado de bebidas a base de vegetales (plant-based). En una dieta saludable, varios compuestos son de particular interés debido a sus beneficios para la salud. Estos incluyen antioxidantes, fibra, ácidos grasos omega-3, vitaminas, minerales y compuestos bioactivos presentes en frutas, verduras y granos integrales. Las bebidas vegetales más consumidas a nivel mundial son las almendras, el coco, la soja, la avena, el arroz, los guisantes y el lupino. Se ha podido verificar que las bebidas vegetales son ricas en compuestos bioactivos, como polifenoles, flavonoides, fibra dietética y antioxidantes, que poseen propiedades antioxidantes, antiinflamatorias e inmunomoduladoras. Estos compuestos tienen el potencial de promover la salud intestinal, además de reducir el riesgo de enfermedades degenerativas crónicas (Marafon et al., 2025).

Los alimentos nativos son cruciales para la seguridad alimentaria y la nutrición en diversas regiones del mundo. Estos alimentos son ricos en nutrientes, han sido parte de las dietas tradicionales durante siglos, son adaptables a las condiciones climáticas locales, lo que los hace resilientes al cambio climático (Dipu et al., 2025).

La algarroba y la goma brea se obtienen de la flora nativa del norte de la provincia de San Luis. La algarroba se encuentra entre los alimentos autóctonos más antiguos utilizados en Sudamérica, representando uno de los productos forestales no madereros principales de la Argentina. Su consumo se vincula a costumbres ancestrales, en que las comunidades elaboraban la harina de algarroba con mortero de madera. Se conoce como algarroba a los frutos o vainas de los algarrobos (La algarroba).

Otro ingrediente nativo es la goma brea, se obtiene del exudado del árbol chañar brea (*Cercidium praecox*). El exudado de esta planta es una goma hidrosoluble segregada como método de cicatrización ante la incisión en su tallo o ramas, puede recolectarse de forma manual. La goma brea fue incorporada al Código Alimentario Argentino en el año 2013, en el artículo N° 1398 del capítulo XVIII, inciso N° 72.1, como espesante, estabilizante y emulsionante.

En este trabajo se desarrolla una bebida refrescante con características saludables, utilizando vainas de algarrobo (*Prosopis nigra*) y goma brea como agente estabilizante.

2. Materiales y métodos

Materias primas

Las materias primas y aditivos alimenticios utilizados en el desarrollo del producto incluyeron: vainas de algarroba, jugo de naranja obtenido por extracción mecánica y posterior filtración; azúcar (marca Ledesma); ácido cítrico anhidro de grado alimenticio (Química Palumbo); bicarbonato de sodio de grado alimenticio (Química Palumbo); y goma brea, utilizada como hidrocoloide alimenticio, sin marca comercial y purificada en el laboratorio. Los dos ingredientes regionales: algarroba y goma brea fueron provistos por la Cooperativa Raíces del Bosque Nativo de la provincia de San Luis. El resto de los ingredientes mencionados se adquirieron en el comercio local.

Preparación de la bebida

El proceso de elaboración de la bebida se llevó a cabo en las siguientes etapas:

- Lavado y selección de vainas.
- Cocción de mezclas vainas-agua durante 15 minutos en una relación (1:5). El extracto obtenido fue filtrado y clarificado mediante centrifugación. Se almacenó a 5 °C durante 48 horas hasta el momento de su uso.
- Preparación y filtrado del jugo de naranja
- Formulación de la bebida: En la Tabla 1 se muestran las formulaciones ensayadas.
- Envasado, pasteurización y almacenamiento: Las muestras se envasaron en recipientes de vidrio de 250 ml, previamente esterilizados. Se pasteurizaron en baño de agua caliente a 85°C durante 30 minutos. Las muestras fueron almacenadas bajo refrigeración a 5 °C durante 30 días para la determinación de su vida útil.

Caracterización fisicoquímica y sensorial de la bebida

Medida de la separación de fases: se evaluó observando visualmente el nivel al que se producía la segregación de los componentes de la bebida. Para ello, se estimó el volumen del sedimento formado y se calculó el porcentaje de separación dividiendo dicho volumen entre el volumen total de la muestra.

Las muestras fueron colocadas en tubos de ensayo de vidrio graduados, con fondo semiesférico. El volumen del sedimento se determinó mediante la suma de los volúmenes correspondientes al casquete esférico (formado en la base del tubo) y al segmento cilíndrico superior, según la geometría del recipiente.

Tabla 1. Formulaciones de bebidas vegetales. (% en peso)

Muestra	Extracto algarroba	Jugo de naranja	Azúcar	Ácido cítrico	NaHCO ₃	Goma brea
B1	80,0	11,0	6,0	1,0	1,0	1,0
B2	40,0	51,0	6,0	1,0	1,0	1,0
B3	40,0	51,5	6,0	1,0	1,0	0,5
B4	80,0	11,5	6,0	1,0	1,0	0,5

Medición de turbidez: Se midió utilizando un turbidímetro portátil. La turbidez se expresó en unidades de turbidez nefelométrica (NTU)

pH: Se midió por triplicado en cada tratamiento utilizando un medidor de pH multiparamétrico de pH y conductividad.

Evaluación de color: Las mediciones se realizaron utilizando un colorímetro digital. Se determinaron los parámetros L* (luminosidad y grado de oscurecimiento de las muestras), coordenadas cromáticas a* (+a*= rojo, -a*= verde) y b*(+b*= amarillo, -b*= azul).

Medición de sólidos solubles totales (°Brix): Se midieron por triplicado, utilizando un refractómetro marca Atago.

Análisis proximal: Se determinó: proteína, método ISO 1871; Grasas, utilizando el método AOAC 320.09 y 930.09; Humedad, método AOAC 945.15; Ceniza, método AOAC 945.46 y Fibra dietaria AOAC 985.09. El contenido de carbohidratos se determinó por método indirecto, calculándose por diferencia como el porcentaje residual resultante tras sustraer del 100 % la suma de los contenidos analíticos de proteínas, lípidos, humedad, cenizas y fibra dietaria.

Determinación de fenoles totales: Los fenoles totales de las muestras se evaluaron según el método modificado de Folin-Ciocalteu a 765 nm en el espectrofotómetro UV-Vis y su contenido se expresó

como mg de equivalentes de ácido gálico (GAE) por 100g de muestra.

Análisis microbiológico: Se analizó la calidad microbiológica de las bebidas con mejor aceptación sensorial evaluando la presencia de bacterias mesófilas aerobias, coliformes totales, hongos y levaduras de acuerdo a los métodos y límites microbiológicos establecidos por el Código Alimentario Argentino para alimentos y bebidas de consumo humano.

Análisis sensorial: Las características sensoriales de las muestras se evaluaron mediante un panel semientrenado de 20 personas

Estudio de vida útil

En el estudio de vida útil se evaluó color, pH, características sensoriales y recuento de microorganismos a los 7, 14 y 21 días.

3. Resultados y Discusión

Caracterización fisicoquímica

Turbidez, separación de fases y pH

La causa más frecuente de turbidez en bebidas se debe a la interacción proteína-polifenol. Las proteínas que se unen a los polifenoles contienen prolina, y cuanta más prolina, mayor es la actividad formadora de turbidez (Siebert, 2006). También

afectan a la turbidez de las bebidas el pH y el contenido de alcohol.

En la Tabla 2 se muestran los valores de turbidez (NTU), pH y separación de fases en función del contenido de extracto de algarroba y goma brea.

Los resultados muestran una mayor turbidez cuando aumenta el contenido de extracto de algarroba, mientras que un aumento en la concentración de goma brea disminuye los valores de unidades nefelométricas. La goma brea permite clarificar la bebida reduciendo la turbidez en un 27% a 60% dependiendo de la concentración de solución de algarroba. Las formulaciones con mayor concentración de goma brea presentaron menor sinéresis en el tiempo de almacenamiento estudiado. La probabilidad de sedimentación podría ser causada por la falta de filtración o la presencia de partículas grandes (Patra, Rinnan, & Olsen, 2021).

Los datos de la Tabla 2 no revelaron cambios significativos en el pH de las cuatro formulaciones. Los valores de pH observados son característicos de

una bebida refrescante y generan un ambiente ácido que inhibe el desarrollo de microorganismos, favoreciendo su estabilidad microbiológica.

Análisis del color, sólidos solubles y densidad

La Tabla 3 muestra los valores obtenidos en el espacio de color referidos a L*, a*, b*, la concentración de sólidos solubles y la densidad de las cuatro preparaciones y del extracto de algarroba.

Se puede apreciar que la luminosidad (L*) para las formulaciones B1, B2 y B3, presentó los mayores valores y el ANOVA demostró que no existió diferencia estadísticamente significativa ($p < 0,05$) para ninguna de las tres formulaciones. La formulación B4 presentó el menor valor de luminosidad y más próximo al valor del extracto de algarroba puro. Los valores a* y b* mostraron un comportamiento similar e indicaron la coloración amarillo-verdosa de las preparaciones.

La densidad y grados Brix no mostraron diferencias significativas entre las muestras.

Tabla 2. Turbidez (NTU), pH y separación de fases en función del contenido de extracto de algarroba y goma brea

Muestra	Extracto algarroba (% peso)	Goma brea (% peso)	Turbidez (NTU) (20°C)	pH (14°C)	Vol. sedimento/Vol. Total (*)
B1	80	1,0	162 ± 0,1	4,94 ± 0,05	0,55
B2	40	1,0	149 ± 0,1	4,73 ± 0,02	0,51
B3	40	0,5	206 ± 0,1	4,98 ± 0,05	0,54
B4	80	0,5	442 ± 0,1	4,74 ± 0,01	0,59
Extracto	100	0,0	1000 ± 0,1	5,55 ± 0,02	0,25

(*)Valores observados a los 14 días de almacenamiento

Tabla 3. Parámetros de color, sólidos solubles y densidad

Muestra	L*	a*	b*	°Brix	Densidad (g/ml)
B1	7509	-0,164	1117	22,2 ± 0,1	1,062
B2	8063	-0,101	943	21,4 ± 0,1	1,062
B3	7072	-0,016	1034	21,2 ± 0,2	1,072
B4	4912	-245	2573	21,0 ± 0,1	1,059
Extracto algarroba	3993	-248	2772	14,9 ± 0,2	1,028

Análisis Sensorial

La evaluación sensorial para las cuatro formulaciones se realizó en una población de 20 personas, de las cuales el 80% fueron mujeres y el 20% hombres. En cuanto a los rangos de edades, el 10% de los encuestados fueron mayores de 50 años y el 90% restante entre 20 y 50 años.

Los resultados obtenidos de la evaluación sensorial realizada por los jueces semientrenados para las formulaciones (B1 a B4) se muestran en la Figura 1.

Se puede observar que la formulación B4, 80% de extracto de algarrobo y 0,5% de goma brea, fue seleccionada como la mejor formulación basada en atributos sensoriales. Este resultado sugiere que la evaluación general del producto por parte de los jueces no depende únicamente del desempeño en atributos individuales, sino también de la interacción entre estos y de factores adicionales, como el sabor, la percepción de naturalidad o el conocimiento sobre los ingredientes funcionales, los cuales podrían haber influido en su aceptación.

El criterio para la selección de la mejor formulación fue encontrar una combinación del extracto algarrobo, jugo de naranja y goma brea considerando su incidencia en el sabor del producto, el color y la preferencia global. Considerando estas propiedades se realizó el análisis proximal y contenido de polifenoles totales. Los resultados experimentales se muestran en la Tabla 4. A partir de los resultados del análisis proximal, se infiere que se trata de una bebida con propiedades nutricionales destacadas. Un análisis comparativo con los parámetros nutricionales obligatorios para bebidas vegetales establecidos en la Unión Europea (Pérez-Rodríguez, Serrano-Carretero, García-Herrera, Cámera-Hurtado y Sánchez-Mata, 2023) respalda su clasificación como un producto alimenticio saludable.

La bebida seleccionada presenta un elevado contenido de polifenoles, lo que sugiere un considerable potencial antioxidante, dado que estos compuestos bioactivos están estrechamente relacionados con la capacidad del alimento para neutralizar radicales libres.

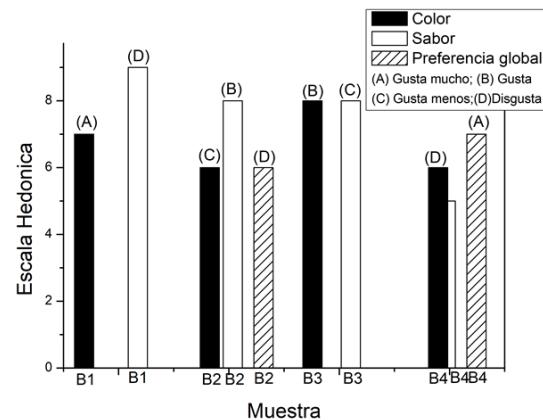


Figura 1. Análisis sensorial de formulaciones de bebidas.

Tabla 4. Composición proximal y contenido de polifenoles de la formulación B4.

Determinación	Unidad	Resultado
Humedad	g/100 g	86,4 ± 0,20
Cenizas	g/100 g	1,0 ± 0,03
Grasas totales	g/100 g	0,1 ± 0,01
Proteínas	g/100 g	0,5 ± 0,05
Fibra dietaria	g/100 g	0,9 ± 0,03
Hidratos de carbono	g/100 g	11,1
Valor calórico	Kcal/100 g	47
Polifenoles totales	mg equivalentes de ácido gálico en 100 g de bebida	1093,3

El período de vida útil de las bebidas pasteurizadas fue de 14 días, momento a partir del cual se registró pérdida de las propiedades sensoriales deseadas, tales como sabor y aroma.

4. Conclusiones

Se obtuvo una bebida nutritiva y sensorialmente agradable, la cual tiene un importante aporte proteico, energético, con características potencialmente antioxidantes. Esta bebida constituye una alternativa interesante de productos alimenticios sostenibles y saludables.

5. Agradecimientos

Agradecemos el apoyo financiero de la Universidad Nacional de San Luis, PROICO 14-1023 e INTEQUI (CONICET).

6. Referencias

- Dipu, M. A., Checco, J., Williams, L., Sultanbawa, Y., Jones, N. A., & Abdul Aziz, A. (2025). Navigating challenges in native plant-based food value chains within the global food system: A systematic literature review. *Agricultural Systems*, 228(April), 104373. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2025.104373>
- La algarroba. https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/ficha_algarroba_2019.pdf
- Patra, T., Rinnan, Å., & Olsen, K. (2021). The physical stability of plant-based drinks and the analysis methods thereof. *Food Hydrocolloids*, 118(November 2020), 106770. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106770>
- Pérez-Rodríguez, M. L., Serrano-Carretero, A., García-Herrera, P., Cámará-Hurtado, M., & Sánchez-Mata, M. C. (2023). Plant-based beverages as milk alternatives? Nutritional and functional approach through food labelling. *Food Research International*, 173(July). <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113244>
- Siebert, K. J. (2006). Haze formation in beverages. 39, 987–994. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2006.02.012>

Comparación de modelos newtoniano y no newtoniano mediante fluidodinámica computacional en aneurismas cerebrales: análisis de dos casos específicos de pacientes

Brian Villegas¹, Nicolás Muzi^{2,3}, Daniel Millán^{1,3*}

1. Departamento de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ciencias Aplicadas a la Industria, Universidad Nacional de Cuyo, San Rafael, M5600AGP, Mendoza, Argentina
2. Departamento de Física y Matemática, Facultad de Ciencias Aplicadas a la Industria, Universidad Nacional de Cuyo, San Rafael, M5600AGP, Mendoza, Argentina
3. Instituto de Ingeniería y Ciencias Aplicadas a la Industria, CONICET – UNCUYO, San Rafael, M5600AGP, Mendoza, Argentina

*E-mail: dmillan@fcai.uncu.edu.ar

PALABRAS CLAVES

Hemodinámica de aneurismas cerebrales
Modelos constitutivos de la sangre
Dinámica de fluidos computacional
Dominios computacionales

RESUMEN

La rotura de aneurismas cerebrales representa un grave riesgo para la salud, con alta tasas de mortalidad y morbilidad. En este contexto, comprender los mecanismos patológicos subyacentes es fundamental para mejorar la evaluación y el tratamiento de los pacientes. En particular, el esfuerzo cortante sobre la pared (WSS), juega un rol fundamental en los procesos de formación, crecimiento y rotura de los aneurismas. Este trabajo analiza el impacto del modelo constitutivo de la sangre en la estimación del WSS mediante simulaciones numéricas de la dinámica de fluidos en dos geometrías reales de aneurismas. En particular se compara el modelo clásico newtoniano contra el modelo de Casson no newtoniano, utilizando condiciones de contorno fisiológicas reportadas por la literatura especializada. Adicionalmente, se propone una metodología para la generación de los dominios computacionales. Los resultados muestran que las diferencias en el WSS entre ambos modelos son inferiores al 3.5% a lo largo del ciclo cardíaco, tanto en el domo como en el cuello de los aneurismas. Se concluye que, bajo las condiciones simuladas, el modelo newtoniano constituye una buena aproximación para estimar el WSS, reduciendo el costo computacional sin comprometer la precisión.

Comparison of newtonian and non-newtonian models using computational fluid dynamics in cerebral aneurysms: analysis of two patient-specific cases

KEYWORDS

Cerebral aneurysm hemodynamics
Blood constitutive models
Computational fluid dynamics
Computational domains

ABSTRACT

The rupture of cerebral aneurysms represents a serious health threat, associated with high rates of mortality and morbidity. In this context, understanding the underlying pathological mechanisms is essential to improve patient evaluation and clinical management. In particular, wall shear stress (WSS) plays a key role in the formation, progression, and rupture of aneurysms. This study investigates the impact of the blood constitutive model on WSS estimation through numerical simulations of fluid dynamics in two patient-specific aneurysm geometries. Specifically, the classical newtonian model is compared against the non-newtonian Casson model, using physiologically realistic boundary conditions reported in the literature. Additionally, a methodology for generating computational domains is proposed. Results show that differences in WSS between both models remain below 3.5% throughout the cardiac cycle, both in the dome and the neck of the aneurysms. It is concluded that, under the simulated conditions, the newtonian model provides a reliable approximation for estimating WSS, reducing computational cost without compromising accuracy.

1. Introducción

La rotura de un aneurisma cerebral puede provocar una hemorragia subaracnoidea (SAH, por sus siglas en inglés), una condición grave con una alta tasa de mortalidad, cercana al 50% (Bizjak y Špiclin, 2013). Los aneurismas cerebrales rotos representan aproximadamente una cuarta parte de las muertes por accidente cerebrovascular (Wardlaw y White, 2000), y la prevalencia de aneurismas cerebrales no rotos (UIAs, por sus siglas en inglés) se estima entre el 3% y el 5% de la población (Bonneville et al., 2006).

Pese a los avances en tecnologías y tratamientos, hasta un 30% de las personas con aneurismas rotos fallecen antes de llegar al hospital (Huang y Van Gelder, 2002). De los pacientes que ingresan, aproximadamente el 30% muere en los primeros días (Lagares et al., 2011). Entre los supervivientes, el 50% sufre secuelas físicas, neuropsicológicas o algún grado de discapacidad que dificulta su vida normal (Springer et al., 2009).

Las intervenciones endovasculares y microquirúrgicas conllevan riesgos no despreciables, con tasas de morbilidad del 5-7% y mortalidad del 1-2% (Lindgren et al., 2016). No obstante, la mayoría de los aneurismas nunca llegan a romperse, lo que genera un dilema clínico para los médicos: si es conveniente intervenir o adoptar una estrategia de observación expectante (Korja et al., 2014).

Hasta el momento, las decisiones clínicas sobre el tratamiento de los UIAs se han basado principalmente en su tamaño, forma y ubicación (Goetz et al., 2024). Sin embargo, estos atributos por sí solos no son suficientes para evaluar con precisión el riesgo de rotura (Lall et al., 2009). Por ello, en las últimas dos décadas ha crecido el interés en estudiar y clasificar patrones de flujo y factores hemodinámicos específicos de cada paciente (Oliveira, 2022). Estos factores permiten caracterizar la iniciación y el crecimiento de los UIAs, asociados a condiciones anormales del flujo sanguíneo (Hsu y Bazilevs, 2011). En ellos, el esfuerzo cortante sobre la pared (WSS, por sus siglas en inglés) es uno de los parámetros cuantitativos más influyente en la estabilidad de un UIA a lo largo del tiempo (Bazilevs et al., 2010).

La caracterización y medición de parámetros representa un difícil desafío, dado que la obtención de datos hemodinámicos *in vivo* es compleja e

implica un riesgo significativo para el paciente. Por esto se ha extendido el uso de la dinámica de fluidos computacional (CFD, por sus siglas en inglés) aplicada a geometrías específicas de pacientes (Cebral et al., 2005). Gracias a los avances recientes en el análisis de imágenes médicas y en simulación computacional, la aplicación de CFD permite estimar parámetros hemodinámicos clave que no podrían obtenerse mediante mediciones directas, y cuyos resultados han demostrado estar relacionados con eventos clínicos (Hassan et al., 2004; Cebral et al., 2003; Jou et al., 2004; Steinman et al., 2003; Rayz y Cohen-Gadol, 2020; Ishida et al., 2021).

En este contexto, el objetivo de este trabajo es analizar la fluidodinámica mediante simulaciones numéricas de CFD de dos casos de aneurismas cerebrales. Se evalúa la relevancia de los efectos no lineales de la sangre comparando un modelo constitutivo newtoniano con uno no newtoniano, específicamente el modelo de Casson. La comparación se centra en la estimación del WSS.

En la sección 2 se presentan los modelos geométricos correspondientes a los dos aneurismas analizados, junto con la formulación matemática empleada para modelar el flujo sanguíneo, las condiciones de contorno utilizadas y el proceso de generación de los dominios computacionales. En la sección 3 se analizan los resultados obtenidos para ambos casos, comparando el comportamiento del modelo newtoniano y del modelo de Casson. Finalmente, en la sección 4 se presentan las principales conclusiones del trabajo.

2. Materiales y métodos

En esta sección se describe la metodología utilizada para llevar a cabo las simulaciones CFD propuestas. Se comienza con una descripción de la base de datos utilizada, a partir de la cual se obtienen los dos modelos geométricos analizados. A continuación, se detalla la formulación matemática utilizada para modelar el flujo sanguíneo, considerando tanto el modelo newtoniano como el modelo de Casson. Luego, se especifican las condiciones de contorno impuestas sobre los modelos geométricos. Por último, se describen una serie de pasos para generar los dominios computacionales 3D.

Base de datos AneuriskWeb

El modelo geométrico de los dos casos a analizar se toma directamente de la base de datos AneuriskWeb (Aneurisk-Team, 2012), que proporciona modelos tridimensionales segmentados y refinados de aneurismas intracraneales y de sus vasos adyacentes. Esta base de datos fue desarrollada durante el proyecto Aneurisk entre 2005 y 2008, financiado por SIEMENS Medical Solutions y llevado a cabo en el Laboratorio MOX (*Modeling and Scientific Computing*) del Departamento de Matemáticas del Politécnico de Milán, con la colaboración de varias instituciones médicas.

La base de datos contiene 103 casos correspondientes a 99 pacientes con aneurismas saculares. Este tipo de aneurisma se caracteriza por un protuberancia o saco aneurismático que se conecta a la arteria madre mediante un cuello bien definido, y cuya zona redondeada, conocida como domo, sobresale hacia un solo lado de la pared arterial.

Especificamente, para cada caso, la base de datos proporciona:

- El modelo geométrico de la superficie del lumen, representado mediante una malla de triángulos obtenida a partir de la segmentación de imágenes 3DRA y su posterior procesamiento;
- El *ostium* del aneurisma, representado como un polígono que delimita el cuello, es decir, la abertura que conecta el aneurisma con la arteria madre;
- Las líneas centrales que describen el eje de los vasos; e
- Información clínica asociada, como la ubicación anatómica, la clasificación morfológica y el estado de rotura del aneurisma.

En este trabajo se utilizan específicamente los casos C0005 y C0034, ambos localizados en la arteria carótida interna (ICA). La Figura 1 presenta los modelos geométricos correspondientes a ambos casos, así como el detalle de los datos disponibles para el caso C0034. Puede encontrarse una copia clasificada y curada de la base de datos en el repositorio GitHub de la herramienta *software* AneuSI, utilizada para la extracción automática del

aneurisma y su entorno a partir del modelo del árbol arterial (Muzi, 2025).

Formulación matemática del flujo sanguíneo

La sangre se modela como un fluido incompresible y continuo. Su comportamiento está gobernado por la ecuación de conservación del momento de Cauchy y la ecuación de continuidad, expresadas respectivamente como

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} \right) = -\nabla P + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \mathbf{F}, \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0, \quad (2)$$

donde \mathbf{v} es el campo de velocidad del fluido, ρ es la densidad del fluido, P es la presión, $\boldsymbol{\tau}$ es el tensor de esfuerzos viscosos (también llamado tensor desviador), y \mathbf{F} representa fuerzas volumétricas externas, como la gravedad.

El tensor $\boldsymbol{\tau}$ depende del tensor del gradiente de velocidad $\nabla \mathbf{v}$, que puede descomponerse en una parte simétrica y otra antisimétrica

$$\nabla \mathbf{v} = \underbrace{\frac{1}{2} (\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T)}_{\text{Término simétrico}} + \underbrace{\frac{1}{2} (\nabla \mathbf{v} - \nabla \mathbf{v}^T)}_{\text{Término antisimétrico}}. \quad (3)$$

La parte simétrica, conocida como tensor de tasa de deformación \mathbf{D} , es la que origina los esfuerzos viscosos. Por otro lado, el término antisimétrico corresponde a una rotación rígida del fluido, es decir, un movimiento sin deformación que no produce esfuerzos viscosos.

La relación entre $\boldsymbol{\tau}$ y \mathbf{D} depende del tipo de fluido, lo que se conoce como ecuación constitutiva. En fluidos no newtonianos, como la sangre, que pueden considerarse incompresibles y puramente viscosos, la ecuación constitutiva está dada por

$$\boldsymbol{\tau} = 2\mu(\dot{\gamma})\mathbf{D} \quad (4)$$

donde $\mu(\dot{\gamma})$ es la función de viscosidad dinámica que depende de la tasa de corte $\dot{\gamma}$. Esta función también

se llama viscosidad efectiva o aparente. Para un fluido newtoniano, la función de viscosidad se

reduce a una constante μ_0 . La tasa de corte $\dot{\gamma}$ es una medida de la magnitud de \mathbf{D} y se define como

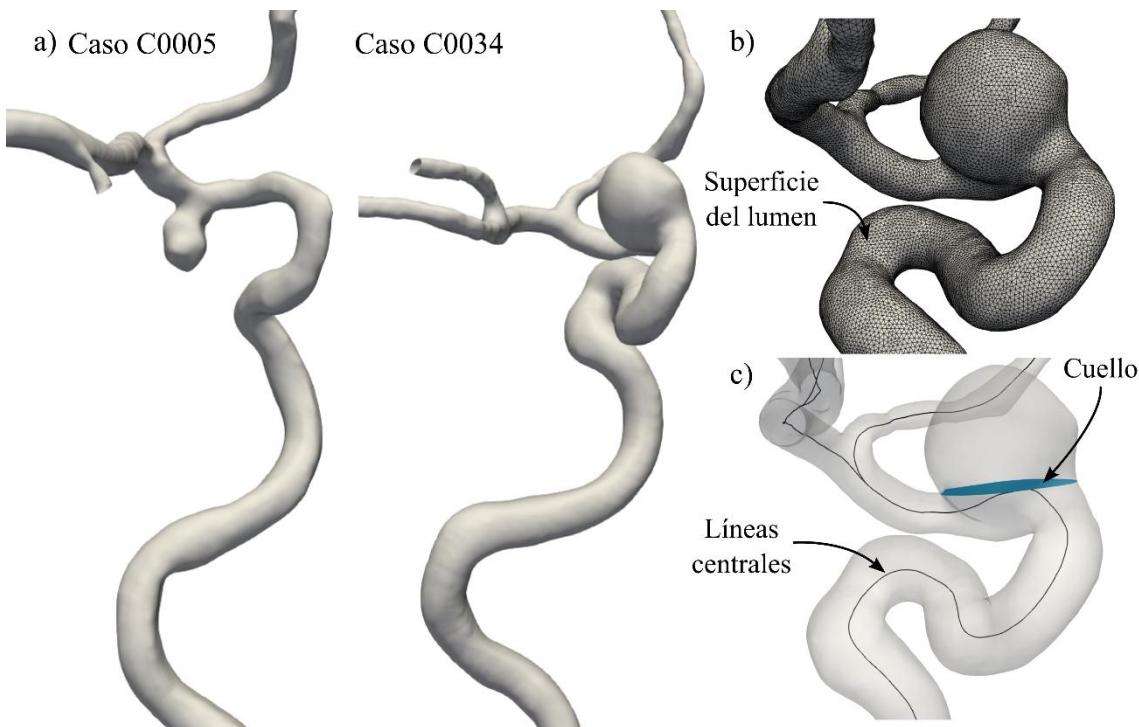


Figura 1. Modelos geométricos correspondientes a los casos C0005 y C0034 (izquierda), obtenidos de la base de datos AneuriskWeb, junto con los datos disponibles para el caso C0034 (derecha). a) Modelo geométrico del árbol arterial. b) Malla de triángulos representando la superficie del lumen. c) Cuello del aneurisma y líneas centrales de los vasos arteriales.

$$\dot{\gamma} = \sqrt{2} \|\mathbf{D}\|_F \quad (5)$$

donde $\|\mathbf{D}\|_F = \sqrt{\mathbf{D} : \mathbf{D}}$ es la norma de Frobenius. De manera análoga, se define el esfuerzo cortante τ como

$$\tau = \sqrt{1/2} \|\boldsymbol{\tau}\|_F \quad (6)$$

que representa una medida de la magnitud del tensor de esfuerzo viscoso en cada punto del dominio. Sustituyendo la ecuación (4) en esta definición, se obtiene

$$\tau = \mu(\dot{\gamma})\dot{\gamma} \quad (7)$$

Existen un gran número de modelos disponibles en la literatura para describir esta relación en el caso de fluidos no newtonianos. En particular, el modelo de Casson se ha usado ampliamente para describir el flujo sanguíneo y se expresa como

$$\sqrt{\tau} = \sqrt{\tau_0} + \sqrt{\mu_0}\dot{\gamma} \quad (8)$$

donde τ_0 es el esfuerzo de fluencia. Valores típicos para el flujo sanguíneo son $\tau_0 = 0.004$ Pa y $\mu_0 = 0.0035$ Pa·s.

Despejando $\mu(\dot{\gamma}) = \tau/\dot{\gamma}$ la función de viscosidad del modelo de Casson queda

$$\mu(\dot{\gamma}) = \left(\sqrt{\frac{\tau_0}{\dot{\gamma}}} + \sqrt{\mu_0} \right)^2 \quad (9)$$

la cual se representa gráficamente en la Figura 2 donde se representa mediante una zona sombreada la región donde se registran datos experimentales (Kundu y Cohen, 2008).

La Figura 3 compara el comportamiento del modelo newtoniano frente al modelo de Casson. Como se observa, ambos modelos difieren significativamente a muy bajas tasas de corte, pero exhiben una respuesta similar a altas tasas de corte. Por este

motivo, en muchas simulaciones se adopta un modelo newtoniano por su simplicidad computacional, especialmente donde el flujo sanguíneo alcanza tasas de corte elevadas y el comportamiento tiende a ser más lineal.

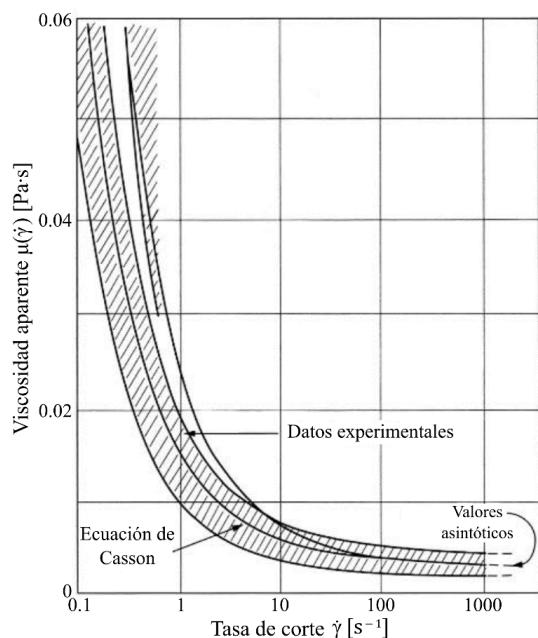


Figura 2. Curva de viscosidad aparente en función de la tasa de corte del modelo de Casson. Adaptada y traducida de (Kundu y Cohen, 2008).

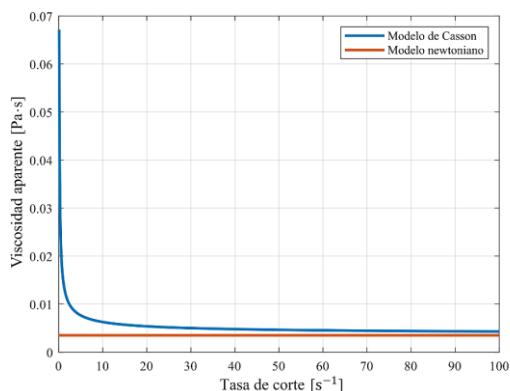


Figura 3. Curvas de viscosidad aparente en función de la tasa de corte de los modelos newtoniano y de Casson.

La comparación de estos modelos se realiza mediante el WSS, que representa el esfuerzo viscoso tangencial ejercido por el flujo sanguíneo sobre la

superficie de la pared arterial. Matemáticamente, el WSS se denota como t_{WSS} y se define como

$$t_{WSS} = \tau \cdot n - [(\tau \cdot n) \cdot n]n \quad (10)$$

donde n es el vector normal a la superficie de la pared y $\tau \cdot n$ representa el vector de esfuerzo viscoso, tal como se muestra en la Figura 4. Cabe aclarar que, aunque el WSS es una magnitud vectorial, en este trabajo se hará referencia exclusivamente a su magnitud cuando se presenten valores numéricos o se realicen comparaciones cuantitativas.

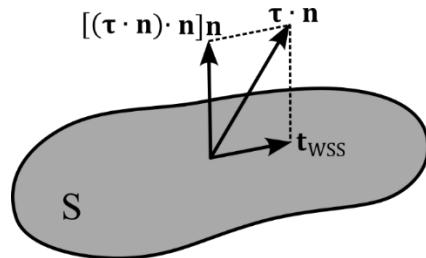


Figura 4. Representación esquemática de las componentes del vector de esfuerzo viscoso que actúa sobre una superficie S .

Debido a la complejidad de las geometrías involucradas, como en el caso de aneurismas, las ecuaciones (1) y (2) no admiten soluciones analíticas en general, por lo que deben resolverse mediante métodos numéricos. En este trabajo, se realiza la resolución numérica del sistema de ecuaciones mediante el *software* de código abierto OpenFOAM v2312 (OpenCFD Ltd, 2023), el cual emplea la técnica de volúmenes finitos.

Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno se imponen en tres regiones: entrada, salida y paredes, mediante la configuración que se muestra en la Figura 5.

En la entrada se impone una velocidad pulsátil en el tiempo, uniforme en el espacio. La variación de la velocidad en el tiempo se basa en la forma de onda típica del caudal durante el ciclo cardíaco. Esta condición se construye a partir de los datos experimentales reportados en (Ford et al., 2005), donde se caracterizó el flujo volumétrico en la ICA y la arteria vertebral mediante resonancia magnética de contraste de fase.

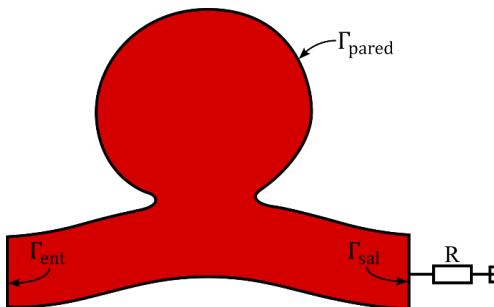


Figura 5. Configuración propuesta para imponer las condiciones de contorno sobre la superficie de la pared de la arteria y del aneurisma.

El perfil de velocidad en cada instante se obtiene dividiendo el caudal por el área de la sección de entrada. Además, se implementó una rampa lineal inicial de 0.29 segundos para suavizar la transición al inicio de la simulación y evitar comportamientos irreales del flujo por cambios bruscos de velocidad, siguiendo el enfoque adoptado en (Goetz et al., 2024). Entonces

$$\mathbf{v}(\mathbf{x}, t) = V(t)\mathbf{n}_{\text{ent}}, \forall \mathbf{x} \in \Gamma_{\text{ent}} \quad (11)$$

donde \mathbf{n}_{ent} es el vector normal a la entrada, Γ_{ent} representa la superficie correspondiente a la entrada del dominio y $V(t)$ es la magnitud de la velocidad, dada por la curva mostrada en la Figura 6.

Cabe destacar que imponer la misma velocidad promedio entre distintos casos de aneurismas es una elección más realista que imponer el mismo caudal, dado que las áreas de entrada pueden variar considerablemente. Este criterio asegura condiciones fisiológicas comparables entre simulaciones.

En la salida se aplican condiciones de contorno de presión basadas en variaciones fisiológicas. A lo largo de un ciclo cardíaco, la presión en el sistema vascular varía entre 80 y 120 mmHg para pacientes sanos. Estas variaciones se modelan colocando en la salida una resistencia hidráulica. Esta resistencia es un parámetro que busca capturar cómo las estructuras vasculares periféricas limitan el flujo, y se modela de manera análoga a la resistencia en un circuito eléctrico que limita el paso de la corriente eléctrica, tal como se muestra en la Figura 5.

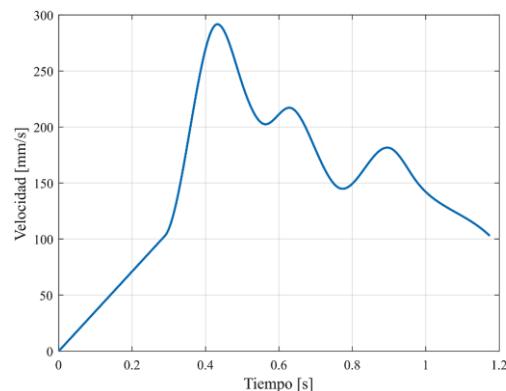


Figura 6. Magnitud de la velocidad $V(t)$ en la entrada del caso C0005.

La forma de onda de la presión se construye en fase con la entrada y su expresión está dada por

$$P = P_0 + QR, \forall \mathbf{x} \in \Gamma_{\text{sal}} \quad (12)$$

donde P_0 es una presión de referencia, R es la resistencia hidráulica, Γ_{sal} representa la superficie de la salida del dominio y Q el caudal de salida instantáneo, el cual es igual al caudal de entrada por conservación de masa.

Para hallar los valores de P_0 y R se reemplazan los valores límites de presión y de caudal en la ecuación (12). Entonces

$$P_{\max} = P_0 + Q_{\max}R = 120 \text{ mmHg} \quad (13)$$

$$P_{\min} = P_0 + Q_{\min}R = 80 \text{ mmHg} \quad (14)$$

siendo $Q_{\max} = 7.68 \text{ ml/s}$ y $Q_{\min} = 3.14 \text{ ml/s}$. Al resolver estas ecuaciones, se obtiene $R = 1.17 \text{ kPa}\cdot\text{s/ml}$ y $P_0 = 7 \text{ kPa}$.

En las paredes se impone una condición de contorno de no deslizamiento, lo cual significa que la velocidad del fluido en la interfaz es igual a la velocidad de la pared. Al asumir que la pared arterial es rígida, su velocidad es nula, por lo tanto, la velocidad del fluido también es cero en dicha superficie. Esta condición se expresa como

$$\|\mathbf{v}\| = \|\mathbf{v}_s\| = 0, \forall \mathbf{x} \in \Gamma_{\text{pared}} \quad (15)$$

donde v_s es la velocidad de la pared, y Γ_{pared} representa la superficie de la pared arterial y aneurismática.

Dominios computacionales

La metodología propuesta para generar los dominios computacionales se ilustra esquemáticamente en la Figura 7. El proceso combina herramientas desarrolladas por el grupo de Modelado Computacional en Ciencias Aplicadas e Ingeniería (MoCCAI), implementadas en C++ y basadas en las bibliotecas de código abierto VTK (*Visualization Toolkit*, (Schroeder, et al., 2006)) y CGAL (*The Computational Geometry Algorithms Library*, (Fabri y Pion, 2009)), junto con dos herramientas de mallado de código abierto: SALOME (SALOME Platform, 2023) y snappyHexMesh, perteneciente a OpenFOAM.

Las herramientas desarrolladas por el grupo MoCCAI utilizan el paquete *Polygon Mesh Processing* (PMP) de CGAL, un conjunto de algoritmos destinados al procesamiento de mallas poligonales.

El punto de partida corresponde a los modelos geométricos de los aneurismas, extraídos de AneuriskWeb. Dado que el interés se centra en la región próxima al aneurisma, se aísla esta porción del árbol arterial utilizando la herramienta *Clip* del software de código abierto ParaView (Ayachit, 2015). Se incluye un tramo suficientemente largo de región proximal para permitir que el flujo se desarrolle adecuadamente antes de ingresar al aneurisma. Esto se muestra en la Figura 8 para el caso C0034.

Tras realizar los cortes, la malla resultante puede presentar triángulos degenerados o muy agudos cerca de los bordes, lo que podría ocasionar problemas al momento de realizar la simulación numérica. Para solucionarlo, se aplica un remallado uniforme mediante el algoritmo *isotropic remeshing* del paquete PMP de CGAL, con un tamaño de elemento de 0.25 mm.

Para preparar la superficie cerrada requerida en el mallado volumétrico, se deben sellar los extremos abiertos correspondientes a la entrada y salida. Esto se logra utilizando el algoritmo *hole filling* del paquete PMP de CGAL, que detecta automáticamente bordes abiertos y rellena las

superficies de forma iterativa. Sin embargo, los triángulos generados por esta herramienta suelen ser no uniformes, por lo que se realiza un nuevo remallado utilizando SALOME, con un tamaño de elemento de 0.18 mm.

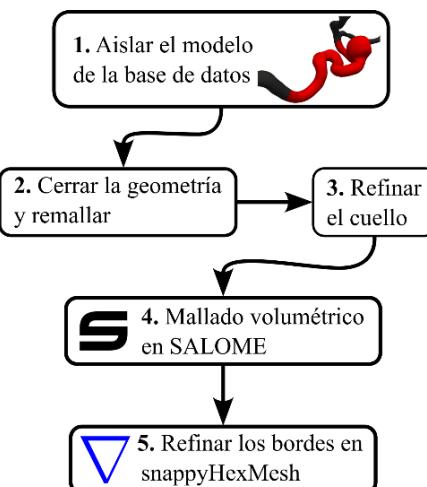


Figura 7. Esquema general de los pasos empleados para generar los dominios computacionales volumétricos.

En la región del cuello del aneurisma, donde se presentan altas curvaturas y cambios abruptos de dirección del flujo, se requiere una mayor resolución para evitar la generación de elementos de mala calidad. Para ello se aplican de manera secuencial los algoritmos *isotropic remeshing* y *smooth mesh* del paquete PMP de CGAL. Como resultado, se obtiene una malla con tamaño de elemento de 0.12 mm en la región del cuello y de 0.18 mm en el resto de la geometría. El resultado de este refinamiento se presenta en la Figura 9.

Una vez obtenida la malla superficial optimizada, se genera la malla volumétrica. Inicialmente se emplea el algoritmo GMSH (Geuzaine y Remacle, 2008) dentro de SALOME para obtener una malla tetraédrica uniforme. Sin embargo, para capturar adecuadamente los gradientes de velocidad en la capa límite, se utiliza snappyHexMesh, aplicando tres capas de refinamiento con una progresión geométrica de 1.2 y un espesor mínimo de 0.018 mm. Como resultado final, la malla del caso C0005 consta de aproximadamente 400 mil elementos y 110 mil nodos, mientras que la del caso C0034 está compuesta por 980 mil elementos y 250 mil nodos.

3. Resultados y Discusión

Con el objetivo de evaluar el impacto de la elección entre el modelo newtoniano o el modelo de Casson en la estimación del WSS, se llevaron a cabo simulaciones CFD para los casos C0005 y C0034. Para cada uno, se realizaron dos simulaciones idénticas en cuanto a condiciones de contorno, modificando únicamente el modelo constitutivo del fluido.

Las Figuras 11 y 12 muestran la evolución temporal del valor máximo del WSS registrados en las regiones del domo y el cuello del aneurisma durante el ciclo cardíaco. En ambos casos, las curvas asociadas a los modelos newtoniano y de Casson prácticamente se superponen a lo largo del ciclo cardíaco simulado.

Para cuantificar esta observación, se evalúa la diferencia porcentual relativa entre los valores máximos de WSS registrados cerca del pico sistólico, definida como

$$\Delta_{\text{rel}} = \frac{\|\mathbf{t}_{\text{WSS}}^{\max}\|_{\text{new}} - \|\mathbf{t}_{\text{WSS}}^{\max}\|_{\text{cas}}}{\|\mathbf{t}_{\text{WSS}}^{\max}\|_{\text{cas}}} 100 \quad (16)$$

donde $\|\mathbf{t}_{\text{WSS}}^{\max}\|_{\text{new}}$ y $\|\mathbf{t}_{\text{WSS}}^{\max}\|_{\text{cas}}$ son las magnitudes del WSS cerca del pico sistólico usando el modelo newtoniano y de Casson, respectivamente. En la Tabla 1 se resumen los resultados obtenidos, donde se observa que la diferencia relativa máxima entre ambos modelos es menor al 3.5%.

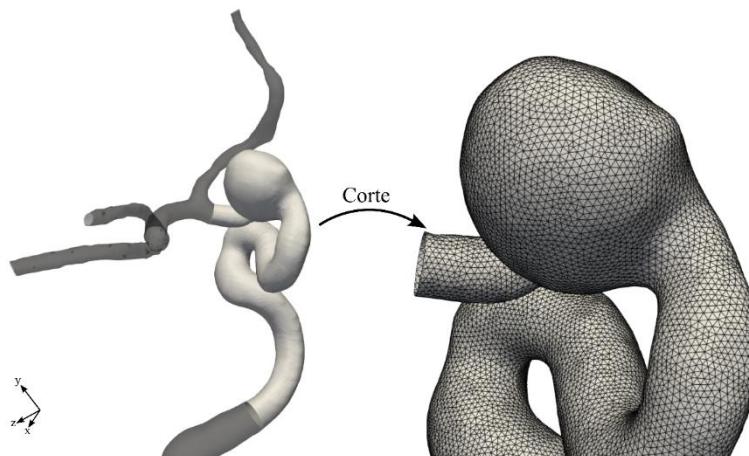


Figura 8. Árbol arterial completo (gris) del caso C0034 y porción extraída incluyendo el aneurisma.

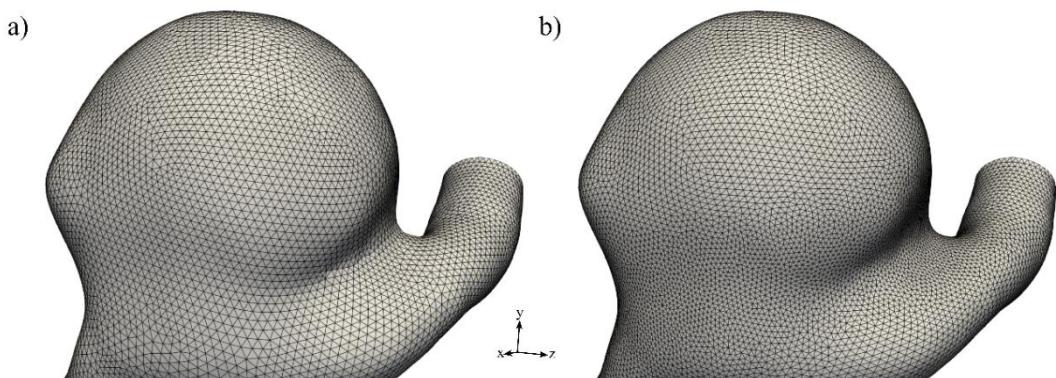


Figura 9. Refinamiento en la región del cuello del aneurisma del caso C0034.

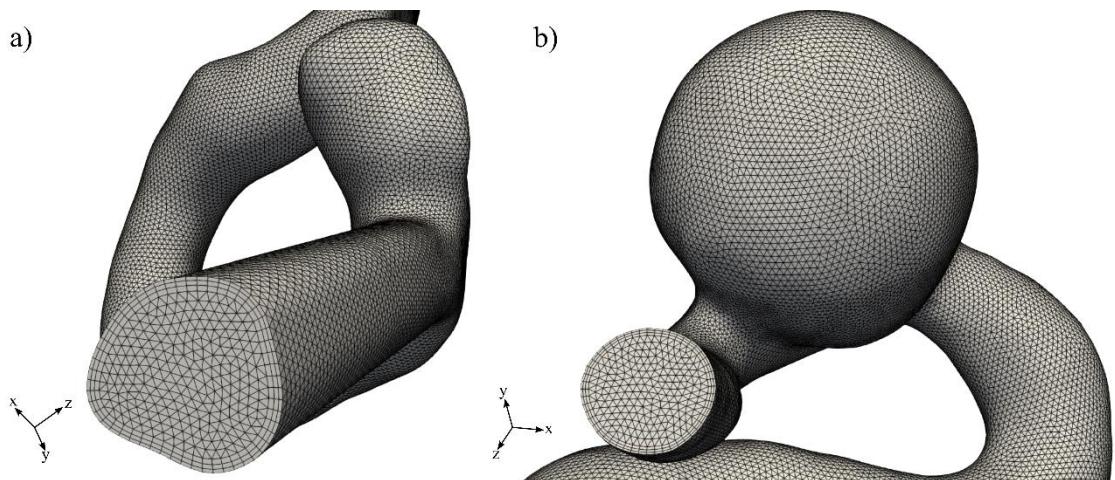


Figura 10. Dominios computacionales volumétricos de los casos: a) C0005 y b) C0034.

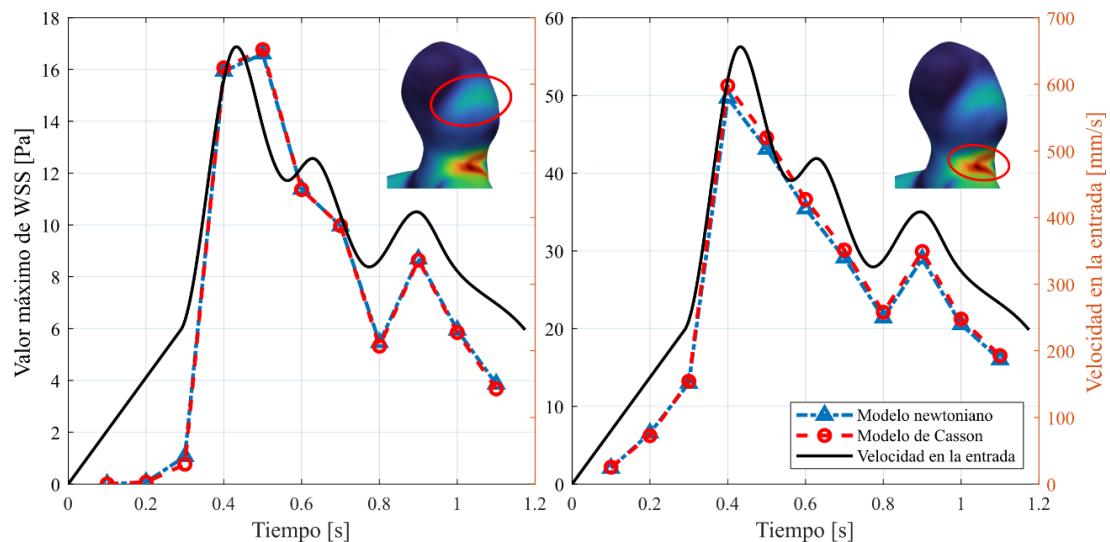


Figura 11. Comparación del valor máximo de WSS en el domo y el cuello del caso C0005 entre los modelos newtoniano y de Casson. Se incluye la curva de velocidad en la entrada $V(t)$ como referencia temporal. Las dos gráficas comparten las mismas variables y escalas en los ejes.

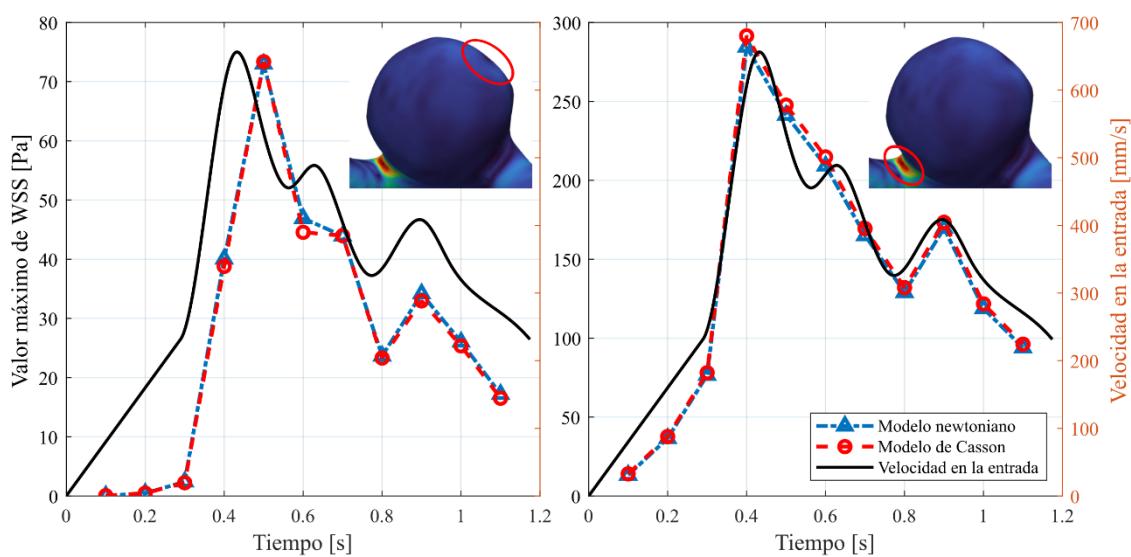


Figura 12. Comparación del valor máximo de WSS en el domo y el cuello del caso C0034 entre los modelos newtoniano y de Casson.

Tabla 1. Valores máximos del WSS registrados cerca del pico sistólico obtenidos con los modelos newtoniano y de Casson, junto con la diferencia relativa porcentual para las dos regiones de interés, cuello y domo, en los casos C0005 y C0034.

Caso	Región	$\ t_{WSS}^{\max}\ _{\text{new}} [\text{Pa}]$	$\ t_{WSS}^{\max}\ _{\text{cas}} [\text{Pa}]$	$\Delta_{\text{rel}} [\%]$
C0005	Cuello	49,68	51,25	3,07
	Domo	15,93	16,06	0,82
C0034	Cuello	284,49	291,51	2,40
	Domo	40,06	38,80	3,24

Esto indica que, bajo las condiciones de flujo evaluadas, el supuesto de modelar la sangre como un fluido newtoniano no introduce grandes variaciones en la estimación del WSS máximo. Estos resultados son consistentes con estudios previos (Valencia et al., 2006; Morales et al., 2013), en los que también se reportaron diferencias mínimas entre ambos modelos constitutivos en simulaciones de aneurismas cerebrales.

Sin embargo, esta conclusión no necesariamente es aplicable a cualquier caso de aneurisma. En aquellos

con zonas de bajo flujo, regiones con alta viscosidad o geometrías más complejas, el comportamiento no newtoniano de la sangre podría tener un mayor impacto en la dinámica del flujo y, por lo tanto, en la estimación del WSS. Por lo tanto, la elección del modelo constitutivo debe considerar las características específicas de cada caso.

Por otro lado, se observa en los dos casos una fuerte correlación temporal entre los valores de WSS y las variaciones de la velocidad en la entrada del dominio, lo que refuerza la importancia de

considerar condiciones de contorno pulsátiles en el modelo hemodinámico.

Un patrón común en ambos casos analizados es que los valores máximos de WSS se alcanzan en el cuello del aneurisma, superando los registrados en el domo. Esta diferencia podría tener implicancias en la evolución del aneurisma, ya que las zonas sometidas a mayor WSS podrían ser más susceptibles a sufrir remodelaciones o debilitamiento de la pared vascular.

4. Conclusiones

Los resultados obtenidos en este trabajo sugieren que para las condiciones hemodinámicas simuladas en los casos C0005 y C0034, el uso de un modelo newtoniano constituye una aproximación válida para la estimación del WSS. Las diferencias con respecto al modelo no newtoniano de Casson son inferiores al 3.5%, lo que indica que, en estas configuraciones particulares, la simplificación del modelo constitutivo no compromete la precisión de los resultados y permite reducir el costo computacional.

Este trabajo presenta una validación preliminar de un *pipeline* computacional que permite simular el flujo sanguíneo mediante CFD a partir de geometrías reales de aneurismas cerebrales. Dentro de esta metodología, se abordaron y resolvieron desafíos clave, como la generación de dominios computacionales con la calidad suficiente para garantizar resultados confiables. Los resultados obtenidos concuerdan con los reportados actualmente en la literatura, lo que respalda el enfoque propuesto.

Como trabajo a futuro, se propone ampliar el análisis a un mayor número de casos de la base de datos AneuriskWeb, lo que permitiría obtener conclusiones más generales sobre los distintos modelos constitutivos. Además, se sugiere incorporar otros modelos no newtonianos reportados en la literatura, como los modelos de Herschel-Bulkley y Carreau-Yasuda, con el objetivo de evaluar su impacto de forma similar a como se realizó con el modelo de Casson.

En definitiva, este estudio muestra las distintas etapas necesarias para constituir las bases de una herramienta computacional con potencial para

contribuir al análisis hemodinámico de aneurismas cerebrales y apoyar la toma de decisiones clínicas en casos específicos de pacientes.

5. Agradecimientos

Este trabajo fue parcialmente financiado por el Proyecto de Investigación 2025-2027 SIIP-UNCUYO (80020240100464UN) y el Proyecto de Fortalecimiento en Ciencia y Técnica 2025-2027 SIIP-UNCUYO (80020240400105UN). El autor B. Villegas agradece a la beca Manuel Belgrano del Ministerio de Educación de la República Argentina.

6. Referencias

- Aneurisk-Team. (2012). AneuriskWeb project website. Emory University, Department of Mathematics and Computer Science. <http://ecm2.mathcs.emory.edu/aneuriskweb>.
- Ayachit, U. (2015). The paraview guide: a parallel visualization application. Kitware, Inc.
- Bazilevs, Y., Hsu, M. C., Zhang, Y. A., Wang, W., Liang, X., Kvamsdal, T., ... & Isaksen, J. G. (2010). A fully-coupled fluid-structure interaction simulation of cerebral aneurysms. Computational mechanics, 46, 3-16.
- Bizjak, Ž., & Špiclin, Ž. (2023). A systematic review of deep-learning methods for intracranial aneurysm detection in CT angiography. Biomedicines, 11(11), 2921.
- Bonneville, F., Sourour, N., & Biondi, A. (2006). Intracranial aneurysms: an overview. Neuroimaging Clinics, 16(3), 371-382.
- Cebral, J. R., Castro, M. A., Appanaboyina, S., Putman, C. M., Millan, D., & Frangi, A. F. (2005). Efficient pipeline for image-based patient-specific analysis of cerebral aneurysm hemodynamics: technique and sensitivity. IEEE transactions on medical imaging, 24(4), 457-467.
- Cebral, J. R., Hernández, M., & Frangi, A. F. (2003). Computational analysis of blood flow dynamics in cerebral aneurysms from CTA and 3D rotational angiography image data. In International congress on computational bioengineering (Vol. 1, pp. 191-198).
- Cohen, I. M., & Kundu, P. K. (2008). Fluid mechanics. Elsevier.
- Fabri, A., & Pion, S. (2009). CGAL: The computational geometry algorithms library. In Proceedings of the

- 17th ACM SIGSPATIAL international conference on advances in geographic information systems (pp. 538-539).
- Ford, M. D., Alperin, N., Lee, S. H., Holdsworth, D. W., & Steinman, D. A. (2005). Characterization of volumetric flow rate waveforms in the normal internal carotid and vertebral arteries. *Physiological measurement*, 26(4), 477.
- Geuzaine, C., & Remacle, J. F. (2008). Gmsh: a three-dimensional finite element mesh generator with built-in pre-and post-processing facilities.
- Goetz, A., Jeken-Rico, P., Chau, Y., Sédat, J., Larcher, A., & Hachem, E. (2024). Analysis of intracranial aneurysm haemodynamics altered by wall movement. *Bioengineering*, 11(3), 269.
- Hassan, T., Ezura, M., Timofeev, E. V., Tominaga, T., Saito, T., Takahashi, A., ... & Yoshimoto, T. (2004). Computational simulation of therapeutic parent artery occlusion to treat giant vertebrobasilar aneurysm. *American journal of neuroradiology*, 25(1), 63-68.
- Hsu, M. C., & Bazilevs, Y. (2011). Blood vessel tissue prestress modeling for vascular fluid-structure interaction simulation. *Finite elements in analysis and design*, 47(6), 593-599.
- Huang, J., & Van Gelder, J. M. (2002). The probability of sudden death from rupture of intracranial aneurysms: a meta-analysis. *Neurosurgery*, 51(5), 1101-1107.
- Ishida, F., Tsuji, M., Tanioka, S., Tanaka, K., Yoshimura, S., & Suzuki, H. (2021). Computational fluid dynamics for cerebral aneurysms in clinical settings. *Trends in Cerebrovascular Surgery and Interventions*, 27-32.
- Jou, L. D., Quick, C. M., Young, W. L., Lawton, M. T., Higashida, R., Martin, A., & Saloner, D. (2003). Computational approach to quantifying hemodynamic forces in giant cerebral aneurysms. *American Journal of Neuroradiology*, 24(9), 1804-1810.
- Korja, M., Lehto, H., & Juvela, S. (2014). Lifelong rupture risk of intracranial aneurysms depends on risk factors: a prospective Finnish cohort study. *Stroke*, 45(7), 1958-1963.
- Lagares, A., Gómez, P. A., Alén, J. F., Arıkan, F., Sarabia, R., Horcajadas, A., ... & Vilalta, J. (2011). Hemorragia subaracnoidea aneurismática: guía de tratamiento del Grupo de Patología Vascular de la Sociedad Española de Neurocirugía. *Neurocirugía*, 22(2), 93-115.
- Lall, R. R., Eddleman, C. S., Bendok, B. R., & Batjer, H. H. (2009). Unruptured intracranial aneurysms and the assessment of rupture risk based on anatomical and morphological factors: sifting through the sands of data. *Neurosurgical focus*, 26(5), E2.
- Lindgren, A. E., Koivisto, T., Björkman, J., von und zu Fraunberg, M., Helin, K., Jääskeläinen, J. E., & Frösen, J. (2016). Irregular shape of intracranial aneurysm indicates rupture risk irrespective of size in a population-based cohort. *Stroke*, 47(5), 1219-1226.
- Morales, H. G., Larrabide, I., Geers, A. J., Aguilar, M. L., & Frangi, A. F. (2013). Newtonian and non-Newtonian blood flow in coiled cerebral aneurysms. *Journal of biomechanics*, 46(13), 2158-2164.
- Muzi, N., Millán D. AneuSI GitHub project. <https://github.com/nmuzi/AneuSI>. Visitado por última vez: 08 de julio de 2025.
- Oliveira, I. L. (2022). On the mechanics of intracranial aneurysms walls: numerical assessment of the influence of tissue hyperelastic laws and heterogeneity and the major role played by curvature on pathways to rupture.
- OpenCFD Ltd. (2023). OpenFOAM – The Open Source CFD Toolbox. www.openfoam.com.
- Rayz, V. L., & Cohen-Gadol, A. A. (2020). Hemodynamics of cerebral aneurysms: Connecting medical imaging and biomechanical analysis. *Annual review of biomedical engineering*, 22(1), 231-256.
- SALOME Platform. (2023). The open source platform for numerical simulation. www.salome-platform.org.
- Schroeder, W., Martin, K., & Lorensen, B. (2006). The visualization toolkit, 4th edn. Kitware. New York.
- Springer, M. V., Schmidt, J. M., Wartenberg, K. E., Frontera, J. A., Badjatia, N., & Mayer, S. A. (2009). Predictors of global cognitive impairment 1 year after subarachnoid hemorrhage. *Neurosurgery*, 65(6), 1043-1051.
- Steinman, D. A., Milner, J. S., Norley, C. J., Lownie, S. P., & Holdsworth, D. W. (2003). Image-based computational simulation of flow dynamics in a giant intracranial aneurysm. *American Journal of Neuroradiology*, 24(4), 559-566.
- Valencia, A., Zarate, A., Galvez, M., & Badilla, L. (2006). Non-Newtonian blood flow dynamics in a right internal carotid artery with a saccular aneurysm. *International*

Journal for Numerical Methods in Fluids, 50(6), 751-764.

Wardlaw, J. M., & White, P. M. (2000). The detection and management of unruptured intracranial aneurysms. *Brain*, 123(2), 205-221.

Composición nutricional de ricota de la planta piloto de la Universidad Nacional de Luján. Evaluación estadística y tabla nutricional

Aracelli Lelia Alvarez¹, Marina Vanesa Medanich^{1*}, Daniela Giselle Sanmartino¹

1. Departamento de Tecnología, Universidad Nacional de Luján, Ruta 5 y Avenida Constitución - (6700) Luján, Buenos Aires, Argentina.

*E-mail: nutricion2019unlu@gmail.com

PALABRAS CLAVES

Ricota magra
Ricota semi grasa
Tabla nutricional

RESUMEN

La planta piloto de la UNLu complementa la formación de los estudiantes produciendo alimentos como quesos y ricota. La ricota carece de información nutricional, lo que motiva la necesidad de analizar su composición y cumplir con las normativas vigentes. Se analizaron 9 muestras elaboradas a partir de sueros de distintos quesos. Se determinó humedad, ceniza, proteína, grasa, según técnicas oficiales, carbohidratos asimilables por diferencia y calorías usando los factores de conversión.

El análisis estadístico por la prueba ANOVA mostró heterogeneidad de los valores para humedad y grasa. Se clasificaron según el Código Alimentario Argentino CAA como "Ricota magra" (RM) contenido menor a 5% de grasa y como "Ricota semi grasa" (RSG) mayor a 5%. Los resultados fueron: humedad 80,0% (RM) y 75,3% (RSG), proteínas 9,3% (RM) y 9,0% (RSG), grasa 4,5% (RM) y 11,0% (RSG), carbohidratos 4,6% (RM) y 3,2% (RSG) y aporte calórico 96 kcal% (RM) y 149 kcal% (RSG). Se confeccionaron dos tablas nutricionales, una para cada tipo de ricota.

Se evidenció una correspondencia entre los sueros de elaboración. La (RM) proviene de sueros de quesos de baja humedad y la (RSG) de sueros de quesos de media y alta humedad.

Nutritional composition of ricotta from the pilot plant of the National University of Lujan. Statistical evaluation and nutritional table

KEYWORDS

TPA
Pseudocereal
Modified flour
High-energy milling

ABSTRACT

The pilot plant of the UNLu complements student training by producing cheeses and ricotta. The ricotta lacks nutritional information, which motivates the need to analyze its composition and comply with regulations. Nine samples made from whey from different cheeses were analyzed.

Moisture, ash, protein, and fat were determined using official techniques, digestible carbohydrates by difference, and calories using conversion factors.

The statistical analysis using the ANOVA test showed heterogeneity in the values for moisture and fat. They were classified according to the CAA as "Lean Ricotta" (LR) with less than 5% fat, and "Semi-fat Ricotta" (SFR) with more than 5%. The results were: moisture 80.0% (LR) and 75.3% (SFR), protein 9.3% (LR) and 9.0% (SFR), fat 4.5% (LR) and 11.0% (SFR), carbohydrates 4.6% (LR) and 3.2% (SFR), and caloric value 96 kcal% (LR) and 149 kcal% (SFR). Two nutritional tables were prepared, one for each type of ricotta.

A correspondence was observed between the whey used in production. The (LR) comes from whey of low-moisture cheeses and the (SFR) from whey of medium- and high-moisture cheeses.

1. Introducción

La planta piloto de la Universidad Nacional de Luján depende del Centro de Investigación, Docencia, y Extensión en Tecnología de Alimentos (CIDETA). En ella se planifican y desarrollan actividades prácticas específicas, empleando sus instalaciones a fin de complementar y reforzar los conceptos teóricos adquiridos durante la cursada de diferentes asignaturas. Cuenta con varias líneas de procesamiento de productos lácteos, cárnicos, panificados y dulces y conservas frutihortícolas, en las cuales los estudiantes reciben formación práctica. En el marco de las actividades académicas, en la planta piloto, se elaboran diversos alimentos que luego de envasados, se comercializan en el local ubicado en la sede central de la Universidad Nacional de Luján.

Se producen distintos tipos de quesos de pasta blanda, semidura y dura con la leche proveniente del tambo del campo experimental de la UNLU. En el proceso de elaboración de los quesos se coagula la leche mediante la acción de la renina o cuajo (método enzimático) o bien, por una acidificación hasta llegar al punto isoelectrónico de las proteínas (\approx pH 4,6 temperatura 21°C) (AMIOT, 1991). Como resultado se separan dos fases: por un lado, la cuajada, que contiene gran parte de los componentes insolubles de la leche y parte del agua, y por el otro, un líquido amarillento denominado suero lácteo, el cual representa un 83% del volumen total de la leche tratada.

La caseína que precipita será la base del queso y las lactoglobulinas y albúminas permanecerán en el suero lácteo.

En la industria lechera de nuestro país se utilizan los lactosueros como materia prima para la producción de ricota. Este agregado de valor es una buena opción para el aprovechamiento de los nutrientes de los subproductos de la leche, como así también menor impacto ambiental debido a la reducción de materia orgánica y volumen en los líquidos residuales de la fabricación de quesos (Finten, 2015).

Se puede destacar que el lactosuero constituye una materia prima valiosa, de alta calidad nutritiva para la alimentación humana.

La leche y sus derivados, como la ricota obtenida a partir del suero de queso, son productos muy importantes en la alimentación humana, contienen nutrientes en concentraciones apropiadas para satisfacer las necesidades del ser humano en sus distintas etapas de crecimiento (Massola, 2011).

Los lácteos son un alimento fuente principal de calcio, aporta proteínas de alto valor biológico, vitaminas (A, D, B2 y B12) y también otros minerales como fósforo y magnesio.

La ricota no tiene estructura compacta como la mayoría de los quesos, si no granulosa y suave al paladar, es un derivado lácteo de muy alta humedad con textura cremosa y blanda. Tiene sodio y grasa en niveles más bajos que otros tipos de quesos debido a su alta humedad. El contenido de grasa depende principalmente del tipo de leche o lactosuero con el que se elabore (Massola, 2011).

Las Guías de Alimentación para la Población Argentina (GAPA) recomiendan el consumo diario de lácteos preferentemente en sus versiones descremadas o parcialmente descremadas al menos tres porciones al día (Ministerio de Salud, 2018).

La planta piloto no cuenta con la tabla nutricional de la ricota en su rotulado. Siendo este producto uno de los más comercializados entre la comunidad universitaria surge la inquietud y necesidad de contar con información nutricional actualizada de la ricota.

La información nutricional contribuye a poder elegir una alimentación saludable. En los últimos años se observa un crecimiento en el interés de los consumidores sobre temas relacionados a la salud y una mayor conciencia sobre los alimentos que se consumen. La información se debe presentar de manera simple y de fácil comprensión, ya que el rótulo de los alimentos es el principal medio de comunicación entre los productores y los consumidores. El capítulo V del CAA desde el año 2006 establece el rotulado nutricional obligatorio en los alimentos envasados mediante las Res. GMC 46/03 y la 47/03. Aporta una descripción detallada sobre el contenido de nutrientes de los alimentos, de gran importancia para que el consumidor cuente con información al momento de realizar la compra reconociendo la presencia de nutrientes críticos para su salud (Ministerio de Agroindustria, 2016).

Por lo antes expuesto es de gran importancia que la ricota elaborada en la planta piloto de la universidad cuente con el rotulado nutricional. Se considera valioso realizar las determinaciones necesarias para la confección de la tabla nutricional del mencionado producto.

Para la confección del rotulado nutricional se realizan las determinaciones de la composición centesimal, sodio, perfil de ácidos grasos y colesterol. Asimismo, se analizaron los resultados obtenidos para asegurar que el producto cumpla con la normativa vigente establecida en el Código Alimentario Argentino (CAA).

Este trabajo de investigación formó parte de un trabajo de integración final de la carrera Tecnicatura Universitaria en Inspección de Alimentos de la Universidad Nacional de Luján dejando como aporte a la institución el rótulo nutricional de la ricota elaborada en la planta.

Marco legal

Ricota

Dentro de la clasificación de quesos, la ricota se considera como un queso de pasta blanda o queso fresco porque no requiere maduración en su proceso. Nuestra normativa lo define dentro del Capítulo VIII de "Alimentos Lácteos" en el Artículo 614 como el producto obtenido por precipitación mediante el calor en medio ácido producido por acidificación, debida al cultivo de bacterias lácticas apropiadas o por ácidos orgánicos permitidos a ese fin, de las sustancias proteicas de la leche (entera, parcial o totalmente descremada) o del suero de quesos (Código Alimentario Argentino, año 2006).

Para su elaboración se debe alcanzar un pH de 4,65, permitiendo así la precipitación de sus proteínas y la recuperación de trazas de caseína presentes al alcanzar su punto isoeléctrico (AMIOT, 1991). Se exige que la ricota elaborada de lactosuero, al igual que la proveniente de leche, debe cumplir con un proceso de estabilización mínimo de 24 horas, se debe envasar en material bromatológicamente apto que evite su contaminación, refrigerar a menos de 10°C ya que es un alimento perecedero y estará prohibido su fraccionamiento en lugares de expendio. Dicho artículo del CAA establece las exigencias que debe cumplir el producto según su

materia prima. Cuando provenga de suero de queso podrá ser adicionada de leche y/o crema y se clasifica en función de su humedad y contenido de grasa en tres variedades:

- Ricotta o Ricota con Crema: agua, máx.: 75,0% grasas: más de 11,0%.
- Ricotta o Ricota Semigrasa: agua, máx.: 77,0% grasas: 5,0-11,0%.
- Ricotta o Ricota Magra: agua máx.: 80,0% grasas: menos de 5,0%.

Información nutricional

El rotulado nutricional se define como toda descripción destinada a informar al consumidor sobre las propiedades nutricionales de un alimento. Debe incluir la declaración del valor energético y de nutrientes, así como también la declaración de las propiedades nutricionales. La Resolución GMC N.º 046/03 establece el "Reglamento Técnico MERCOSUR sobre Rotulado Nutricional de Alimentos Envasados", de cumplimiento obligatorio para todos los productos alimenticios envasados, fue incorporada al Código Alimentario Argentino por Resolución Conjunta SPRRS N.º 149/05 y SAGPyA N.º 683/05 del 8 de septiembre de 2005 y puesta en vigencia a partir del 1º de agosto de 2006.

La Resolución GMC N.º 047/03 establece el "Reglamento Técnico MERCOSUR de Porciones de Alimentos Envasados a los fines del Rotulado Nutricional" define los tamaños de las porciones de los alimentos envasados a los fines del rotulado nutricional en gramos o ml indicando también su equivalente en medida casera, incorporada al Código Alimentario Argentino por la misma resolución conjunta en su capítulo V de "Rotulado y publicidad de alimentos". Adicionalmente la información nutricional puede ser expresada por 100 g.

La normativa exige la declaración del valor energético y nutrientes del alimento por porción. El valor energético se obtiene sumando el aporte de energía de las proteínas, las grasas, los carbohidratos asimilables y los alcoholos.

Es obligatorio declarar el contenido cuantitativo del valor energético y de los siguientes nutrientes en las unidades correspondientes.

- Valor energético (kcal y kJ)
- Carbohidratos (g)
- Azúcares totales (g)
- Azúcares añadidos (g)
- Proteínas (g)
- Grasas totales (g)
- Grasas saturadas (g)
- Grasas trans (g)
- Fibra alimentaria (g)
- Sodio (mg)

En los anexos de la Resolución se encuentran establecidas las porciones para cada alimento en particular y los modelos de los cuadros.

La información nutricional debe incluir el porcentaje de valor diario (%VD) por porción de alimento. Estos valores brindan información de fácil lectura sobre el porcentaje de nutrientes que cubre diariamente la porción del alimento indicada en el rótulo.

En el porcentaje de valor diario queda excluida la declaración de grasas trans.

El porcentaje de valor diario del valor energético y de cada nutriente, debe calcularse a partir de los Valores Diarios de Referencia de Nutrientes (VDR) y de Ingesta Diaria Recomendada (IDR) presentadas en el ANEXO A de la Resolución, con los siguientes valores:

	Valor de referencia
Valor energético	2000 kcal – 8400 kJ
Carbohidratos	300 g
Proteínas	75 g
Grasas Totales	55 g
Grasas Saturadas	22 g
Fibra Alimentaria	25 g
Sodio	2400 mg

Se debe agregar como parte de la información nutricional la siguiente expresión: "Sus valores diarios pueden ser mayores o menores dependiendo de sus necesidades energéticas"; tomándose como referencia una dieta de 2000 kilocalorías (8400 kJ).

Se acepta una tolerancia de \pm 20% respecto a los valores de nutrientes declarados en el rótulo, en relación con los valores reales del producto.

El objetivo del presente trabajo fue elaborar la tabla nutricional de la ricota que se elabora en la Planta Piloto de la Universidad Nacional de Luján y evaluar la variabilidad de la composición de nutrientes entre los diferentes lotes.

2. Materiales y métodos

Se buscó bibliografía sobre información general de la ricota, clasificación de los distintos tipos, métodos oficiales utilizados para las determinaciones analíticas para la composición nutricional, normativas vigentes para el rotulado nutricional y uso de técnicas estadísticas.

Selección de los métodos analíticos a utilizar

Se determinaron los macronutrientes según las técnicas analíticas de FIL/IDF y AOAC. Los procedimientos correspondientes a dichas técnicas, se encuentran desarrollados en el Anexo.

Muestras

Las muestras de ricota utilizadas para realizar este trabajo fueron elaboradas y envasadas para su expendio en la planta piloto de la Universidad Nacional de Luján. Se recibieron 10 muestras de ricota, seleccionadas de 10 lotes, elaboradas a partir de lactosuero provenientes de diferentes tipos de queso (reggianito, sardo, gouda, pategras, y cuartirolo) en un lapso de 6 semanas. Se analizaron 9 muestras para las determinaciones de macronutrientes ya que por un problema en la conservación se descartó la número 3.

Todas las muestras se conservaron en condiciones de refrigeración, dentro de su envase original termosellado al vacío, hasta el momento de su apertura para el muestreo analítico.

Se tomó registro de las fechas de elaboración, envasado y análisis junto con el detalle del origen del lactosuero utilizado como materia prima.

Una vez abierto el envase, se traspasó a recipientes adecuados, se aplicaron técnicas de homogeneización para obtener un producto

uniforme y representativo del universo muestrado. De allí se tomaron las muestras analíticas.

Las determinaciones se realizaron en el mismo momento en que se abrió el envase para resguardar el contenido de humedad original del producto y siempre dentro de los primeros cinco días de elaborado el lote.

El material restante se acondicionó adecuadamente para el caso de requerirse repeticiones.

Determinaciones analíticas

Todas las determinaciones gravimétricas fueron pesadas en balanza analítica por duplicado o triplicado según corresponda.

-Humedad

FIL-IDF 21B 1987

Se pesó entre 2,5 y 3,0 gramos de muestra previamente homogeneizada en cristalizadores de vidrio, distribuyéndola en una fina capa extendida en toda su superficie. Se dejó en estufa durante dos horas a 105 °C, se enfrió y se pesó. Repitiendo este último paso hasta peso constante.

-Cenizas

AOAC 935.42

A partir del contenido de cenizas evaluado por gravimetría se conoció la cantidad de minerales que contiene un alimento. El método consiste en la incineración en mufla a 525 °C, previa carbonización en mechero. Se pesó 1,0 de muestra de muestra en cápsulas de porcelana y se la colocó sobre un mechero con tela de amianto, luego se expuso con triángulo de pipa a la llama directa hasta que dejó de emitir humo. Una vez carbonizada se la llevó a mufla donde permaneció a temperatura de 525 °C durante 3 horas. Se retiró, se enfrió en desecador y se pesó.

-Proteínas

FIL-IDF 20B 1993 (método Kjeldahl)

El contenido de nitrógeno total y proteína total se determinó por el método de Kjeldahl.

Este método se caracteriza por una digestión con ácido sulfúrico concentrado en presencia de catalizadores donde por calentamiento se oxida la materia orgánica de la muestra y se reduce el nitrógeno orgánico. La segunda etapa, consta de una destilación, el nitrógeno que está como amonio es liberado como amoniaco, por agregado de hidróxido de sodio, siendo recogido en ácido bórico. Se cuantifica por titulación con ácido sulfúrico 0,1 N valorado.

En la primera etapa, se pesó entre 0,8 y 1,2 gramos de muestra en un papel libre de nitrógeno. Se llevó a cabo la digestión con 12 ml ácido sulfúrico, usando como catalizadores sulfato de cobre (2 mL solución al 5% m/v) y 3 gramos de sulfato de potasio, en la unidad digestora UK8S, con bomba de vacío y unidad neutralizadora de humos a 420 °C.

El resultante de la digestión se destiló por arrastre de vapor con exceso de hidróxido de sodio en la unidad destiladora UDK 129 donde se liberó el amoniaco, que fue recogido en ácido bórico al 4% m/v con colorante de tashiro como indicador. Por último, se tituló la solución producto de la destilación con ácido sulfúrico 0,1 N valorado. El ácido consumido en esta valoración es equivalente al amoniaco presente y por lo tanto al contenido de Nitrógeno total de la muestra. Se utilizó el factor de conversión de nitrógeno a proteína 6,38.

-Materia grasa total (método gravimétrico)

FIL-IDF 5B 1986

El contenido total de materia grasa se determinó por el método de hidrólisis ácida que consta de tres partes. Se realizó una hidrólisis de aproximadamente 1 gramo de muestra con 10 ml de ácido clorhídrico en un vaso de precipitados durante 30 minutos en un baño de agua hirviendo. Luego se realizaron las extracciones en tubo mojonnier con 25 mL de éter etílico y 25 mL de éter de petróleo, trasvasando la fase etérica a un balón previamente tarado, se repitieron dos extracciones más con 30 ml de una mezcla de los éteres en partes iguales. Se retiró el éter por destilación en plancha calefactora, quedando en el balón la materia grasa. Se llevó a la estufa por una hora a 105 °C, se enfrió y se pesó. Se repitió el proceso de secado hasta peso constante. Se obtuvo el % de materia grasa por diferencia entre el peso inicial del balón vacío y el peso del balón una vez retirado el éter y enfriado.

-Hidratos de carbono

Los carbohidratos se calculan a partir de lo que establece la normativa en su resolución GMC 46/03 del Capítulo V del Código Alimentario Argentino donde dice que se debe calcular como la diferencia entre 100 y la suma del contenido de humedad, cenizas, proteínas, grasas y fibra alimentaria. Por la matriz de la muestra que es de origen animal se considera que no contiene fibra.

-Valor energético

Por cálculo con los factores de conversión correspondientes:

- Carbohidratos (excepto polialcoholes) 4 kcal/g - 17 kJ/g
- Proteínas 4 kcal/g - 17 kJ/g
- Grasas 9 kcal/g - 37 kJ/g

-Perfil de ácidos grasos determinación por CGL

El método consta de tres partes.

*Extracción de grasa por método de Bligh and Dyer

Se extrajo la materia grasa de una porción de 2 gramos de ricota en un homogeneizador Omnimixer, con agua, cloroformo y metanol. En centrífuga Sorvall se separaron las dos fases, se retiró la inferior, se filtró y se evaporó el solvente con rotavapor.

*Preparación de metilésteres de ácidos grasos según Norma IRAM 5650-II

Se metilaron los ácidos grasos de la materia grasa obtenida con metóxido de sodio, calor y agitación y se los extrajo con hexano.

*Corridas cromatográficas para la identificación y cuantificación de los ácidos grasos presentes en un cromatógrafo gaseoso marca Shimadzu Modelo GC-1020ATF Plus con inyector Split/Splitless para columnas capilares con AFC, horno de alta potencia, detector FID de alta sensibilidad.

Las condiciones del método fueron:

- Fase estacionaria: Columna RT2560 de 100 m, 0,25 mm, 0,25 µm, RESTEK
- Fase móvil N₂
- Detector con llama de ionización a 250 °C
- Inyector: 250 °C
- Temperatura de la columna isotérmica: 200 °C Se inyectó 1 µl de la muestra.

Se identificaron los picos de los ácidos grasos AG por comparación de tiempos de retención de estándares de referencia. Se calculó la concentración de AG por el método de cuantificación de Áreas %. Se realizaron las etapas de extracción de materia grasa y metilación y dada la complejidad del uso del cromatógrafo gaseoso, se presenciaron las corridas cromatográficas de las muestras tal como estaba previsto.

-Colesterol (Kovac Método C)

El método consta de tres partes.

*Saponificación de las muestras de ricota (1 gramo) (con 1 mL de hidróxido de potasio al 50% p/v) y 4 mL de etanol durante 1 hora en plancha calefactora con agitación magnética.

*Extracción con 4 porciones de 5 ml hexano de la materia insaponificable.

*Cuantificación por CGL en un cromatógrafo gaseoso marca Shimadzu Modelo GC-1020ATF

Plus con detector FID de alta sensibilidad, utilizando una columna DB5 con temperatura isotérmica a 300 °C con detector de llama y nitrógeno como carrier. Se utilizó como estándar interno 5α-coletsano y se cuantificó por comparación de áreas.

-Sodio por el método espectrometría de absorción atómica

AOAC 972.25

La muestra se pesó en cápsulas de porcelana acondicionadas previamente con solución de ácido nítrico. Se obtuvo la ceniza de la manera ya descrita.

Se trató la misma con ácido nítrico, se secó en plancha a baja temperatura y se sometió nuevamente a mufla a 525 °C por una hora. Luego se midieron las muestras en un equipo de espectrómetro de absorción atómica Perkin Elmer Analyst 200 con atomizador electrotérmico, HGA 900, automuestreador AS800, FIAS 100 (Flow Injection analysis system) y Software WinLab32 for AA.

Análisis estadístico

El análisis estadístico se realizó con el método de Varianza de un factor donde se sometieron a comparación múltiple los resultados obtenidos, agrupados según el suero de procedencia.

Esta técnica se utiliza para comparar la media de tres o más grupos y determinar si existen diferencias significativas entre ellas.

Un valor de $P>0,05$ nos indica la probabilidad de que la hipótesis nula H_0 sea cierta, es decir que no existe diferencia significativa entre las medias de los grupos planteados. Mientras que un valor de $P<0,05$ permite rechazar la H_0 .

Se sometieron a análisis comparativo los datos de contenido graso, humedad y proteínas de las muestras de ricota analizadas. Las comparaciones se realizaron en primer lugar entre el grupo de resultados obtenidos del análisis de ricotas provenientes de suero de quesos de muy alta humedad y los obtenidos del análisis de ricotas provenientes de suero de quesos de mediana humedad. En segunda instancia se sometió a comparación este nuevo grupo de resultados del análisis de ricotas provenientes de suero de quesos de mediana y alta humedad con el grupo de datos obtenidos del análisis de ricotas provenientes de suero de quesos de baja humedad.

Armado de la Tabla Nutricional

La tabla nutricional se confeccionó respetando la normativa vigente que establece el Capítulo V del Código Alimentario Argentino. Para establecer la porción correspondiente que exige el rotulado nutricional se consultó la resolución GMC N.º 047/03: "Reglamento Técnico MERCOSUR de Porciones de Alimentos Envasados a los fines del Rotulado Nutricional". En su anexo, en la tabla IV de

"lácteos y derivados" especifica el tamaño de la porción en gramos y medida casera que se debe definir para este tipo de alimento.

3. Resultados y Discusión

Composición centesimal

Se presentan los resultados de composición centesimal en la Tabla 1. Siendo A y B duplicados de una misma muestra.

Considerando la humedad del queso del cual proviene el suero utilizado para la elaboración de cada una de las muestras se decidió clasificar en:

- Ricota de suero de queso de alta humedad (cuartiolo).
- Ricota de suero de queso de mediana humedad (gouda y pategrás).
- Ricota de suero de queso de baja humedad (sardo y reggianito) como se muestra en la Tabla 2.

Evaluando los resultados promedios obtenidos para la materia grasa, y considerando los valores definidos en el CAA Art 614 se decidió agrupar según el contenido de grasa en mayor o menor a 5%.

La categoría con contenido de grasa mayor al 5% incluye ricotas provenientes de sueros de quesos de alta humedad (cuartiolo) y mediana humedad (gouda y pategrás). Ver Tabla 3.

La categoría con contenido de grasa menor al 5% incluye ricotas provenientes de sueros de quesos de baja humedad (Reggianito, sardo). Ver Tabla 4.

Análisis estadístico

Análisis de varianza de un factor

Se comparó el contenido de materia grasa de las ricotas provenientes de suero de quesos de muy alta humedad y de ricotas provenientes de suero de quesos de mediana humedad. Como se muestra en la Tabla 5.

Esta comparación permitió unificar los datos en un solo grupo, ya que el análisis no arrojó diferencias significativas entre los valores. ($P>0,05$)

En segunda instancia, se comparó el contenido de materia grasa de este nuevo grupo de "ricotas provenientes de suero de quesos de mediana y alta humedad" con el grupo de "ricotas provenientes de suero de quesos de baja humedad".

La comparación entre estos dos últimos grupos resultó $P<0,05$, por lo tanto, existen diferencias significativas y no corresponde agruparlos.

Quedando finalmente dos grupos bien definidos que varían significativamente en su contenido graso y por consiguiente en su valor calórico.

Con el objetivo de evaluar si existen diferencias significativas en los valores de humedad y proteínas entre las ricotas agrupadas por el análisis estadístico según su contenido de materia grasa, se llevó a cabo la comparación estadística para los contenidos de humedad y proteínas. Los resultados se muestran en la Tabla 7 y 8.

Podemos observar valores de $P>0,05$, por lo tanto, no existen diferencias significativas entre sus medias, pudiendo ser agrupadas.

A partir de este análisis, y según la normativa del código, las muestras pueden clasificarse en: ricota magra y ricota semi grasa.

Se confeccionaron las tablas nutricionales para cada tipo de ricota:

Ricota Magra: contenido graso menor al 5%. Ricota Semi grasa: contenido graso mayor al 5%.

Sodio

Para la determinación de sodio se analizaron por duplicado, tres muestras provenientes de suero de cada tipo de queso. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 9.

Perfil de ácidos grasos

Se analizaron 6 muestras de ricota, provenientes de suero de distinta procedencia de queso. Los resultados obtenidos se muestran en las Tablas 10 - 11 y 12.

Colesterol

Para la determinación de colesterol se analizaron 5 muestras de ricota por duplicado, una por cada tipo de queso de procedencia. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 13 y 14.

Presentación de la tabla nutricional

Según se establece en el CAA y a partir de los datos obtenidos se confeccionaron dos rótulos nutricionales para ricota magra y ricota semi grasa.

Tabla 1. Resultados generales por muestra de ricota.

Nº Muestra	Procedencia		Humedad	Cenizas	Materia Grasa	Proteína	Hid. de Carbono
1	Queso Gouda	A	78,13	1,20	10,46	7,80	2,40
		B	78,28	1,19	9,88	8,19	2,46
		Promedio	78,21	1,19	10,17	8,00	2,43
		DS	0,10	0,01	0,41	0,28	0,04
2	Queso Cuartirolo	A	73,27	1,48	12,13	9,08	4,04
		B	74,61	1,33	13,35	9,01	1,69
		Promedio	73,94	1,40	12,74	9,05	2,87
		DS	0,95	0,10	0,86	0,05	1,66
4	Queso Pategrás	A	76,68	1,20	9,92	8,57	3,64
		B	77,00	1,22	9,66	8,79	3,32
		Promedio	76,84	1,21	9,79	8,68	3,48
		DS	0,23	0,02	0,18	0,16	0,23
5	Queso Cuartirolo	A	75,54	1,65	9,87	9,01	3,94
		B	75,31	1,66	10,28	9,28	3,48
		Promedio	75,42	1,65	10,08	9,14	3,71
		DS	0,16	0,01	0,29	0,19	0,33
6	Queso Cuartirolo	A	75,69	1,43	11,92	7,90	3,06
		B	75,30	1,41	13,60	8,25	1,44
		Promedio	75,49	1,42	12,76	8,07	2,25
		DS	0,28	0,01	1,19	0,25	1,14
7	Queso Gouda	A	72,09	1,96	10,87	11,22	3,85
		B	72,20	1,41	10,64	11,17	4,58
		Promedio	72,14	1,68	10,76	11,20	4,22
		DS	0,08	0,40	0,16	0,04	0,51
8	Queso Reggianito	A	80,44	1,37	3,69	9,79	4,71
		B	80,53	1,23	4,39	9,71	4,15
		Promedio	80,48	1,30	4,04	9,75	4,43
		DS	0,07	0,10	0,49	0,06	0,39
9	Queso Reggianito	A	79,78	1,89	4,81	9,22	4,30
		B	80,09	1,89	4,40	9,36	4,26
		Promedio	79,93	1,89	4,60	9,29	4,28
		DS	0,22	0,00	0,29	0,10	0,03
10	Queso Sardo	A	79,75	1,77	4,81	8,14	5,54
		B	79,64	1,70	4,83	9,80	4,03
		Promedio	79,70	1,73	4,82	8,97	4,79
		DS	0,07	0,05	0,01	1,17	1,07

Tabla 2. Resultados promedios de composición centesimal de ricota agrupados según la humedad del queso de procedencia.

Queso Procedencia	Nº Muestra	Humedad	Cenizas	Materia Grasa	Proteína	Hid. de Carbono
Cuartirolo	2	73,94	1,40	12,74	9,05	2,87
Cuartirolo	5	75,42	1,65	10,08	9,14	3,71
Cuartirolo	6	75,49	1,42	12,76	8,07	2,25
	Promedio	75,46	1,54	11,42	8,61	2,98
	DS	0,05	0,16	1,90	0,75	1,03
	CV%	0,1	10,6	16,6	8,8	34,5
<hr/>						
Gouda	1	78,21	1,19	10,17	8,00	2,43
Gouda	7	72,14	1,68	10,76	11,20	4,22
Pategrás	4	76,84	1,21	9,79	8,68	3,48
	Promedio	75,73	1,36	10,24	9,29	3,38
	DS	3,18	0,28	0,49	1,68	0,90
	CV%	4,2	20,5	4,7	18,1	26,6
<hr/>						
Reggianito	8	80,48	1,30	4,04	9,75	4,43
Reggianito	9	79,93	1,89	4,60	9,29	4,28
Sardo	10	79,70	1,73	4,82	8,97	4,79
	Promedio	80,04	1,64	4,49	9,34	4,50
	DS	0,40	0,31	0,40	0,39	0,26
	CV%	0,5	18,7	9,0	4,2	5,7

Tabla 3. Ricotas con contenido graso mayor a 5%.

Queso Procedencia	Nº Muestra	Humedad	Cenizas	Materia grasa	Proteína	Hid. de Carbono
Cuartirolo	2	73,94	1,40	12,74	9,05	2,87
Cuartirolo	5	75,42	1,65	10,08	9,14	3,71
Cuartirolo	6	75,49	1,42	12,76	8,07	2,25
Gouda	1	78,21	1,19	10,17	8,00	2,43
Gouda	7	72,14	1,68	10,76	11,20	4,22
Pategrás	4	76,84	1,21	9,79	8,68	3,48
	Promedio	75,34	1,43	11,05	9,02	3,16
	DS	2,13	0,21	1,35	1,17	0,77
	CV%	2,8	14,7	12,3	12,9	24,3

Tabla 4. Ricotas con contenido graso menor a 5%.

Q. Procedencia	Nº Muestra	Humedad	Cenizas	Materia grasa	Proteína	HC
Reggianito	8	80,48	1,30	4,04	9,75	4,43
Reggianito	9	79,93	1,89	4,60	9,29	4,28
Sardo	10	79,70	1,73	4,82	8,97	4,79
	Promedio	80,04	1,64	4,49	9,34	4,50
	DS	0,40	0,31	0,40	0,39	0,26
	CV%	0,5	18,7	9,0	4,2	5,7

Tabla 5. Comparación estadística del Contenido de Materia Grasa en Ricota.

Muestra	De Suero de quesos de media humedad	Muestra	De Sueros de quesos de alta humedad
1	10,17	2	12,74
4	9,79	5	10,08
7	10,76	6	12,76

RESUMEN					
Grupos		Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
De suero de quesos de media humedad		3	30,74	10,25	0,25
De sueros de quesos de alta humedad		3	35,58	11,86	2,38

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	3,90	1	3,90	2,97	0,16	7,71
Dentro de los grupos	5,25	4	1,31			
Total	9,16	5				

Tabla 6. Comparación estadística del Contenido de Materia Grasa en Ricota.

Muestra	De Suero de quesos de alta y media humedad	Muestra	De Sueros de quesos de baja humedad
1	10,17	8	4,04
4	9,79	9	4,60
7	10,76	10	4,82
2	12,74		
5	10,08		
6	12,76		

RESUMEN				
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
De Suero de quesos de alta y media humedad	6	66,32	11,0533	1,8312
De Suero de quesos de baja humedad	3	13,46	4,4867	0,1617

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	86,2422	1,000	86,2422	63,6850	0,00009	5,5914
Dentro de los grupos	9,4794	7,000	1,3542			
Total	95,72162	8,0000				

Tabla 7. Comparación estadística del Contenido de Humedad en Ricota.

Muestra	De suero de quesos de media humedad	Muestra	De sueros de quesos de alta humedad
	1	2	73,94
4	76,84	5	75,42
7	72,14	6	75,49

RESUMEN					
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza	
De suero de quesos de media humedad	3	227,19	75,73	10,1353	
De sueros de quesos de alta humedad	3	224,85	74,95	0,76630	

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0,9126	1	0,9126	0,167425	0,703372	7,708647
Dentro de los grupos	21,8032	4	5,4508			
Total	22,7158	5				

Tabla 8. Comparación estadística del Contenido de Proteína en Ricota.

Muestra	De suero de quesos de media humedad	Muestra	De suero de quesos de alta humedad
	1	2	9,05
4	8,68	5	9,14
7	11,20	6	8,07

RESUMEN				
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
De suero de quesos de media humedad	3	27,88	9,2933	2,842133
De sueros de quesos de alta humedad	3	26,26	8,7533	0,352233

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0,437400	1	0,437400	0,273857	0,628408	7,708647
Dentro de los grupos	6,388733	4	1,597183			
Total	6,826133	5				

Tabla 9. Contenido de sodio en ricota.

	Queso Procedencia	Número de Muestra	mg/100g
Suero de quesos de alta y media humedad	Gouda	M1	194
	Cuartirolo	M2	224
		Promedio	209
Suero de quesos de Baja Humedad	Sardo	M3	227

Tabla 10. Porcentaje de ácidos grasos en la grasa de ricota.

Ácido Graso	% de Ácidos grasos						
	M1	M2	M3	M4	M8	M9	M10
Ácido Caprílico (8:0)	2,20	2,20	2,20	2,20	2,40	1,10	1,3
Ácido Cáprico (10:0)	4,60	4,90	4,70	4,80	5,50	2,80	3,4
Ácido Láurico (12:0)	5,10	5,30	5,10	5,20	5,70	3,20	3,9
Ácido Mirístico (14:0)	14,5	15	14,4	14,8	15,3	10,90	12,9
Ácido Palmítico (16:0)	29,2	33,8	32,6	33	33,8	30,10	32,7
Ácido Esteárico (18:0)	5,3	5,1	6,6	5,8	5,6	11,00	9,8
Ácido Miristoleico (14:1)	2,8	2,9	2,5	2,6	2,9	2,00	2,5
Ácido Oleico (18:1)	18,2	18,4	19,5	19,1	17,3	23,70	18,6
Ácido Linoleico (18:2)	2,2	1,9	1,8	1,3	1,4	2,70	1,8
Ácidos grasos TRANS	3,1	3,1	3,3	3,3	3,1	5,00	5,3

Tabla 11. Contenido de ácidos grasos de ricotas de suero de quesos de alta y media humedad.

Ácido Graso	M1 (n=2)	M2 (n=2)	M3 (n=2)	M4 (n=2)	Promedio
Ácido Caprílico (8:0)	0,21	0,26	0,18	0,20	0,21
Ácido Cáprico (10:0)	0,44	0,59	0,38	0,44	0,46
Ácido Láurico (12:0)	0,49	0,64	0,41	0,48	0,50
Ácido Mirístico (14:0)	1,40	1,80	1,17	1,37	1,43
Ácido Palmítico (16:0)	2,81	4,06	2,65	3,06	3,14
Ácido Esteárico (18:0)	0,51	0,61	0,54	0,54	0,55
Total de ácidos grasos saturados	5,87	7,96	5,33	6,09	6,31
Ácido Miristoleico (14:1)	0,27	0,35	0,20	0,24	0,27
Ácido Oleico (18:1)	1,75	2,21	1,58	1,77	1,83
Total de ácidos grasos monoinsaturados	2,02	2,56	1,79	2,01	2,09
Ácido Linoleico (18:2)	0,21	0,20	0,15	0,12	0,17
Total de ácidos grasos poliinsaturados	0,21	0,23	0,15	0,12	0,18
Total de ácidos grasos trans	0,30	0,37	0,27	0,31	0,31

Tabla 12. Contenido de ácidos grasos de ricotas de suero de quesos de baja humedad.

Ácido Graso	M8 (n=2)	M9 (n=2)	M10 (n=2)	Promedio
Ácido Caprílico (8:0)	0,09	0,05	0,06	0,07
Ácido Cáprico (10:0)	0,21	0,12	0,15	0,16
Ácido Láurico (12:0)	0,22	0,14	0,18	0,18
Ácido Mirístico (14:0)	0,58	0,47	0,59	0,55
Ácido Palmítico (16:0)	1,28	1,31	1,48	1,36
Ácido Esteárico (18:0)	0,21	0,48	0,44	0,38
Total de ácidos grasos saturados	2,58	2,57	2,90	2,69
Ácido Miristoleico (14:1)	0,11	2	2,5	1,54
Ácido Oleico (18:1)	0,65	23,7	18,6	14,32
Total de ácidos grasos monoinsaturados	0,76	25,70	21,10	15,85
Ácido Linoleico (18:2)	0,05	2,7	1,8	1,52
Total de ácidos grasos poliinsaturados	0,05	2,70	1,80	1,52
Total de ácidos grasos trans	0,12	0,22	0,24	0,19

Tabla 13. Contenido de colesterol en ricota de suero de quesos de baja humedad.

	Queso Procedencia	Número de Muestra	mg/100g
Suero de quesos de Baja humedad	Reggianito	8	29,97
	Reggianito	9	26,73
	Promedio		28,35

Tabla 14. Contenido de colesterol en ricota de suero de quesos de alta y media humedad.

	Queso Procedencia	Número de Muestra	mg/100g
Suero de quesos de alta y media humedad	Pategrás	4	58,79
	Cuartirolo	5	56,25
	Cuartirolo	6	53,29
	Promedio		56,11

Tabla 15. Tabla nutricional ricota magra

	100 g	CANTIDAD POR PORCIÓN	%VD *
Valor Energético	96 kcal = 403 kJ	29 kcal = 122 kJ	1
Carbohidratos De los cuales:	4,6 g	1,4 g	0
Azúcares totales	4,6 g	1,4 g	-
Azúcares Añadidos	0 g	0 g	-
Proteínas	9,3 g	2,8 g	4
Grasas Totales	4,5 g	1,4 g	3
Grasas Saturadas	2,7 g	0,8 g	4
Grasas Trans	0,2 g	0 g	0
Fibra Alimentaria	0 g	0 g	0
Sodio	227 mg	68 mg	3

Tabla 16. Tabla nutricional ricota semi grasa

	100 g	CANTIDAD POR PORCIÓN	%VD *
Valor Energético	149 kcal = 623 kJ	45 kcal = 188 kJ	2
Carbohidratos De los cuales:	3,2 g	1 g	0
Azúcares totales	3,2 g	1 g	-
Azúcares Añadidos	0 g	0 g	-
Proteínas	9 g	2,7 g	4
Grasas Totales	11 g	3,3 g	6
Grasas Saturadas	6,3 g	1,9 g	9
Grasas Trans	0,2 g	0 g	-
Fibra Alimentaria	0 g	0 g	0
Sodio	209 mg	63 mg	3

4. Conclusiones

Los resultados obtenidos por el análisis estadístico con la prueba anova (Analysis of variance) mostraron la imposibilidad de armar una sola tabla nutricional para todos los lotes en conjunto, por eso se consideró pertinente la confección de dos rótulos.

Se determinó la clasificación de las muestras según los parámetros que establece el Código Alimentario Argentino. Las muestras analizadas se tipificaron como “Ricota magra” contenido menor a 5% en materia grasa y como “Ricota semi grasa” contenido más del 5% de materia grasa. Se confeccionaron dos tablas nutricionales, una para cada tipo de ricota.

5. Agradecimientos

Agradecemos a la Universidad Nacional de Luján y a la educación pública. A la planta piloto, al equipo de nutrición y al equipo de química analítica de esta universidad.

6. Referencias

- AMIOT, J. (1991). Ciencia y tecnología de la leche. Zaragoza. Ed. Acribia. 543pp.
- AOAC, Association of Official analytical Chemists. (2000). “Official Methods of Analysis” 17thed.
- Cappelletti, Carlos A. (1983). Elementos de estadística. Capítulo 14, Buenos Aires, Editorial: Cesarini Hnos.
- Centro de Investigación, Docencia y Extensión en Tecnología de Alimentos de la Universidad Nacional de Luján. Disponible en el URL: <http://www.cideta.unlu.edu.ar/?q=node/4>
- Código Alimentario Argentino. (1968). Capítulo V. Disponible en el URL: https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/anm_at_caa_capitulo_v_rotulacion_actualiz_2021-09.pdf
- Código Alimentario Argentino. (1968). Capítulo VIII. Disponible en el URL: https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/capitulo_viii_lacteosactualiz_2023-04.pdf
- Federación Lechera Internacional. (1987). Leche, crema y leche evaporada. Determinación del contenido total de sólidos (método de referencia) pp.: 3. Bruselas. (Standard Internacional 21 B)
- Finten, Florencia. (2015). Evaluación del proceso de elaboración de Ricotta. Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Veterinarias, Buenos Aires - Argentina. Disponible en el URL: <https://ridaa.unicen.edu.ar:8443/server/api/core/bitsstreams/cf2f8e23-1b93-4652-9bd5-5c85be4fba83/content>
- IRAM 5650-Parte II. (1982). Aceites y grasas animales y vegetales. Método rápido de preparación de ésteres metílicos de ácidos grasos, para su utilización en cromatografía gaseosa.
- M. I. P. Kovacs, W. E. Anderson and R. G. Ackman. (1979). A Simple method for the determination of cholesterol and some plant sterols in fishery-based food products. Volume 44 /1979)- JOURNAL OF FOOD SCIENCE- 1299
- Massola, Maria P. (2011). Análisis comparativo de ricota elaborada comercialmente vs. ricota elaborada artesanalmente. Buenos Aires - Argentina. Disponible en el URL: <https://lipa.agro.unlp.edu.ar/wp-content/uploads/sites/29/2020/03/Trabajo-Final-Mar%C3%ADA-Paula-Massola.pdf>
- Ministerio de Agroindustria, Presidencia de la Nación. (2015). Ficha 38: QUESOS: concentración de nutrientes. Buenos Aires- Argentina. Disponible en el URL: http://www.alimentosargentinos.gob.ar/HomeAlimentos/Nutricion/fichaspdf/Ficha_38_Quesos.pdf
- Ministerio de Agroindustria, Presidencia de la Nación. (2016). Guía de rotulado para alimentos envasados. Buenos Aires - Argentina. Disponible en el URL: https://alimentosargentinos.magyp.gob.ar/contenido/publicaciones/calidad/G_Rotulado.pdf
- Ministerio de Salud, Presidencia de la Nación. (2018). Guías alimentarias para la población argentina. Buenos Aires - Argentina. Disponible en el URL: https://bancos.salud.gob.ar/sites/default/files/2020-08/guias-alimentarias-para-la-poblacion-argentina_manual-de-aplicacion_0.pdf
- Molina Arias, M. (2017). ¿Qué significa realmente el valor de p?. Revista “Pediatría Atención Primaria” Volumen 19, Nº 76, Madrid. Asociación Española de Pediatría de Atención Primaria. Versión impresa ISSN 1139-7632. Disponible en el URL: https://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1139-76322017000500014
- Ortega, Cristina. (2024). Anova: Qué es y cómo hacer un análisis de la varianza. QuestionPro.

https://www.questionpro.com/blog/es/anova/#Como_se_realiza_un_analisis_de_varianza_con_SPSS

Romero, Nalda. (1997). Producción y manejo de datos de composición química de alimentos en nutrición. Capítulo 15: “Métodos de análisis para la determinación de nitrógeno y constituyentes nitrogenados en alimentos”. Santiago de Chile. FAO. Disponible en el URL: <https://www.fao.org/3/ah833s/Ah833s17.htm>

Sánchez, C. (02 de abril de 2019). Normas APA en español. Normas APA (7ma edición). <https://normas-apa.org/introduccion/normas-apa-en-espanol/>

Vinagre, J. (1997). Producción y manejo de datos de composición química de alimentos en nutrición. Capítulo 11: “Diseño de protocolo de muestreo”, Santiago de Chile, FAO. <https://www.fao.org/3/ah833s/Ah833s13.htm>



Remoción de metales pesados en efluentes ganaderos mediante el uso de microalgas inmovilizadas

Evelin Carlier^{1*}, Sofía Bruno¹, Gina F. Vezzosi Zoto^{1,2}, Natalia A. Sacks^{1,2},
Melina A. Urbani^{1,2}, Cecilia Cabrera¹, Luz M. Zapata^{1,2}

1. Facultad de Ciencias de la Alimentación-UNER.
2. Instituto de Ciencia y Tecnología de los Alimentos de Entre Ríos (ICTAER).

*E-mail: evelin.carlier@uner.edu.ar

PALABRAS CLAVES

Biosorción
Efluente ganadero
Alginato de calcio
Contaminación metálica
Tecnologías sostenibles

RESUMEN

La contaminación por metales pesados en efluentes agroindustriales representa una amenaza ambiental significativa. Este estudio evaluó la eficiencia de remoción de metales pesados (Zn, Cd, Cr, Pb, Mn, Cu, Ni y As) utilizando microalgas inmovilizadas en esferas de alginato de calcio. Se emplearon tres especies de microalgas: *Chlorella vulgaris*, *Chlorella sorokiniana* y *Tetradesmus obliquus*, aplicadas sobre un efluente ganadero simulado con niveles críticos de metales. Los tratamientos se evaluaron a 30, 50 y 80 minutos de contacto. Los resultados mostraron eficiencias de remoción superiores al 90 % para plomo y cobre, destacándose *C.vulgaris* y *C.sorokiniana*. El tiempo de contacto fue determinante, con mayores remociones a 80 minutos. La encapsulación en alginato mejoró la estabilidad del sistema y facilitó la manipulación de la biomasa. Las concentraciones finales de Pb y As se ubicaron por debajo de los límites legales de la Provincia de Entre Ríos (Argentina), evidenciando el potencial de esta tecnología para tratamientos de efluentes. Se concluye que la ficorremediación con microalgas inmovilizadas es una estrategia prometedora, eficiente y sostenible para la remediación de efluentes industriales con múltiples metales.

Heavy metal removal from livestock effluents using immobilized microalgae

KEYWORDS

Biosorption
Livestock effluent
Calcium alginate
Metal pollution
Sustainable technologies

ABSTRACT

Heavy metal pollution in agro-industrial effluents is a major environmental threat. This study assessed the removal efficiency of heavy metals (Zn, Cd, Cr, Pb, Mn, Cu, Ni, and As) using microalgae immobilized in calcium alginate. Three species, *Chlorella vulgaris*, *Chlorella sorokiniana*, and *Tetradesmus obliquus*, were applied to a simulated livestock effluent enriched with critical metal concentrations. The treatments were tested at 30, 50, and 80 min. The results showed over 90% removal of lead and copper, with *C. vulgaris* and *C. sorokiniana* being the most effective. Contact time significantly influenced the removal rates, particularly at 80 min. Immobilization improved biosorbent handling and system stability. The final concentrations of Pb and As were below the legal discharge limits in Entre Ríos province (Argentina), confirming the feasibility of this technique for effluent treatment. These findings support the use of immobilized microalgae in phytoremediation as a promising, efficient, and sustainable solution for treating industrial wastewater containing multiple heavy metals.

1. Introducción

La contaminación por metales pesados en efluentes agroindustriales representa una amenaza persistente para los ecosistemas acuáticos y la salud humana, debido a su carácter no biodegradable, su capacidad de bioacumulación y su toxicidad incluso a bajas concentraciones (Acharya, 2024; Davis et al., 2000; Mitra et al., 2022). Entre las principales fuentes de metales pesados en ambientes rurales se encuentran los efluentes generados por frigoríficos e instalaciones ganaderas, los cuales pueden contener Pb, Cd, As, Cu y Zn. Estos provienen del uso de aditivos veterinarios, agentes desinfectantes y residuos orgánicos de faena. Cuando no son tratados adecuadamente, tales descargas deterioran la calidad del agua y del suelo, generando riesgos ambientales y sanitarios por bioacumulación y biomagnificación (Wu et al., 2024).

En la provincia de Entre Ríos (Argentina), los límites regulatorios para la descarga de efluentes en cuerpos de agua superficiales están establecidos por la Ley 6260/91 y su decreto reglamentario (Decreto 4977/09), los cuales estipulan concentraciones máximas permitidas para metales pesados, tales como: 0,2 mg/L para Cr, 0,1 mg/L para Cd, 0,5 mg/L para Pb, 0,005 mg/L para Hg y 0,5 mg/L para As (Gobierno de Entre Ríos, 1991, 2009). No obstante, el Cu no se encuentra claramente especificado en esta normativa provincial. En la provincia de Buenos Aires, el marco regulatorio está definido por el Decreto 674/89, posteriormente modificado por el Decreto 846/2001, el cual permite concentraciones más elevadas para algunos metales, tales como 0,5 mg/L para Cr, 0,01 mg/L para Hg y 2,0 mg/L para Cu, mientras que establece un límite más estricto para el As (0,2 mg/L) (Gobierno de la Provincia de Buenos Aires, 1989, 2001). Ante las limitaciones técnicas y ambientales de tecnologías convencionales como la ósmosis inversa o la precipitación química, la biosorción mediante microalgas surge como una alternativa ecológica y rentable. La ficorremediación, es decir, el uso de microalgas para remover contaminantes, ha demostrado gran eficacia en la remoción de metales pesados gracias a la presencia de grupos funcionales en sus paredes celulares (Agoun y Avci, 2025; Sarma et al., 2024).

Entre las especies más prometedoras se destacan *C. vulgaris*, *C. sorokiniana* y *T. obliquus*, reconocidas por su alta tolerancia y afinidad hacia metales como Pb, Cu y Cd (Zeng et al., 2024; Allzrag et al., 2025). No

obstante, el uso de biomasa libre aún presenta desafíos operativos, especialmente en lo que respecta a la recuperación, estabilidad y reutilización del biosorbente.

En este sentido, la inmovilización de microalgas en matrices biopoliméricas, como el alginato de calcio, ha demostrado ser una estrategia eficaz, ya que permite encapsular las células sin comprometer su viabilidad ni su capacidad biosorbente (de-Bashan y Bashan, 2010). A su vez, este sistema facilita la manipulación, permite su reutilización y mejora la eficiencia del tratamiento en matrices complejas, como los efluentes ganaderos.

Estudios recientes han evidenciado que el uso de microalgas inmovilizadas en esferas de alginato puede lograr porcentajes de remoción superiores al 90 % para ciertos metales pesados, incluso en contextos rurales o industriales sin acceso a tecnologías sofisticadas (Agoun y Avci, 2025; Allzrag et al., 2025). Este enfoque resulta especialmente relevante en regiones como el Litoral argentino, donde la actividad ganadera es intensa y la necesidad de soluciones de tratamiento sostenibles constituye una prioridad.

En este contexto, el presente trabajo evalúa la eficiencia de remoción de metales pesados (Zn, Cd, Cr, Pb, Mn, Cu, Ni y As) mediante el uso de *T. obliquus*, *C. vulgaris* y *C. sorokiniana* inmovilizadas en esferas de alginato de calcio, aplicadas sobre un efluente ganadero. El estudio aborda además el potencial de esta estrategia como una alternativa ecoamigable y costo-eficiente para la ficorremediación, comparando la capacidad de remoción frente a controles sin biomasa y analizando el efecto de la especie microalgal y el tiempo de contacto.

2. Materiales y métodos

Cultivo de microalgas

Los ensayos se realizaron con las microalgas *T. obliquus* (To), *C. vulgaris* (Cv) y *C. sorokiniana* (Cs). *T. obliquus* se cultivó en medio Allen & Arnon (Allen y Arnon, 1955), mientras que *C. vulgaris* y *C. sorokiniana* se incubaron en medio BG11 (Berberoglu et al., 2008). Los cultivos se agitaron en un agitador orbital (BIOMINT) dentro de una cámara de cultivo con temperatura, humedad y fotoperíodos

controlados ($25 \pm 1^\circ\text{C}$; $65 \pm 1\%$ HR; fotoperíodo 16:8 h luz:oscuridad). La incubación continuó hasta alcanzar una densidad celular de 10^6 células/mL, momento en el cual el cultivo se utilizó para la inmovilización en esferas de alginato de calcio.

Inmovilización de las microalgas

Para elaborar las esferas de alginato con microalgas (Ai-E), se preparó una solución de alginato sódico al 4 % p/v en agua destilada estéril. La mezcla se agitó durante 1 h a temperatura ambiente y, posteriormente, se calentó en microondas durante 30 s para eliminar los grumos y lograr una solución homogénea. A continuación, la preparación se refrigeró entre 12 y 36 h para favorecer la eliminación de burbujas (de-Bashan y Bashan, 2010; León, 2004).

La mezcla de alginato y microalgas se preparó en condiciones de esterilidad. En un vaso de precipitados estéril se combinaron 50 mL de cultivo algal (10^6 UFC/mL), 50 mL del medio de cultivo

correspondiente (Allen & Arnon o BG11) y 100 mL de solución de alginato sódico al 4 % p/v; la mezcla se homogeneizó manualmente.

La suspensión resultante se cargó en una jeringa estéril y de forma manual, se dispensaron gotas de forma continua por goteo por gravedad sobre una solución de CaCl_2 al 2 % v/v, manteniendo la reacción a $1\text{--}3^\circ\text{C}$ (de-Bashan et al., 2002; de-Bashan et al., 2008; León, 2004). Para preparar las esferas de control (Ac-E), sin biomasa, se siguió el mismo protocolo, omitiendo únicamente la adición de las microalgas.

Las Ai-E obtenidas mostraron morfología esférica homogénea y aspecto visual similar entre tratamientos, sin diferencias aparentes atribuibles al tipo de microalga empleada. Las microalgas inmovilizadas se observaron en microscopio óptico en campo claro (40x) (Leica DM2500); se observaron que las células distribuidas dentro de la matriz polimérica, no presentaron pérdida evidente de integridad estructural (Figura 1).



Figura 1. Esferas de alginato de calcio conteniendo *C. vulgaris* (izq.) y observación microscópica en campo claro (40x) de *C. vulgaris* inmovilizada en una esfera de alginato de calcio (der.).

Caracterización de efluente industrial

Se evaluaron las propiedades fisicoquímicas del efluente final proveniente de un frigorífico de la industria ganadera en Entre Ríos (Argentina). Las muestras se obtuvieron directamente del punto de descarga final, asegurando que representaran fielmente el agua residual tratada. Se determinaron los siguientes parámetros: pH; conductividad eléctrica (CE); demanda bioquímica de oxígeno (DBO); demanda química de oxígeno (DQO); carbono total (CT); materia orgánica (MO); nitrógeno total

(NT); sólidos disueltos totales (SST); fósforo reactivo disuelto (PRD); fósforo total (PT); y metales pesados (ver sección 2.6. Técnicas analíticas).

Simulación de efluente ganadero contaminado

Con base en los resultados de la caracterización inicial, el efluente se contaminó deliberadamente con los mismos metales pesados analizados (Zn, Cd, Cr, Pb, Mn, Cu, Ni y As). Las concentraciones objetivo se establecieron según los límites máximos de la Ley 6260/91 y su Decreto 4977/09 del Gobierno de Entre

Ríos (1991, 2009). Para ello, se emplearon soluciones estándar certificadas (Plasma Standard CAL – SCP15AES), garantizando precisión en la adición de metales y simulando condiciones controladas adecuadas para evaluar la eficacia de las microalgas inmovilizadas en perlas de alginato de calcio.

Remoción de metales pesados con microalgas inmovilizadas en alginato de calcio

Se evaluó la remoción de metales del efluente ganadero simulado mediante el uso de microalgas inmovilizadas en alginato de calcio. Así se evaluaron los siguientes tratamientos producto de la combinación de las 3 microalgas y 3 tiempos de contacto efluente-esfera con microalga: Cv-30, Cv-50, Cv-80; Cs-30, Cs-50, Cs-80; y To-30, To-50, To-80; donde los números hacen referencia al tiempo de contacto de cada microalga inmovilizada con el efluente contaminado.

Para lograr este objetivo de remoción, se colocaron 50 g de Ai-E en 200 mL del efluente simulado con las concentraciones de metales pesados establecidas. Tanto las muestras como el control se incubaron en un agitador orbital modelo BIOMINT a 150 rpm y temperatura controlada de 28 ± 1 °C, durante el tiempo de contacto correspondiente a cada tratamiento.

A los tiempos 30, 50 y 80 min, de cada uno de los erlenmeyer se tomaron 1 g de esferas y se colocaron en un vaso de precipitado; se adicionaron 9 mL de solución de bicarbonato de sodio al 4% p/v, se dejó reposar la muestra durante 4 h, con la finalidad de extraer los metales pesados inmovilizados (Chen et al., 2023). La biomasa fue separada por centrifugación a 4000 rpm durante 5 min, y los metales presentes en el sobrenadante fueron cuantificados mediante espectroscopía de emisión atómica con plasma acoplado por microondas (MP-AES).

Los tratamientos control (Ac-E) fueron sometidos al mismo procedimiento.

El porcentaje de cada metal pesado removido se calculó de la siguiente manera:

$$\text{Remoción (\%)} = \frac{C_f - C_i}{C_i} \times 100 \quad (1)$$

Donde:

C_i = concentración inicial del metal pesado

C_f = concentración final del metal pesado luego del tratamiento

Técnicas analíticas

El pH se determinó mediante el método potenciométrico (pHmetro AD1030, Adwa®, China) y la conductividad eléctrica (CE) se midió por el método conductimétrico (conductímetro GLP31, Crison®, España). La demanda bioquímica de oxígeno (DBO) se determinó mediante el método de incubación de 5 días (APHA 5210 B), y la demanda química de oxígeno (DQO) mediante el método de reflujo cerrado con dicromato (APHA 5220 D). El fósforo reactivo disuelto (PRD) se cuantificó por espectrofotometría UV-Vis utilizando el método del ácido ascórbico con digestión nítrico-sulfúrica (APHA 4500-P E, 2017), empleando un espectrofotómetro UV-Vis (DR 6000, Hach®, Alemania). El nitrógeno total (NT) (método de digestión con persulfato, Método 10072 para agua y aguas residuales), la demanda química de oxígeno (DQO) (Método Estándar 5220 D). El carbono total (CT) y la materia orgánica (MO) se determinaron mediante el método de combustión (analizador LECO CHN 628). Para cuantificar el perfil mineral, se digirieron 5 mL de cada muestra en un sistema de reacción por microondas (Multiwave PRO, Anton Paar, Austria) utilizando HNO_3 al 70 % (Merck). Tras la digestión, las muestras se diluyeron con agua ultrapura, y se determinaron P total, Zn, Pb, Cd, Ni, Cu, Pb, Mn y As mediante espectrometría de emisión atómica por plasma de microondas (Serie 4210 MP-AES, Agilent Technologies, EE.UU.; APHA-SM 3120 B). Los minerales se midieron utilizando el estándar AccuStandard. Las muestras se analizaron por triplicado.

Análisis estadístico

Los datos experimentales se expresaron como valores medios \pm desviación estándar ($n = 3$). El análisis estadístico se realizó mediante ANOVA de una vía, seguido de una prueba de comparaciones múltiples. Las diferencias se consideraron estadísticamente significativas cuando $p < 0,05$. Los

análisis se llevaron a cabo utilizando el software Statgraphics Centurion.

3. Resultados y Discusión

Caracterización del efluente industrial y simulación de contaminación con metales pesados.

Los resultados de la caracterización del efluente ganadero y su simulación, respecto de los metales pesados, se muestran en la Tabla 1.

La contaminación simulada del efluente ganadero con metales pesados incorporó concentraciones elevadas de los elementos a evaluar, las cuales superan significativamente tanto los valores iniciales del efluente como los límites establecidos por normativas ambientales (Tabla 1) (Gobierno de Entre Ríos, 1991, 2009). Estas concentraciones representan un escenario crítico, en el cual metales como Pb, Cd y As, debido a su alta capacidad de bioacumulación y toxicidad incluso a bajas dosis, constituyen un riesgo ambiental significativo. **3.2. Remoción de metales pesados con microalgas inmovilizadas en alginato de calcio**

La Tabla 2 presenta los rangos de eficiencia de remoción (%), integrando los datos correspondientes a todas las especies microalgales y tratamientos evaluados. Esta consolidación permite evaluar comparativamente la capacidad de biosorción para cada metal pesado bajo las condiciones experimentales implementadas.

Tabla 2. Rango de eficiencia de remoción (%) de metales pesados por microalgas inmovilizadas en alginato de calcio, considerando la totalidad de especies y tratamientos evaluados.

Metal	Rango de remoción (%)
Zn	20,27 - 44,45
Mn	20,46 - 33,65
Ni	11,79 - 45,35
Cd	22,92 - 52,92
Cr	31,38 - 58,16
Pb	48,34 - 97,33
Cu	28,78 - 71,96
As	49,91 - 54,59

Los tratamientos evaluados fueron clasificados en tres categorías según su eficacia de remoción, ordenadas de menor a mayor eficiencia: 1. Cv-30, Cs-30 y To-30; 2. Cv-50, Cs-50, To-50 y To-80; y 3. Cv-80 y Cs-80.

El Pb presentó la mayor proporción de remoción, seguido por Cu, As y Cr (Figuras 2, 3 y 4). Sarma et al. (2024) reportaron que la remoción de Cd, Pb y Cu por microalgas inmovilizadas puede superar el 70 % con tiempos de contacto intermedios (60–120 min) bajo condiciones óptimas de pH y temperatura. Este comportamiento sugiere una cinética favorable en el sistema inmovilizado, en el que el alginato de calcio facilita el acceso de los metales a los sitios activos de las células y reduce la saturación temprana (Allzrag et al., 2025). En nuestro estudio, los tratamientos con 30 min de contacto mostraron valores de remoción modestos (Cd: 22,9–52,9 %; Ni: 11,8–45,3 %), mientras que al extender el tiempo a 80 min los porcentajes aumentaron notablemente (Cd hasta 52,9 %; Ni hasta 45,4 %), concordando con la tendencia de que periodos de contacto más largos favorecen la difusión de iones metálicos hacia los sitios activos y aproximan la eficiencia a los niveles reportados en la literatura más reciente (Figuras 2, 3 y 4).

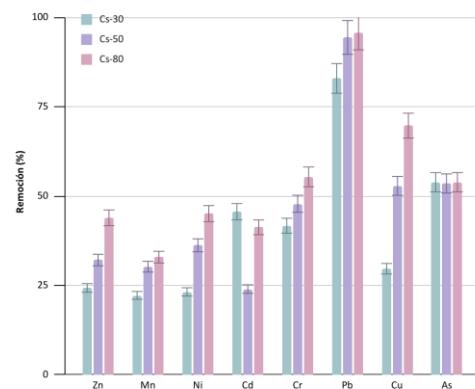


Figura 2. Porcentaje de remoción de *C. sorokiniana* a diferentes tiempos efluente-microalga inmovilizada.

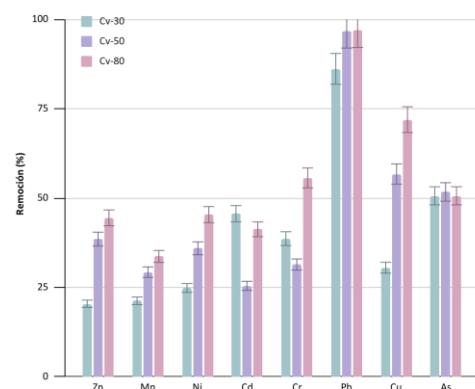


Figura 3. Porcentaje de remoción de *C. vulgaris* a diferentes tiempos efluente-microalga inmovilizada..

Tabla 1. Parámetros fisicoquímicos y metales del efluente industrial y efluente industrial simulado

Parámetro/metal	Efluente industrial	Efluente industrial simulado	Valores límites aceptados*
pH	6,77 ± 0,18	6,85 ± 0,10	5,5 - 10
Conductividad Eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	1648,00 ± 46,14	1763,01 ± 49,36	ne
Demandा Química de Oxígeno (mg/L)	317,00 ± 8,56	315,10 ± 8,78	ne
Demandा Bioquímica de Oxígeno (mg/L)	65,00 ± 1,89	69,00 ± 2,03	<250 mg/L
Sólidos Solubles Totales (mg/L)	910,00 ± 22,75	950,00 ± 23,75	ne
Carbono Total (mg/L)	5900,00 ± 159,30	5500,00 ± 160,65	ne
Materia Orgánica (mg/mL)	10100,00 ± 282,80	10201,10 ± 285,61	ne
Nitrógeno Total (mg/L)	78,00 ± 2,03	77,24 ± 2,13	ne
Fósforo Reactivo Disuelto (mg/L)	3,18 ± 0,09	3,30 ± 0,10	ne
Fósforo Total (mg/L)	18,77 ± 0,51	19,50 ± 0,53	<100 mg/L**
Zn (mg/L)	nd	17,96 ± 0,18	ne
Pb (mg/L)	0,02	2,06 ± 0,09	< 0,5
Cd (mg/L)	nd	1,60 ± 0,05	< 0,1
Ni (mg/L)	nd	1,20 ± 0,07	ne
Cu (mg/L)	nd	3,85 ± 0,07	ne
Cr (mg/L)	nd	1,20 ± 0,05	Cr ⁶⁺ : < 0,2 Cr ³⁺ : < 2
Mn (mg/L)	0,41	1,74 ± 0,01	ne
As (mg/L)	nd	0,93 ± 0,01	< 0,5

nd: no detectado. Límites de cuantificación Pb: <2 µg/L; As: <5 µg/L; Zn, Cd, Ni, Cu y Cr: <10 µg/L. ne: no especificado. *Dec 5837/91 Entre Ríos Ley 6260 (Gobierno de Entre Ríos, 1991, 2009) **CARU (2010).

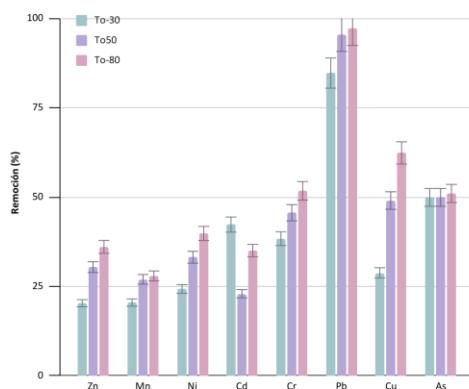


Figura 4. Porcentaje de remoción de *T. obliquus* a diferentes tiempos de contacto efluente-microalga inmovilizada.

Los resultados muestran que las tres especies microalgales evaluadas lograron eliminar eficientemente los metales pesados del efluente ganadero simulado, con rendimientos especialmente altos para Pb y Cu (Tabla 3). Este comportamiento concuerda con estudios recientes que resaltan la afinidad de *Chlorella spp.* por estos contaminantes, atribuida a la elevada densidad de grupos funcionales en sus paredes celulares, los cuales facilitan los procesos de biosorción (Zeng et al., 2024; Joo et al., 2021). La mayor eficiencia se registró en la remoción de Pb, alcanzando un 97,33 % con *T. obliquus*, seguida por *C. vulgaris* (97,01 %) y *C. sorokiniana* (95,72 %) (Tabla 3).

Al compararse con el límite máximo de 0,5 mg/L de Pb permitido para la descarga de efluentes en Entre Ríos, estos resultados adquieren relevancia técnica (Gobierno de Entre Ríos, 1991, 2009). Las concentraciones residuales de Pb tras los tratamientos Cv-80 y Cs-80 fueron de $0,12 \pm 0,02$ mg/L y $0,07 \pm 0,01$ mg/L, respectivamente, demostrando que el sistema inmovilizado reduce las concentraciones de Pb a niveles inferiores al límite reglamentario.

Teniendo en cuenta los porcentajes de remoción a los 80 min, se puede inferir que las tres especies de microalgas analizadas presentaron capacidades de adsorción de metales pesados dependientes tanto del metal como de la especie.

En general, se observa un patrón coincidente con otros estudios recientes donde se ha reportado que metales como Pb y Cu tienden a adsorberse con mayor eficiencia, mientras que metales como Zn, Ni y Cd muestran remociones intermedias, y Mn y As presentan remociones relativamente bajas (Tabla 3).

Fan et al. (2023) obtuvieron la mayor eficiencia de remoción para Pb, seguida por Cu y Cd, al emplear perlas de *T. obliquus* inmovilizado. Saavedra et al. (2018) evaluaron la eliminación de Mn, Zn, Cu, As y Pb con microalgas verdes, alcanzando remociones máximas de 99,4 % para Mn, 91,9 % para Zn, 88 % para Cu, 40,7 % para As y 38,6 % para Pb. Estos hallazgos coinciden parcialmente con nuestros resultados: los metales Pb, Cu y As se destacaron con remociones máximas de 97,3 %, 71,9 % y 53,9 %, respectivamente, superando, en los casos de Cu y As, los valores informados.

En cambio, Zn mostró remociones moderadas (44,5 %). Estos patrones refuerzan que los metales catiónicos interactúan con mayor afinidad con los grupos funcionales de la pared celular, mientras que especies aniónicas como el As presentan menor retención (Wei et al., 2025; Zhao et al., 2023).

Los ensayos multimetálicos evidenciaron competencia iónica por los sitios de adsorción, donde Pb y Cu dominan el proceso, desplazando metales como Ni y Zn, mientras que Cd mantiene alta afinidad aun en presencia de otros iones. Esto concuerda con lo reportado por Kyratzopoulou y Kyzaki (2025), que observaron eficiencias de remoción de Cu por encima del 89 % frente a mezclas complejas, y con lo reportado por Gu y Lan (2023), quienes describieron cómo Pb inhibe significativamente la adsorción de Cd y Zn.

Tabla 3. Porcentaje de remoción de las tres microalgas a los 80 min de contacto con el efluente

Metal	Remoción (%) a los 80 min		
	<i>C. vulgaris</i>	<i>C. sorokiniana</i>	<i>T. obliquus</i>
Zn	44,45 ± 1,56 ^a	43,91 ± 1,54 ^a	36,04 ± 1,26 ^b
Cd	41,25 ± 1,44 ^a	41,25 ± 1,44 ^a	35,00 ± 1,23 ^b
Ni	45,35 ± 1,59 ^a	45,08 ± 1,58 ^a	39,81 ± 1,39 ^b
Pb	97,01 ± 3,40 ^a	95,72 ± 3,35 ^a	97,33 ± 2,99 ^a
Cr	55,65 ± 1,95 ^a	55,37 ± 1,94 ^{ab}	51,74 ± 1,81 ^b
Mn	33,65 ± 1,18 ^a	32,89 ± 1,15 ^a	27,92 ± 0,98 ^b
Cu	71,96 ± 2,52 ^a	69,71 ± 2,44 ^a	62,35 ± 2,18 ^b
As	50,63 ± 1,77 ^a	53,87 ± 1,89 ^a	50,99 ± 1,78 ^a

Nota: Los valores se presentan como media ± desviación estándar (n = 3) Letras diferentes en una misma fila indican diferencias significativas entre tratamientos según ANOVA de una vía seguido de prueba de comparación múltiple ($p < 0,05$).

Las diferencias en la estructura y composición de la pared celular explican la variabilidad en la eficiencia de remoción entre especies. *C. vulgaris* y *C. sorokiniana*, poseen paredes delgadas ricas en polisacáridos portadores de grupos carboxilo y amino, que facilitan la biosorción pasiva y la bioacumulación activa, mejorando la captación de metales esenciales (Ni, Zn) y la secuestración de Cd. En contraste, *T. obliquus*, cuya pared celular es más robusta, muestra menor capacidad de eliminación de Cd pero altas eficiencias para Pb, tal como se ha descrito cuando está inmovilizada (Fan et al., 2023). Las investigaciones con *T. obliquus* evidencian una selectividad máxima para Pb y menores eficiencias para metales con menor afinidad superficial. En cambio, *C. vulgaris* y *C. sorokiniana* muestran altas tasas de remoción para Cu, Ni y Zn, atribuibles a la abundancia de grupos carboxilo y amino accesibles en su pared celular. Kyratzopoulou y Kyzaki (2025) observaron que, en sistemas monometálicos de Ni, Cu y Zn, las tasas de remoción superan el 85 % debido a la rápida formación de complejos con estos grupos funcionales. Esta diferenciación fisiológica explica las divergencias de patrón entre las dos Chlorella y Tetradesmus reflejadas en la Tabla 3.

Estos comportamientos pueden ser explicados ya que la adsorción pasiva (biosorción) ocurre cuando los metales se ligan a sitios químicos de la pared algal: carboxilos, hidroxilos, amino y fosfato, entre

otros. Por ejemplo, análisis mediante espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) han confirmado la participación de grupos -OH, C=O, C-O, C-N y -COO en la captura de cationes (Li et al., 2024; Fan et al., 2023). En la adsorción por intercambio iónico, metales como Pb o Cd desplazan cationes intracelulares previamente unidos a estos grupos. Adicionalmente, metales como Cu forman quelatos estables con grupos amina y con átomos de oxígeno presentes en los grupos carboxilo de los aminoácidos, lo que refuerza su alta afinidad. En contraste, Zhao (2023) reportaron que sólo al combinar *Chlorella* con bacterias oxidantes de As se alcanzó 76% de remoción en 180 min, lo que sugiere que la inmovilización pura de algas tendría menor efecto sobre As en 80 min; el As (III/V) como anión no se retiene eficazmente en ausencia de óxido de arsénico.

La remoción de Cd en cultivos vivos de *C. vulgaris* se ve reforzada por transporte activo, puesto que los iones metálicos se internalizan y se quelan mediante metalotioneínas y fitochelatinas. En sistemas multimetálicos, la eliminación de Cd alcanza valores de 95–96 %, atribuible a su incorporación y retención intracelular. Este mecanismo complementa la biosorción superficial y explica la mayor eficacia de biomasa viva frente a algas muertas o inertes (Kyratzopoulou y Kyzaki, 2025).

En nuestros ensayos, el intervalo de 80 min se seleccionó según trabajos recientes que reportan eficiencias de remoción superiores al 80 % para Pb y Cd con tiempos de contacto de 60–90 min (Faruque et al., 2024; Khan et al., 2016; Kumar et al., 2020). Asimismo, Tenza et al. (2025) alcanzaron remociones completas de Cu y Zn, y 98 % de Pb en 60 min con Chlorella. Aunque algunos autores señalan que el equilibrio de adsorción se alcanza entre 180 y 240 min (Li et al., 2024; Simonić, 2024), la mayoría de la remoción ocurre durante las primeras dos horas. De este modo, los 80 min empleados en este estudio resultan representativos del rango óptimo descrito en la literatura, equilibrando eficacia de eliminación y factibilidad operativa.

Otros parámetros operativos también afectan la eficiencia de remoción. La matriz compleja del efluente ganadero, con elevadas concentraciones de Ca^{2+} , Mg^{2+} y Na^+ , compite directamente con los metales objetivo por los sitios de unión en la pared celular algal, lo que puede causar bloqueo de grupos activos o desorción de iones previamente adsorbidos (Kyrtzopoulou y Kyzaki, 2025; Gu y Lan, 2023). Además, la elevada carga de materia orgánica, derivada de proteínas, lípidos y restos sanguíneos, puede recubrir la biomasa o formar complejos estables con los metales, reduciendo su biodisponibilidad para la adsorción. Estas interferencias físico-químicas características de efluentes reales resaltan la necesidad de incorporar la composición completa de la matriz residual en el diseño de procesos de remoción con microalgas (Wei et al., 2025; Zhao et al., 2023).

Los resultados de este estudio son coherentes con informes recientes, que registran eficacias elevadas en la remoción de Pb y Cu, moderadas para Zn, Ni y Cd, y bajas para Mn y As. Las discrepancias en magnitud respecto a otros trabajos pueden atribuirse al tiempo de contacto empleado y a la competencia iónica en sistemas multimetálicos. Las diferencias entre especies se relacionan con variaciones fisiológicas y en la composición de la pared celular, así como con parámetros operativos como el pH y la matriz de inmovilización. Estos hallazgos demuestran el gran potencial de las microalgas inmovilizadas en la depuración de efluentes complejos y proporcionan una base sólida para ajustar finamente parámetros operativos (tiempo de contacto, carga algal, pH) que maximicen

aún más su rendimiento según la composición del agua residual.

4. Conclusiones

Los resultados de este estudio demuestran que las microalgas inmovilizadas en matriz de alginato de calcio removieron eficazmente una amplia gama de metales pesados de efluentes ganaderos simulados. La eficiencia de remoción varió en función del metal y de la microalga utilizada.

La mayor eficacia se obtuvo para el Pb, con un 97,33 % de remoción alcanzado por *C. vulgaris* tras 80 min de tratamiento. En el caso del As, las concentraciones finales quedaron por debajo del límite de 0,5 mg/L establecido por la Ley 6260/91 para la descarga de efluentes en Entre Ríos (Gobierno de Entre Ríos, 1991, 2009), lo que respalda la viabilidad de esta estrategia para su remediación.

C. vulgaris y *C. sorokiniana* también mostraron remociones destacadas de varios metales en tiempos de contacto cortos, con un pico de eficacia entre 50 y 80 min.

En conclusión, la combinación de bioadsorción y bioacumulación mediante microalgas inmovilizadas constituye una tecnología prometedora para la eliminación de metales pesados en efluentes industriales. Su rendimiento está determinado por el metal objetivo, la microalga seleccionada, el método de inmovilización y las condiciones experimentales (pH, tiempo de contacto), lo que abre la puerta a futuras optimizaciones según los requisitos de cada matriz residual.

5. Agradecimientos

Este trabajo científico se realizó con el subsidio otorgado por la Universidad Nacional de Entre Ríos en el marco del Proyecto PID UNER 8156.

6. Referencias

- Acharya, S. (2024). Heavy Metal Contamination in Food: Sources, Impact, and Remedy. In *Food Safety and Quality in the Global South* (pp. 233-261). Singapore: Springer Nature Singapore.
https://doi.org/10.1007/978-981-97-2428-4_8

- Agoun, N.A., Avci, F.G. (2025) Phycoremediation: a path towards heavy metal bioremediation from wastewater. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 100, no 1, p. 13-23. <https://doi.org/10.1002/jctb.7745>
- Allen, M.B., Arnon, D.I. (1955). Studies on nitrogen-fixing blue-green algae. I. Growth and nitrogen fixation by *Anabaena cylindrica* Lemm. *Plant Physiology*, 30(4), 366–372.
- Allzrag, M.A., Lalung, J., Hamid, N.K.A.(2025). A comparative phycoremediation study of aquaculture wastewater treatment by *Chlorella* sp. immobilized in different hybrid-alginate matrices. *Environmental Technology & Innovation*, 38, 104158. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2025.104158>
- Berberoglu, H., Jay, J., Pilon, L. (2008). Effect of nutrient media on photobiological hydrogen production by *Anabaena variabilis* ATCC 29413. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33(4), 1172–1184. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2007.12.036>
- CARU (2010). Digesto sobre el uso y aprovechamiento del río Uruguay. Título II: Prevención de la contaminación. Capítulo 10: Límites de descarga de efluentes líquidos. Comisión Administradora del Río Uruguay (CARU). Publicado en el Diario Oficial N.º 28.145, Uruguay, 23/08/2010. Disponible en: <https://www.caru.org.uy>
- Chen, Z., Osman, A.I., Rooney, D.W., Oh, W.D., Yap, P.S. (2023). Remediation of Heavy Metals in Polluted Water by Immobilized Algae: Current Applications and Future Perspectives. *Sustainability*, 15(6), 5128. <https://doi.org/10.3390/su15065128>
- Davis Jr., R.A., Welty, A.T., Borrego, J., Morales, J.A., Pendon, J.G., Ryan, J.G., (2000). Rio Tinto estuary (Spain): 5000 years of pollution. *Environmental Geology*, 39 (10), 1107–1116. <https://doi.org/10.1007/s002549900096>
- De-Bashan, L. E., Bashan, Y. (2010). Immobilized microalgae for removing pollutants: Review of practical aspects. *Bioresource Technology*, 101(6), 1611–1627. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.09.043>
- De-Bashan, L., Bashan, Y., Moreno, M., Lebsky, V., Bustillos, J. (2002). Increased pigment and lipid content, lipid variety, and cell and population size of the microalgae *Chlorella* spp. when co-immobilized in alginate beads with the microalgae-growth-promoting bacterium *Azospirillum brasiliense*. *Canadian Journal of Microbiology*, 48:514-521. <https://doi.org/10.1139/w02-051>
- De-Bashan, L., Magallon, P., Antoun, H., Bashan, Y. (2008). Role of glutamate dehydrogenase and glutamine synthetase in *Chlorella vulgaris* during assimilation of ammonium when jointly immobilized with the microalgae-growth-promoting bacterium *Azospirillum brasiliense*. *Journal of Phycology*, 44(5):1188-1196. <https://doi.org/10.1111/j.1529-8817.2008.00572.x>
- Fan, J., Xu, X., Zhang, C., Zhang, Y., & Wu, Z. (2023). Removal of heavy metals from freshwater using immobilized microalgae. *Journal of Biobased Materials and Bioenergy*, 17(5), 566–572. <https://doi.org/10.1166/jbmb.2023.2303>
- Faruque, M.O., Uddin, S., Hossain, M.M., Hossain, S.Z., Razzak, S.A. (2024). A comprehensive review on microalgae-driven heavy metals removal from industrial wastewater using living and nonliving microalgae. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 16, 100492. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2024.100492>
- Gobierno de Entre Ríos. (1991). Ley Provincial N.º 6260/91 Prevención y Control de la Contaminación por parte de las Industrias y Decreto Reglamentario N° 5837 M.B.S.C. y E. Publicada en el Boletín Oficial el 9 de noviembre de 1978. Decreto N° 5837 M.B.S.C y E. – Publicado en el Boletín Oficial el 26 de diciembre de 1991. Código de Aguas. Paraná, Argentina. <https://portal.entrerios.gov.ar/desarrolloeconomico/industria/ps/ley/3644>
- Gobierno de Entre Ríos. (2009). Decreto Reglamentario N.º 4977/09 de la Ley 6260. Paraná, Argentina. <https://portal.entrerios.gov.ar/desarrolloeconomico/ambiente/ps/impactoambiental/5334>
- Gobierno de la Provincia de Buenos Aires. (1989). Decreto 674/89: Normas de vertido para efluentes industriales. La Plata, Argentina. <https://servicios.infoleg.gob.ar/infolegInternet/anexos/15000-19999/16713/texact.htm>
- Gobierno de la Provincia de Buenos Aires. (2001). Decreto 846/2001: Modificación del Decreto 674/89. La Plata, Argentina. <https://servicios.infoleg.gob.ar/infolegInternet/anexos/15000-19999/16713/texact.htm>
- Gu, S.W., Lan, C.Q. (2023). Effects of culture pH on cell surface properties and biosorption of Pb(II), Cd (II), Zn(II) of green alga. *Chemical Engineering Journal*, 468, 143579. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.143579>
- Joo, G., Lee, W., Choi, Y. (2021). Heavy metal adsorption capacity of powdered *Chlorella vulgaris* biosorbent: effect of chemical modification and growth media. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(19), 25086–25097. Available from: <https://doi.org/10.1007/s11356-021-12396-w>
- Khan, T.A., Mukhlif, A.A., Khan, E.A. (2016). Isotherm and kinetics modeling of Pb(II) and Cd(II) adsorptive uptake from aqueous solution by chemically modified green algal biomass. *Modeling Earth Systems and Environment*, 2, 117. <https://doi.org/10.1007/s40808-016-0157-z>
- Kumar, M., Singh, A.K., Sikandar, M. (2020). Biosorption of Hg (II) from aqueous solution using algal biomass: kinetics and isotherm studies. *Helion*. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03321>
- Kyratzopoulou, E., Kyzaki, N. (2025). The efficiency of *Chlorella vulgaris* in heavy metal removal: A comparative study of mono- and multi-component metal systems. *Clean Technologies and Environmental*

- Policy, 27(4), 1503–1518.
<https://doi.org/10.3390/cleantechnol7020035>
- León, C. (2004). Técnicas para el uso biotecnológico de las microalgas. Manual de laboratorio. Puntarenas (Costa Rica): Universidad Nacional, Escuela de Ciencias Biológicas, Laboratorio Biotecnología de Microalgas (LABMA).
- Li, H., Sun, H., Wang, J., Ma, X., Wei, Q. (2024). Process optimization of Cd²⁺ removal with Tetradesmus obliquus-immobilized Algal Beads. Biochemical Engineering Journal. 207. 10.1016/j.bej.2024.109336.
- Mitra, S., Chakraborty, A.J., Tareq, A.M., Emran, T.B., Nainu, F., Khusro, A., Idris, A.M., Khandaker, M.U., Osman, H., Alhumaydhi, F.A., Simal Gandara, J. (2022). Impact of heavy metals on the environment and human health: Novel therapeutic insights to counter the toxicity. Journal of King Saud University Science, 34(3), 101865.
<https://doi.org/10.1016/j.jksus.2022.101865>
- Saavedra, R.; Muñoz, R.; Taboada, M.E.; Vega, M.; Bolado, S. (2018) Comparative uptake study of arsenic, boron, copper, manganese and zinc from water by different green microalgae. Bioresource Technology, 263, 49–57. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.04.101>
- Sarma U., Hoque M.E., Thekkangil, A., Venkatarayappa N., Rajagopal S. (2024). Microalgae in removing heavy metals from wastewater—An advanced green technology for urban wastewater treatment. Journal of Hazardous Materials Advances, 15, 100444.
<https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2024.100444>
- Simonić, M. (2024). Algae Modified Alginate Beads for Improved Cd(II) Removal from Aqueous Solutions. Sustainability, 16(18), 8174.
<https://doi.org/10.3390/su16188174>
- Tenza, N. P., Schmidt, S., Mahlambi, P. N. (2025). Unlocking the potential of Chlorella sp. biomass: an effective adsorbent for heavy metals removal from wastewater. Frontiers in Environmental Chemistry, 6, 1531726.
<https://doi.org/10.3389/fenvc.2025.1531726A>
- Wei, Q., Sun, H., Qi, H., Wang, C., Yang, G., & Ma, X. (2025). Enhancement of Tetradesmus obliquus adsorption for heavy metals through lysine addition: Optimization and competitive study. Water, 17(7), 935.
<https://doi.org/10.3390/w17070935>
- Wu, Y., Xue, R., Li, H. (2024). Pollution characteristics and health risk assessment of heavy metals in livestock and poultry breeding wastewater. Environmental Science and Pollution Research 31, 24745–24767
<https://doi.org/10.1007/s11356-024-32853-6>
- Zeng , Y., Chen, X., Zhu, J., Long, D., Jian, Y., Tan, Q., & Wang, H. (2024). Effects of Cu(II) on the growth of Chlorella vulgaris and its removal efficiency of pollutants in synthetic piggery digestate. Toxics, 12(1), 56. Available from:<https://doi.org/10.3390/toxics12010056>
- Zhao, M., Zheng, G., Kang, X., Zhang, X., Guo, J., Zhang, M., Chen, Y., & Xue, L. (2023). Arsenic pollution remediation mechanism and preliminary application of arsenic-oxidizing bacteria isolated from industrial wastewater. Environmental Pollution, 324, 121384.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121384>

Estudio de dieta de la trucha arco-iris (*Oncorhynchus mykiss*) en el Valle Pehuenche (Malargüe, Mendoza, Argentina)

Vanesa Pellegrini^{1*}, Abril Alonso², Liliana Moreno³, Gabriela Diaz^{1,2,4}

1. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza, Argentina (5500)
2. Facultad de Ciencias Aplicadas a la Industria. Universidad Nacional de Cuyo, San Rafael, Mendoza, Argentina (5600)
3. Facultad de Química Bioquímica y Farmacia. Universidad Nacional de San Luis. San Luis, Argentina (5400)
4. Instituto de Ingeniería y Ciencias Aplicadas a la Industria (ICAI-UNCuyo-CONICET), San Rafael, Mendoza, Argentina (5600)

*E-mail: vanesapellegrini@gmail.com

PALABRAS CLAVES

Exótica invasora
Ecología trófica
Humedales de altura
Oncorhynchus mykiss

RESUMEN

Los salmónidos, como especies exóticas invasoras, afectan a especies endémicas mediante predación, ocupación de hábitat y competencia por recursos tróficos. En el Valle Pehuenche solapan su hábitat con el del anfibio Alsodes pehuénche, una especie microendémica severamente amenazada. Este estudio se enfoca en analizar la dieta del salmónido *Oncorhynchus mykiss* como base para conocer la interacción con el anfibio amenazado. Los métodos incluyeron obtención de contenido estomacal de truchas y determinación de los ítems de la dieta en laboratorio. Los resultados indican que *O. mykiss* se alimenta predominantemente de macroinvertebrados, pertenecientes a 10 órdenes. Los órdenes que presentan mayor abundancia son los dípteros seguido por coleópteros y tricópteros. *O. mykiss* aprovecha una variedad de presas disponibles en su entorno, siendo depredadores importantes dentro de los ecosistemas acuáticos. Este estudio de base provee información necesaria para avanzar en la comprensión de las interacciones ecológicas en humedales de altura y apoyar las medidas de conservación para proteger a las especies nativas amenazadas.

Study of the diet of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) in the Pehuenche Valley (Malargüe, Mendoza, Argentina)

KEYWORDS

Invasive alien species
Trophic ecology
High-altitude wetlands
Oncorhynchus mykiss

ABSTRACT

Salmonids, as invasive alien species, affect endemic species through predation, habitat occupation and competition for trophic resources. In the Pehuenche Valley they overlap their habitat with Alsodes pehuénche, a severely threatened microendemic anuran species. This study focused on analysing the diet of the salmonid *Oncorhynchus mykiss* as a basis for understanding its interaction with *A. pehuénche*. Methods included obtaining stomach contents from trout and determining dietary items in the laboratory. Results indicate that *O. mykiss* feed predominantly on macroinvertebrates, belonging to 10 orders. The most abundant orders are Diptera followed by Coleoptera and Trichoptera.

O. mykiss exploit a variety of prey available in their environment, being important predators within aquatic ecosystems. This baseline study provides necessary information to advance the understanding of ecological interactions in high altitude wetlands and support conservation measures to protect threatened native species.

1. Introducción

Entre los ecosistemas en riesgo en el mundo, los humedales ocupan entre el 5-7% de la superficie. Los humedales son ambientes en los cuales la presencia temporal o permanente de agua superficial o subsuperficial causa flujos biogeoquímicos propios y diferentes a los ambientes terrestres y acuáticos. Entre los rasgos distintivos se destaca la presencia de biota adaptada a estas condiciones. Algunos humedales patagónicos y altoandinos como las vegas y los mallines, presentan señales de deterioro relacionadas al uso de la tierra, la introducción de especies exóticas y el cambio climático (Perotti et al., 2005). Los anfibios fueron los primeros vertebrados adaptados a vivir en ambientes de interfase agua-tierra. Además, son actualmente el grupo de vertebrados más amenazado del mundo (Stuart et al., 2004; Hoffmann et al., 2010). Las poblaciones de anfibios nativos están disminuyendo por diversas amenazas, incluida la invasión por especies exóticas (Kats y Ferrer, 2003; Kacoliris et al., 2022). Entre las especies de peces exóticos introducidos, la trucha arco-iris (*Oncorhynchus mykiss*) ha causado una importante reducción de anfibios nativos (Gillespie, 2001; Velasco et al., 2017; Kacoliris et al., 2022).

Alsodes pehuенche (Cei, 1976) es una especie endémica de los arroyos de deshielo en los Andes centrales de Argentina y Chile (Corbalán et al., 2023, y Diaz et al, 2024). Se encuentra en las categorías más altas de riesgo de extinción: en Peligro Crítico según la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (2019) y En Peligro según la Asociación Herpetológica Argentina (Varia et al., 2012). Entre las amenazas estudiadas se encuentran, la fragmentación de su hábitat debido a la pavimentación de la Ruta Nacional N° 145 (Corbalán et al., 2010), infección por el hongo quitridio (*Batrachochytrium dendrobatidis*) mortal para algunas especies de anfibios (Ghirardi et al., 2014) y la presencia de salmónidos exóticos (Corbalán et al., 2023). Esta última amenaza se refiere al rol de los salmónidos *Oncorhynchus mykiss* y *Salmo trutta* como predadores de *A. pehuенche* (Zarco et al., 2020 y Corbalán et al., 2023) y la influencia negativa en la ocupación de sitios de *A. pehuенche* donde hay truchas (Pellegrini, unpubl data).

Conocer la dieta de las truchas permite iniciar el estudio de la interacción entre *O. mykiss* y *A. pehuенche*, para poder evaluar la depredación de trucha sobre ranas y determinar si existe solapamiento trófico entre ambas especies.

El objetivo general es determinar la composición de la dieta de la trucha arco-iris (*Oncorhynchus mykiss*). Objetivos específicos:

1. Cuantificar el volumen de contenido estomacal de *O. mykiss*.
2. Identificar los ítems presentes en el contenido estomacal de *O. mykiss*.
3. Cuantificar la presencia de presas identificadas en el contenido estomacal de *O. mykiss*.

2. Materiales y métodos

El área de estudio incluyó los arroyos de altura en el Valle Pehuenche, en la Cuenca del Río Chico, Malargüe, Mendoza. Las truchas se capturaron en el campo durante las temporadas 2022-2023 y 2023-2024, mediante trampas de embudo y copete. Los individuos se pesaron con pesola manual, se midieron con regla milimétrica (Figura 1a) y se extrajeron los estómagos (Figura 1b), que se conservaron en etanol al 70% en recipientes individuales, debidamente identificados para su posterior procesamiento y análisis en laboratorio.



Figura 1. Individuo de *O. mykiss* capturado.

En el laboratorio, cada estómago, con contenido, fue pesado en balanza analítica (Figura 2a); luego se procedió a vaciar el mismo y se midió el volumen del contenido estomacal en mililitros.

Las muestras de contenido estomacal se observaron con lupa estereoscópica, clasificando los ítems hasta la menor categoría taxonómica posible. En la figura 2b se observan presas a través de lupa binocular (20x). Se siguieron las claves de clasificación para macroinvertebrados bentónicos de Domínguez y Fernández (2009).



Figura 2. A) Pesaje de estómago de *O. mykiss* completo.
 B) Ítems presa en contenido estomacal de *O. mykiss* observados en lupa estereoscópica (20x).

Para contabilizar individuos, se tuvo en cuenta presas enteras y cabezas por contenido estomacal. Se calculó la frecuencia ocurrencia, la abundancia y porcentaje de presas halladas.

3. Resultados y Discusión

Los individuos de *O. mykiss* capturados pesaron $39,58 \pm 29,29$ gramos ($n=24$) y midieron $148,54 \pm 34,93$ milímetros ($n=24$). El peso de los estómagos con contenido fue $2,92 \pm 1,74$ ($n=34$) gramos y para los estómagos sin contenido fue de $2 \pm 1,3$ ($n=29$) gramos, obteniendo como media de peso del contenido estomacal $0,91 \pm 0,55$ gramos. El volumen del contenido estomacal fue $1,74 \pm 1,59$ ($n=16$) mililitros. La mayoría de los ítems presa observados fueron determinados hasta el nivel de orden y ocasionalmente hasta familia (Figura 3).

Los resultados de abundancia, frecuencia relativa de abundancia, frecuencia de ocurrencia y frecuencia relativa de ocurrencia se muestran en la Tabla 1. Los datos indican que la dieta de *O. mykiss* está dominada por dípteros, que constituyen el 80,51% de los ítems presa y tienen un 46,22% de frecuencia de ocurrencia. Entre los dípteros particularmente los miembros de la familia Chironomidae son los más abundantes (73,42%) y los que mayor frecuencia de ocurrencia presentan (16,6%) (Figura 4). Los ítems que siguen en importancia, respecto a la abundancia y frecuencia de ocurrencia son coleópteros y tricópteros.

En dos estómagos se hallaron restos óseos que se identificaron correspondientes a anfibios. No se pudo determinar la especie a la que corresponden los mismos (Figura 5).

En este trabajo se cuantificó el contenido estomacal de *O. mykiss* y se identificaron las presas del mismo en el Valle Pehuenche. Esta información acerca de la dieta de los salmonidos es relevante para comprender la coexistencia con el anfibio amenazado *A. pehueneche*. Los ítems del orden diptera, familia chironomidae fueron los que tuvieron mayor frecuencia de ocurrencia en las muestras analizadas (FO Diptera = 1,88, Tabla 1), seguido por el orden coleóptera (FO Coleoptera = 0,76, Tabla 1). Los resultados obtenidos en este trabajo, están en concordancia con otros estudios que muestran que los invertebrados acuáticos son los más abundantes en la dieta de los peces en los sistemas lóticos (Glova y Sagar, 1991, Buria, 2007). Por otro lado, los resultados obtenidos son similares a estudios realizados en arroyos de bajo y mediano orden en la región Patagónica Chilena, (Palma et al., 2002) y en los Andes ecuatorianos (Mouillet et al., 2018), donde se identifican macroinvertebrados bentónicos en la dieta de poblaciones de trucha arco-iris. En este último trabajo las principales presas encontradas fueron Chironomidae y Hyalella, que se atribuyen a la relativa poca profundidad de los sistemas acuáticos (Schindler et al., 2001). La presencia de otros diez órdenes más de insectos identificados en este estudio sugiere que *O. mykiss* en el Valle Pehuenche, posee una alta diversidad de presas en la dieta, definiéndose como generalista y oportunista. Esto podría ser una estrategia para maximizar la ingesta de nutrientes y energía en un ambiente de recursos variables, como son los ambientes de montaña.

En relación a los antecedentes de predación de salmonidos exóticos sobre anfibios, y en particular sobre *Alsodes pehueneche*, se han reportado presencia de un miembro posterior de *A. pehueneche* en el contenido estomacal de un individuo de *O. mykiss* (Zarco et al, 2020) y predación directa de este anfibio por *Salmo trutta* en un arroyo del cajón del Guanaco.

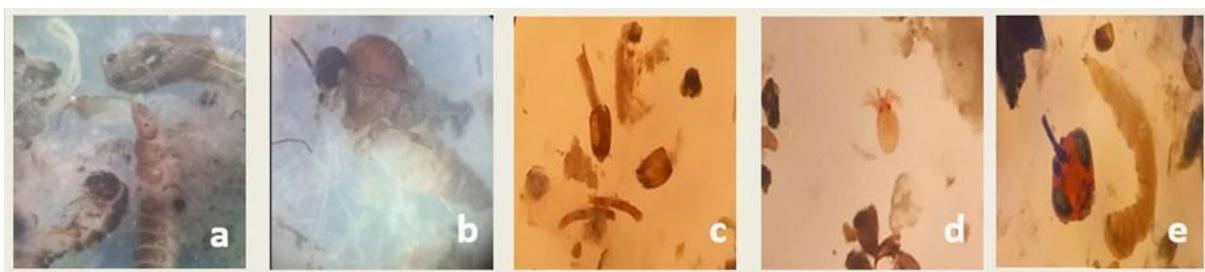


Figura 3. Principales ítems alimentarios hallados en el contenido estomacal de *O. mykiss*. a- Coleóptera, b-Ephemeroptera, c-Díptera- Chironomidae, d-Acarii, e-Hymenoptera.

Tabla 1. Composición de dieta *O. mykiss*. Se muestran las categorías taxonómicas de presas, N=número total de presas; %N=porcentaje de la categoría en el total de las presas; FO=frecuencia de ocurrencia, %FO=porcentaje de la categoría en el total de frecuencia de ocurrencia.

Orden	Familia	N	%N	FO	%FO
Diptera	Chironomidae	2403	73,42	0,79	16,60
	Ceratopogonidae	70	2,14	0,44	9,24
	Simuliidae	69	2,11	0,50	10,50
	Empididae	41	1,25	0,15	3,15
Coleoptera	Elmidae	49	1,50	0,20	4,20
	Otros	102	3,12	0,56	11,76
Trichoptera	Hydrobiosidae	206	6,29	0,47	9,87
Acari	Hidracaridae	87	2,66	0,32	6,72
Ephemeroptera	Leptophlebiidae	18	0,55	0,18	3,78
Plecoptera		59	1,80	0,44	9,24
Heteroptera		36	1,10	0,20	4,20
Amphipoda	Hyalellidae	68	2,08	0,06	1,26
Hymenoptera	Formicidae	7	0,21	0,15	3,15
Cladocera	Daphniidae	15	0,46	0,03	0,63
Total de ítem presa		3230	98,69	4,49	94,3

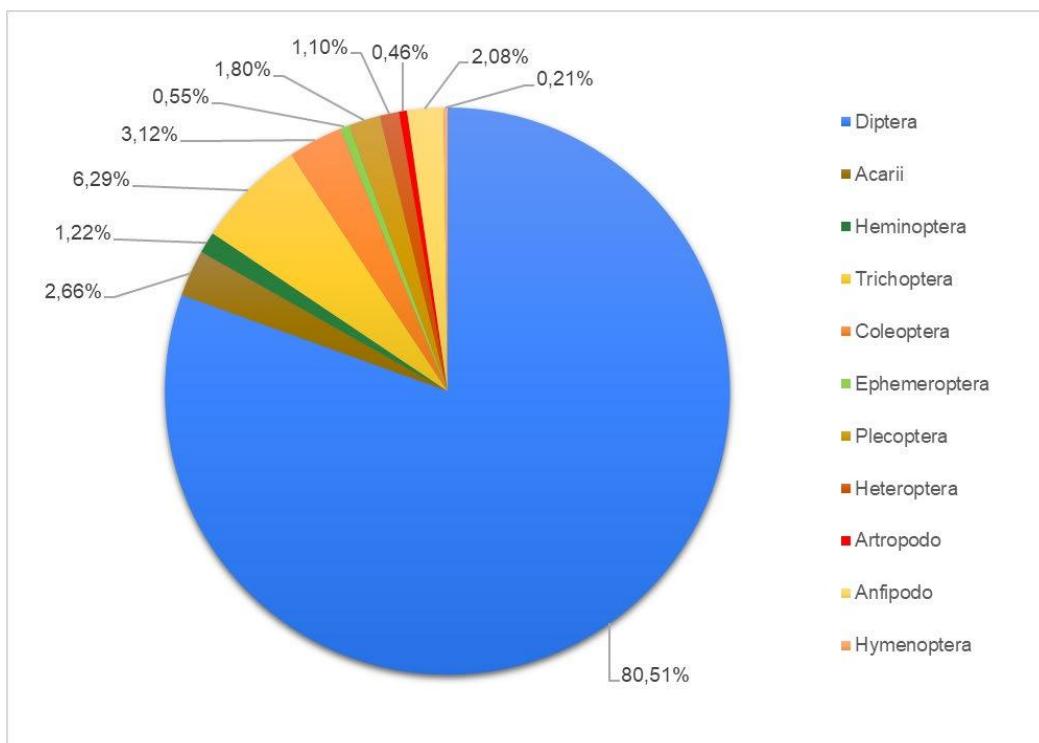


Figura 4. Porcentaje del volumen de cada taxón identificado, respecto al volumen estomacal total de *O. mykiss* (n=34).



Figura 5. Restos óseos de anfibio hallados en 2 estómagos de trucha arco-íris. Observación en lupa binocular (20x)

(Corbalán et al, 2023). En este trabajo, bajo lupa estereoscópica, se han identificado tejidos blandos y huesos que no ha sido posible asignar inequívocamente a *A. pehuенche* (Figura 5). Por otro lado, los hallazgos de individuos de *A. pehuенche* muertos dentro de los arroyos con patas traseras desgarradas (5 en las 2 temporadas de trabajo), sugieren que la predación de ranas ocurre eventualmente, aunque en estos casos no se ha

podido determinar si los predadores son salmonídos o aves. Por lo tanto, considerando el estatus crítico de conservación de *A. pehuенche*, resulta prioritario continuar monitoreando la interacción entre el anfibio y los salmonídos exóticos a fin de evaluar riesgos potenciales y orientar estrategias de manejo adecuadas para la preservación de este endemismo altoandino.

4. Conclusiones

La composición trófica de *O. mykiss* en el Valle Pehuenche se encuentra dominada por dípteros, con una marcada representación de larvas de Chironomidae, lo que sugiere una alta disponibilidad de este grupo en el ambiente bentónico. La inclusión de taxones pertenecientes a distintos órdenes de macroinvertebrados en su dieta indica una estrategia trófica generalista y oportunista, compatible con la maximización de la captación energética en contextos de oferta alimentaria variable. Si bien antecedentes previos han documentado eventos de predación sobre *Alsodes pehuенche* por parte de salmonídos, los datos obtenidos en el presente estudio no evidencian la

presencia de esta especie en el contenido estomacal de *O. mykiss*. No obstante, considerando el estatus crítico de conservación de *A. pehuенche*, resulta prioritario continuar monitoreando la interacción entre el anfibio y esta especie predadora exótica a fin de evaluar riesgos potenciales y orientar estrategias de manejo adecuadas para la preservación de este endemismo altoandino.

5. Agradecimientos

Este trabajo fue realizado en el marco del Proyecto “Conservación de *Alsodes pehuенche*: anfibio en peligro crítico de los humedales de los Andes Centrales” SIIP 06/M003-T4 (Resol 3978/2022) UNCUYO. La colecta de muestras se realizó en el marco de EX-2021-08523832-GDEMZA-DRNR# SAYOT.

Agradecemos a Dra. Carina Llano por los aportes a las primeras versiones del manuscrito y a la Mgtr. Angélica Gil por la colaboración en las determinaciones taxonómicas de macroinvertebrados.

6. Referencias

- Buria, L. (2007). Estudio de la dieta de la trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*) en diferentes períodos temporales en sistemas lóticos. Tesis de maestría, Universidad Nacional del Comahue, Argentina.
- Cei, J. M. (1976). Remarks on some Neotropical amphibians of the genus *Alsodes* from Southern Argentina. Atti della Società Italiana di Scienze Naturali e del Museo Civico di Storia Naturale di Milano, 117, 159–164.
- Corbalán, V., Álvarez, L., & Masiel, D. (2010). Fragmentación de hábitat por pavimentación de ruta y su impacto en *Alsodes pehuенche* (Anura, Cycloramphidae) en los Andes centrales. Revista de Ecología Austral, 20(2), 35–45.
- Corbalán, V., Debandi, G., Literas, S., Álvarez, L., Rivera, J. A., Dopazo, J., Zarco, A., Cornejo, P., Blotto, B., Faivovich, J., & Masiel, D. (2023). Newly discovered sites and potential threats for the critically endangered frog, *Alsodes pehuенche*, in southern South America. Herpetological Conservation and Biology, 18(1), 48–56.
- Díaz, G., Pellegrini-Piccini, V., Moreno, L., Palma, P., Bentancourt, V., & Corbalán, V. (2024). Monitoreo poblacional y estado de conservación de la ranita del Pehuenche (*Alsodes pehuенche*) en el valle Pehuenche, Mendoza, Argentina. Revista Mexicana de Biodiversidad, 95, e955367.
- Domínguez, E., & Fernández, H. (2009). Guía para la identificación de macroinvertebrados bentónicos sudamericanos. Ediciones Universidad Nacional del Comahue.
- Ghirardi, R., Levy, M. G., López, J. A., Corbalán, V., Steciow, M. M., & Perotti, M. G. (2014). Endangered amphibians infected with the chytrid fungus *Batrachochytrium dendrobatidis* in austral temperate wetlands from Argentina. Herpetological Journal, 24, 129–133.
- Gillespie, G. R. (2001). The role of introduced trout in the decline of the spotted tree frog (*Litoria spenceri*) in south-eastern Australia. Biological Conservation, 100, 187–198.
- Glova, G. J., & Sagar, P. M. (1991). Diet of small fish in a large New Zealand river. New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research, 25(2), 241–256.
- Hoffmann, M., Hilton-Taylor, C., Angulo, A., Böhm, M., Brooks, T. M., Butchart, S. H., Carpenter, K. E., Chanson, J., Collen, B., & Cox, N. A. (2010). The impact of conservation on the status of the world's vertebrates. Science, 330, 1503–1509.
- IUCN SSC Amphibian Specialist Group. (2019). *Alsodes pehuенche*. The IUCN Red List of Threatened Species. <https://doi.org/10.2305/IUCN.UK.2019-1.RLTS.T56409A89180368.en>
- Kacoliris, F. P., Ceballos, A., & Velasco, M. A. (2022). Impact of the invasive rainbow trout on amphibians in a Mediterranean environment. Biodiversity and Conservation, 31(4), 3031–3042.
- Kats, L. B., & Ferrer, R. P. (2003). Alien predators and amphibian declines: review of two decades of science and the transition to conservation. Diversity and Distributions, 9, 99–110.
- Mouillet, C., Barta, B., Espinosa, R., Andino, P., Seestern Christoffersen, K., & Jacobsen, D. (2018). Ecological effects of introduced rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) in pristine Ecuadorian high Andean lakes. Fundamental and Applied Limnology, 191(4), 323–337.
- Palma, A., Figueroa, R., & Díaz, M. E. (2002). Diet of introduced rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) and its effect on native fish in low and mid-order streams

in the Chilean Patagonia. *Zoological Studies*, 41(2), 175–182.

Perotti, M. G., Diéguez, M. C., & Jara, F. G. (2005). Estado del conocimiento de humedales del norte patagónico (Argentina): aspectos relevantes e importancia para la conservación de la biodiversidad regional. *Revista Chilena de Historia Natural*, 78, 341–353.

Schindler, D. E., Scheuerell, M. D., & Lamberti, G. A. (2001). Biological effects of nutrient enrichment in lakes: A review. *Environmental Reviews*, 9(2), 1–31.

Stuart, S. N., Chanson, J. S., Cox, N. A., Young, B. E., Rodríguez, A. S. L., Fischman, D. L., & Waller, W. (2004). Status and trends on amphibian declines and extinctions worldwide. *Science*, 306, 1783–1786.

Vaira, M., Akmentins, M., Attademo, M., Baldo, D., Barrasso, D., Barrionuevo, S., et al. (2012). Categorización del estado de conservación de los anfibios de la República Argentina. *Cuadernos de Herpetología*, 26(Suplem. 1), 131–159.

Velasco, M. A., Berkunsky, I., Simoy, M. V., Quiroga, S., Bucciarelli, G., Kats, L., & Kacoliris, F. P. (2017). The rainbow trout is affecting the occupancy of native amphibians in Patagonia. *Hydrobiologia*, 795, 255–267.

Zarco, A., Corbalán, V., & Debandi, G. (2020). Predation by invasive rainbow trout on the critically endangered Pehuenche Spiny-chest Frog. *Journal of Fish Biology*, 98(3), 878–880.

Empleo de alginato para el encapsulado de alimento balanceado de uso acuícola

Fernando D. Lo Menzo^{1*}, Pablo J. Saubot², Fernando Ariel Bertoni³,
Nadia Woitovich Valetti³, Luciana Pellegrini Malpiedi³

1. Centro Científico, Tecnológico y Educativo “Acuario del Río Paraná”, Rosario, CP 2000, Argentina.
2. Estanques y Peces, Villa Mugueta, CP 2175, Argentina.
3. Facultad de Ciencias Bioquímicas y Farmacéuticas, UNR, Rosario, CP 2000, Argentina.

*E-mail: fernandolomenzo@gmail.com

PALABRAS CLAVES

Encapsulado
Acuicultura
Alginato
Alevines

RESUMEN

Este trabajo propone el uso de encapsulados poliméricos a base de alginato como una alternativa económica y sostenible para alimentar larvas de peces. Para ello, se empleó un alimento balanceado desarrollado localmente, con perfil proteico y lipídico similar al de Artemia sp. Se evaluaron distintas formulaciones de microencapsulado utilizando diferentes concentraciones de alginato de sodio de grado alimenticio (0,4 a 1,0 % P/V) y de alimento balanceado (5 a 25 % P/V). Se aplicaron dos técnicas de encapsulado: goteo con jeringa y pulverización con compresor. Las microesferas obtenidas fueron analizadas mediante microscopía óptica y espectrofotometría. La técnica de jeringa con 25 % de alimento y 0,6 % de alginato generó esferas de ~2,5 mm con una eficiencia de encapsulado del 80 %. La pulverización, con 10 % de alimento y 0,6 % de alginato, permitió obtener micropartículas de ~0,4 mm, tamaño comparable al de Artemia. Ambas formulaciones mostraron buena estabilidad en medio líquido durante 15 días a temperatura ambiente. Estos resultados demuestran el potencial del alginato como matriz encapsulante para reemplazar parcialmente el uso de Artemia, reduciendo costos y fortaleciendo la producción acuícola nacional.

Use of alginate for the encapsulation of balanced feed for aquaculture applications

KEYWORDS

Biosorption
Livestock effluent
Calcium alginate
Metal pollution
Sustainable technologies

ABSTRACT

This study explores the use of alginate-based polymeric microcapsules as a cost-effective and sustainable alternative for larval fish feeding. For this, a locally developed balanced feed, with protein and lipid profiles similar to Artemia, was used as the core material. Various encapsulation formulations were evaluated using food-grade sodium alginate (0.4 to 1.0 % w/v) and feed concentrations (5 to 25 % w/v). Two encapsulation methods were tested: syringe dripping and compressor-assisted spraying. The resulting microcapsules were analyzed by optical microscopy and UV-Vis spectrophotometry. Syringe encapsulation with 25 % feed and 0.6 % alginate yielded ~2.5 mm spheres with an encapsulation efficiency of ~80 %. Spraying, using 10 % feed and 0.6 % alginate, produced microparticles with a diameter of ~0.4 mm, comparable to Artemia size. Both formulations exhibited good stability in liquid medium over 15 days at room temperature. These results highlight the potential of alginate as an encapsulating matrix for aquaculture feed, offering a viable alternative to reduce costs and decrease dependence on imported Artemia, thus supporting more resilient local aquaculture systems.

1. Introducción

Durante las primeras etapas de vida, una vez consumido el saco vitelino, los peces comienzan a ingerir distintas especies de microorganismos (fitoplancton y zooplancton) (Li et al., 2025). En acuicultura, por cuestiones económicas, de tiempo, espacio y capacitación del personal, esta fase temprana de alimentación se realiza con la técnica llamada "a cielo abierto" donde se colectan microorganismos con diferentes tamices en estanques con fondo de tierra previamente fertilizados (Vallone et al., 2021). Con esta técnica, podemos recolectar tanto el alimento necesario (e incluso alimento de tamaño superior a la capacidad de ingesta) como también patógenos varios: parásitos, bacterias y hongos que afectan a la salud y sobrevida de los peces. Una de las recomendaciones de la FAO para mejorar la bioseguridad en la acuicultura es minimizar la transferencia de patógenos en los ambientes acuáticos durante el cultivo de las larvas (Halwart, 2022). Actualmente, aquellos establecimientos que pretenden mejorar la bioseguridad y minimizar los tiempos larvarios, cultivan en un medio salino (cultivo accesorio) un crustáceo branquiópodo llamado Artemia sp (AR) (Bertini et al., 2024). Este crustáceo posee un alto valor dependiendo de su calidad nutricional y del porcentaje de eclosión (se comercializa en quistes). Por ejemplo, un producto basado en AR de alta calidad nutricional, con eclosión del 90%, posee un valor de \$21.000 el kg y es de origen extranjero. Este alimento, además de su alto costo, no posee una disponibilidad estable en el tiempo. A su vez, cuando se adquiere AR de menor calidad para disminuir costos, los medios de cultivo deben ser enriquecidos con otros cultivos accesorios que ponen en juego la bioseguridad de la producción. Todo ello se traduce en que la alimentación represente uno de los principales costos en el cultivo de peces. A esto debemos sumarle que la sobrevida en la etapa de larvicultura es cercana al 45% - 50% (Santos & Soares, 2024). Esto se debe, en gran parte, a la imposibilidad de alimentar a los peces durante las primeras semanas de vida con un alimento adecuado al tamaño de su boca (orden de las micras) y con una composición nutricional estable con un medio definido (Sado et al., 2013). Con el objetivo de disminuir las pérdidas asociadas a una incorrecta alimentación, o disminuir los costos relacionados a la importación de productos, este trabajo propone ensayar la posibilidad de realizar una encapsulación del

alimento en micromatrices poliméricas de alginato (ALG) gelificado en presencia de calcio. El ALG es un polímero natural, biocompatible y no tóxico obtenido a partir de algas pardas marinas y algunas cepas de bacterias (Mazza et al., 2023). Es uno de los polímeros preferidos para el encapsulado de diferentes tipos de sustancias debido a las características previamente mencionadas y, además, debido a sus condiciones suaves de gelificación, su accesibilidad y la estabilidad mecánica que presentan los geles formados (Muslykhah et al., 2024). Es por ello que se encuentran en la bibliografía diversas aplicaciones del alginato como agente encapsulante de medicamentos, alimentos, bacterias, entre otros (Bakhshi et al., 2017). En cuanto a cuidado animal, el alginato se ha empleado con éxito para encapsulado de vacunas orales (Bowersock et al., 1999), en piensos para mascotas y, particularmente de interés para este trabajo, en alimentos para peces (Rychen et al., 2017).

Con lo antes expuesto se propuso, en una primera instancia, analizar la factibilidad de obtener microesferas de alginato mediante el empleo de un sistema de pulverización. Para ello, la solución de alginato fue pulverizado con un sistema de spray (de manera de conseguir gotas del menor tamaño posible) sobre una solución de cloruro de calcio. De esta manera, las gotas de alginato gelificaron al entrar en contacto con el calcio, formando geles esféricos. Como alternativa al empleo del sistema de pulverización, se evaluó la obtención de los geles por goteo con ayuda de una jeringa sobre la solución gelificante y la posterior ruptura de las esferas obtenidas por medios mecánicos. Los geles obtenidos fueron caracterizados en cuanto a su tamaño y estabilidad, parámetro de interés para su futura aplicación, mediante el empleo de técnicas de microscopía óptica, light scattering, estabilidad frente a pH y co-solutos, entre otras.

Una vez determinadas las condiciones para la obtención de los micro-geles, se procedió al estudio de la encapsulación del alimento dentro de los mismos. Para ello, se estudiaron diferentes alternativas de encapsulación: en la primera, se suspendió el alimento en la solución polimérica, para luego proceder al proceso de gelificación. En una segunda alternativa, el alimento fue suspendido en la solución de cloruro de calcio y el polímero fue agregado sobre esta solución para luego proceder a la gelificación. En ambos casos, se evaluó nuevamente el tamaño de las partículas obtenidas,

su estabilidad en el tiempo y la eficiencia de encapsulación.

2. Materiales y métodos

Formulación del alimento balanceado

Se utilizó un alimento balanceado sólido, desarrollado por la empresa “Estanques y Peces”, cuya composición proteica y lipídica contiene un perfil similar al de la AR (Lo Menzo et al., 2024).

Desarrollo de una técnica para la determinación de la concentración de alimento

Se obtuvieron los espectros UV-Vis de diferentes diluciones de la muestra de alimento balanceado, a los fines de identificar zonas espectrales que puedan sufrir cambios proporcionales a la concentración de alimento presente y que permita estimar la eficiencia del proceso de encapsulado.

Preparación de las soluciones de trabajo

Se trabajó con ALG de sodio de grado alimenticio, debido a su bajo costo y alta biodegradabilidad. Para la preparación de las soluciones de ALG se pesó una cantidad adecuada de la droga sólida y se disolvió en agua destilada con ayuda de agitación mecánica

hasta lograr la completa disolución. Se prepararon soluciones madre 2% P/V. Para el trabajo experimental se utilizaron diluciones de dichas preparaciones. Para la caracterización del alimento, se prepararon soluciones 3% P/V del mismo en agua destilada.

Encapsulado del alimento

Los ensayos de encapsulado se realizaron empleando diferentes concentraciones de ALG (1,0; 0,8; 0,6 y 0,4 % P/V) y alimento balanceado (25, 10 y 5 % P/V).

Se emplearon dos técnicas de encapsulación diferentes: goteo en jeringa y pulverización mediante un compresor. El encapsulado macroscópico se realizó mediante el goteo, con una jeringa, de la mezcla polímero/alimento previamente preparada y homogeneizada, sobre una solución de CaCl_2 0,2 M.

Para la formación de partículas microscópicas se empleó un sistema de aspersión. Se empleó un compresor de aire adaptado a un pulverizador. En la figura 1 se presenta un esquema simplificado del proceso.

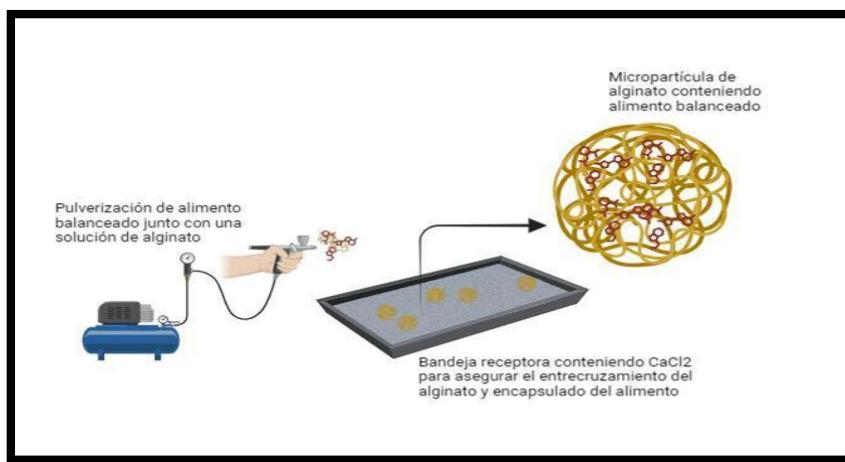


Figura 1. Esquema simplificado del proceso de obtención de micropartículas de ALG con alimento balanceado encapsulado.

Eficiencia de encapsulación

Las esferas obtenidas fueron re-disueltas mediante el empleo de una solución de EDTA 1 M, para liberar el alimento encapsulado. Se determinó la cantidad de alimento encapsulado mediante medidas de absorbancia a 275 y 400 nm. La eficiencia de encapsulación fue calculada por balance de masas, teniendo en cuenta la cantidad inicial colocada y la cantidad recuperada luego de la redisolución.

$$\% \text{ alimento encapsulado} =$$

$$\frac{\text{masa alimento recuperado en esferas redisueltas}}{\text{masa inicial alimento}} \times 100 \quad (1)$$

Caracterización de las esferas obtenidas

El diámetro de las esferas obtenidas fue determinado visualmente o con ayuda de microscopía óptica, dependiendo del tamaño obtenido.

3. Resultados y Discusión

Caracterización del alimento balanceado

En primer lugar, se estudió la solubilidad en agua del alimento balanceado en estudio. Se encontró que el alimento fue correctamente soluble hasta llegar a una concentración de 50% P/V. Las soluciones obtenidas presentaron tonalidad marrón y una elevada viscosidad. Debido a esto, se requirió de una correcta agitación de al menos 4 h para lograr la correcta dispersión del alimento. Posteriormente, se obtuvieron los espectros UV-Vis de diferentes diluciones de la muestra de alimento balanceado, a los fines de identificar zonas espectrales que puedan sufrir cambios proporcionales a la concentración de alimento presente y que nos permitan poder estimar la eficiencia del proceso de encapsulado. A partir de los espectros obtenidos, se seleccionaron 2 zonas para realizar el seguimiento de la concentración de alimento en los pasos posteriores: 400 nm y 275 nm.

En ambas longitudes de onda se observa un comportamiento lineal de crecimiento de la absorbancia de la muestra en función de la cantidad de alimento presente (Figura 2) lo que permitió los cálculos posteriores mediante la obtención de las curvas de calibración correspondientes.

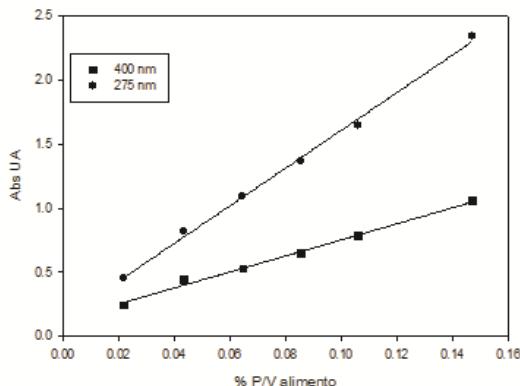


Figura 2. Análisis espectroscópico del alimento balanceado.

Macrocápsulas de alginato con alimento balanceado

Mediante la técnica de goteo, se estudió la factibilidad de realizar en encapsulado del alimento en macroesferas de ALG. Para ello, en primer lugar, se determinaron las concentraciones a emplear de ALG. Se determinó que el ALG empleado gelifica correctamente sobre CaCl_2 (2% P/V) en el rango de concentraciones que van desde 2% P/V hasta 0,4% P/V. En concentraciones menores no se produce la correcta gelificación dando lugar a geles demasiado frágiles. Las esferas obtenidas presentaron un diámetro promedio de 1.5-2 mm.

Otro control realizado fue el estudio de la capacidad del alimento en solución de gelificar per se en presencia de CaCl_2 . Se determinó que la concentración máxima de alimento posible a emplear es de 25 % P/V debido a que es la máxima concentración a la cual se observa facilidad al gotear la mezcla a través de una jeringa. No se observó capacidad gelificante en este ensayo, confirmando la necesidad de agregar ALG para la formación de las cápsulas.

Teniendo en cuenta lo anterior, se estudiaron diferentes combinaciones de ALG y alimento para la encapsulación. Se optó por emplear concentraciones elevadas de alimento a los fines de optimizar la cantidad encapsulada. El ALG se varió en el rango de gelificación previamente determinado. En la tabla 1 se presentan las combinaciones estudiadas y las observaciones realizadas.

A partir de las diferentes condiciones ensayadas se decidió seleccionar las siguientes condiciones: ALG 0,6% P/V con 25 % P/V de alimento. Asimismo, se estableció que por cada 10 ml de solución goteada se deben adicionar 30 ml de solución de CaCl_2 .

Tal como se muestra en la Figura 3, los geles obtenidos mediante este procedimiento presentaron forma esférica con un diámetro promedio de 2,5 mm y una elevada estabilidad tanto física como química. Por otro lado, utilizando la metodología descripta en la sección 2.5, se estimó una eficiencia de encapsulación del 80%.

Microcápsulas de alginato con alimento balanceado

Una vez determinadas las mejores condiciones para la encapsulación mediante goteo, se procedió a estudiar la capacidad del sistema para generar microesferas de ALG con alimento balanceado encapsulado. Teniendo en cuenta los resultados previos obtenidos, se inició el estudio empleando ALG 0,6%P/V con 25 % P/V de alimento. Sin embargo, se encontró que no era posible realizar la aspersión de esta solución ya que continuamente se tapaba la salida del pulverizador, complicando el proceso en general, además de generar pérdida de material.

Tabla 1. Condiciones ensayadas para el encapsulado por goteo del alimento balanceado en geles de alginato.

Concentración final en solución de goteo	Observaciones
0,2 %P/V ALG-25% P/V alimento	La solución gotea a demasiada velocidad, a pesar de la agitación continua no logra observarse la formación de esferas y el alimento queda en solución.
0,4 %P/V ALG-25% P/V alimento	El aumento en la cantidad de polímero mejoró la formación de esferas. Sin embargo, el tiempo de gelificación es muy largo lo que lleva a la pérdida de alimento en la solución de CaCl_2 empleada como agente gelificante.
0,6 %P/V ALG-25% P/V alimento	Se observa una buena gelificación en un lapso corto de tiempo. El alimento queda atrapado dentro de las esferas, que adquieren forma de lenteja. Se observa una marcada expansión del volumen de las esferas contenido alimento comparadas con las esferas que solo poseen ALG.
0,8 %P/V ALG-25% P/V alimento	La solución presenta elevada viscosidad lo que imposibilita el goteo de la misma.

Debido a esto, y teniendo en cuenta los resultados previos en los cuales el ALG no gelificaba de buena manera a bajas concentraciones, se decidió mantener fija la concentración de ALG en 0,6 % P/V, disminuyendo la concentración de alimento en la solución de goteo. Por otra parte, se observó la necesidad de emplear mayor volumen de CaCl_2 para la gelificación, debido a que la pulverización abarcaba una mayor área. Por ello, se estableció un volumen de 250 ml de solución gelificante cada 20 ml de solución de polímero/alimento. Las condiciones ensayadas se detallan en la Tabla 2.

Microcápsulas de alginato con alimento balanceado

Una vez determinadas las mejores condiciones para la encapsulación mediante goteo, se procedió a estudiar la capacidad del sistema para generar microesferas de ALG con alimento balanceado encapsulado. Teniendo en cuenta los resultados previos obtenidos, se inició el estudio empleando ALG 0,6% P/V con 25 % P/V de alimento.



Figura 3. Esferas de alginato de calcio con alimento balanceado encapsulado. Condiciones de trabajo: alginato 0,6% P/V con 25% P/V de alimento.

Sin embargo, se encontró que no era posible realizar la aspersión de esta solución ya que continuamente se tapaba la salida del pulverizador, complicando el proceso en general, además de generar pérdida de material.

Debido a esto, y teniendo en cuenta los resultados previos en los cuales el ALG no gelificaba de buena manera a bajas concentraciones, se decidió mantener fija la concentración de ALG en 0,6 % P/V, disminuyendo la concentración de alimento en la solución de goteo. Por otra parte, se observó la necesidad de emplear mayor volumen de CaCl_2 para la gelificación, debido a que la pulverización abarcaba una mayor área. Por ello, se estableció un volumen de 250 ml de solución gelificante cada 20 mL de solución de polímero/alimento. Las condiciones ensayadas se detallan en la Tabla 2

Tabla 2. Producción de microesferas de alginato con alimento balanceado encapsulado. En todos los casos se empleó una presión de salida de 1 bar.

Condición de pulverización	Observaciones
ALG 0,6% P/V- 5 % P/V de alimento	Se logró una correcta pulverización, la solución fluyó correctamente y no se generaron variaciones en la presión del compresor debido a obstrucciones del pulverizador. Cuando las gotas tomaron contacto con la solución gelificante, rápidamente se observó la formación de partículas pequeñas de tonalidad clara. La observación al microscopio de las partículas obtenidas permitió determinar dispersión en el tamaño de las mismas, aunque todas presentan tamaño menor a 0,5 mm.
ALG 0,6% P/V- 10 % P/V de alimento	Se observó una buena capacidad de pulverización, sin inconvenientes asociados a variaciones de presión u obstrucciones. Al entrar en contacto la solución pulverizada con el CaCl_2 se observa una rápida formación de partículas. Las partículas obtenidas presentan baja dispersión en cuanto a tamaño mostrando diámetros cercanos a los 0,4 mm.
ALG 0,6% P/V- 15 % P/V de alimento ALG 0,6% P/V- 20 % P/V de alimento	La generación del spray al pulverizar fue perfecta. Se observó una rápida formación de partículas gelificadas al tomar contacto con el calcio de tamaño pequeño y en buena cantidad. Las partículas obtenidas presentan forma esférica y diámetros menores a 0,5 mm.

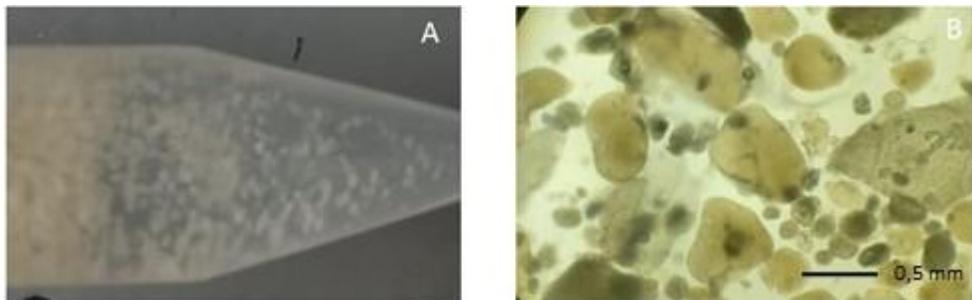


Figura 4. Microesferas obtenidas mediante pulverización. Condiciones: 0,6% P/V de ALG con 20 %P/V de alimento balanceado, 1 bar. A) Microesferas en solución, B) observación al microscopio óptico, aumento: 20X.

Los resultados obtenidos permitieron corroborar que todas las condiciones ensayadas permiten la obtención de micropartículas de ALG con alimento balanceado encapsulado.

De las condiciones ensayadas, los mejores resultados se obtuvieron con la combinación de 0,6%P/V de ALG con 20%P/V de alimento debido a que en dicha condición se logra encapsular una buena cantidad de alimento. Dichas partículas se muestran en la Figura 4. En estos sistemas se dificultó el cálculo de la eficiencia de encapsulación, debido a las pérdidas de material en los diferentes pasos del proceso.

4. Conclusiones

Durante este estudio se evaluó la formación de micro y macro esferas de ALG conteniendo alimento balanceado para alevines. Para tal fin se evaluaron dos metodologías: goteo y pulverización, encontrándose diferencias muy notorias en cuanto a la eficiencia de gelificación y encapsulado entre ellas. Para el caso de la encapsulación mediante goteo, el empleo de 0,6 %P/V de ALG y 25 %P/V de alimento brindó la mejor eficiencia, logrando una incorporación del 80 % del alimento empleado, en macroesferas con un diámetro promedio de 2,5 mm. En el caso de la pulverización, se seleccionó una solución de ALG 0,6 %P/V con 20%P/V de alimento, la cual fue pulverizada sobre CaCl₂ 2% P/V, en una superficie lo más abierta posible para evitar la pérdida de material. Las micropartículas obtenidas mediante esta metodología presentaron diámetros menores a los 0,5 mm, lo que las hace adecuadas para la alimentación de alevines en sus primeras

estapas de crecimiento. Estos resultados representan un punto de partida para la formulación de microcápsulas de alimento balanceado como alternativa de bajo costo y en reemplazo de importaciones para la alimentación de alevines.

5. Agradecimientos

Este trabajo fue financiado con el Programa TECNOPYME 2021, perteneciente al Ministerio de Producción, Ciencia y Tecnología de la provincia de Santa Fe.

6. Referencias

- Bakhshi, M., y otros cinco autores, (2017). Nano-encapsulation of chicken immunoglobulin (IgY) in sodium alginate nanoparticles: In vitro characterization, *Biologicals*, 49, 69–75.
- Bertini, A., y otros doce autores, (2024). A blend of microalgae and cyanobacteria produced from industrial waste outputs for the enrichments of *Artemia salina*: Effects on growth performance , antioxidant status and anomalies rate of European seabass (*Dicentrarchus labrax*) larvae, *Aquaculture Reports*, 36, 102070.
- Bowersock, T. L., y otros ocho autores, (1999). Oral vaccination of animals with antigens encapsulated in alginate microspheres, *Vaccine*, 17(13–14), 1804–1811.
- Halwart, M. (2022). Aquaculture in SOFIA 2022, *Aquaculture Newsletter*, 66, 7–8.
- Li, B., y otros tres autores, (2025). Application status and development prospect of fermented ingredients in aquaculture, *Aquaculture Reports*, 42, 102842.
- Lo Menzo, F. D., y otros tres autores, (2024). V Workshop Virtual de Polímeros Biodegradables y Biocompuestos. Argentina, 103890.

- Mazza, K. E. L., y otros seis autores, (2023). Microencapsulation of marjoram essential oil as a food additive using sodium alginate and whey protein isolate, International Journal of Biological Macromolecules, 233, 123478.
- Muslykhah, U., y otros cuatro autores, (2024). Encapsulation of protein-based bioactive from black soldier fly for ruminant feeding. Journal of Agriculture and Food Research, 18, 101325.
- Rychen, G., y otros diecinueve autores, (2017). Safety and efficacy of sodium and potassium alginate for pets, other non food-producing animals and fish. EFSA Journal, 15(7), 4945.
- Sado, R. Y., Bicudo, Á. J., Cyrino, J. E. (2013). Growth and hematology of juvenile pacu *Piaractus mesopotamicus* (Holmberg 1887) fed with increasing levels of vitamin E (DL- α -tocopheryl acetate), Anais da Academia Brasileira de Ciências, 85(1), 385-393.
- Santos, F. A. C., Soares, G. (2024). Efectos de la temperatura y la concentración de presas vivas en la larvicultura de *Colossoma macropomum*, Revista MVZ Córdoba, 29(1), 1-10.
- Vallone, A. E. R., Benedetti, F.(2021). CULTIVO DEL PACÚ Aspectos generales y Estado de la tecnología. Centro de Acuicultura Diamante (CEADI) Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. Diamante, Argentina.

Desarrollo de galletitas sin gluten con salvado de arroz y evaluación nutricional para la incorporación de sellos de advertencia

Milagros Mutuberria¹, Malena Orsini¹, Belen Gimenez ^{1,2}, Cecilia Gaillard², Natalia Graiver^{1*}

1. Centro Científico, Tecnológico y Educativo “Acuario del Río Paraná”, Rosario, CP 2000, Argentina.
2. Centro de Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de los Alimentos (CCT- CONICET La Plata, UNLP, CICPBA), 47 y 116 S/N, 1900 La Plata, Argentina.
3. Grupo de Investigaciones Agrobiotecnológicas (GIAB), Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional La Plata Av.60 esq. 124 s/n, Berisso, Buenos Aires, Argentina.

*E-mail: nataliaggraiver@gmail.com

PALABRAS CLAVES

Alimentación saludable
Sellos de advertencia
nutricional
Salvado de arroz
Sin gluten

RESUMEN

Se desarrollaron galletitas sin gluten con salvado de arroz, en versiones dulces y saladas, veganas y ovo-vegetarianas, con el objetivo de mejorar la calidad nutricional y analizar la presencia de sellos de advertencia. Se elaboraron cuatro formulaciones, estabilizando previamente el salvado y combinándolo con harina de arroz, huevo o semillas de lino. Se realizó una evaluación sensorial con 73 panelistas, quienes valoraron color, sabor, textura y aceptabilidad general, así como percepción de saludabilidad y preferencia de compra. Las galletitas dulces con huevo fueron las más aceptadas. La composición química teórica fue estimada mediante tablas oficiales y se analizaron los sellos con la calculadora de ANMAT. Las formulaciones presentaron sellos por exceso de calorías y grasas totales, salvo una. Los productos aportaron fibra dietaria en cantidades superiores a 2,5 g por porción, bajo contenido de sodio y mínima cantidad de azúcares añadidos. Los resultados muestran que el análisis basado solo en sellos puede inducir a errores, y que el salvado de arroz es un ingrediente viable para alimentos sin gluten, con potencial para contribuir a la economía circular y al desarrollo de alimentos funcionales a partir de subproductos de la industria arrocera.

Development of gluten-free cookies with rice bran and nutritional assessment for the incorporation of warning labels

KEYWORDS

Healthy eating
Nutritional warning labels
Rice bran
Gluten-free

ABSTRACT

Gluten-free crackers with rice bran were developed in sweet and savory versions, both vegan and ovo-vegetarian, aiming to improve nutritional quality and analyze the presence of warning labels. Four formulations were prepared, with stabilized rice bran combined with rice flour, eggs, or ground flaxseed. Sensory evaluation was conducted with 73 panelists, who assessed color, flavor, texture, overall acceptability, perceived healthiness, and purchase preference. Sweet crackers with egg were the most accepted. Theoretical chemical composition was estimated using official food composition tables, and warning labels were analyzed with ANMAT's calculator. The formulations presented warning labels for excess calories and total fat, except one. The products provided dietary fiber above 2.5 g per serving, low sodium content, and minimal added sugars. Results highlight that assessing products solely by warning labels may lead to misinterpretations, and that rice bran is a viable ingredient for gluten-free foods, with potential to contribute to the circular economy and the development of functional foods from rice industry by-products.

1. Introducción

La economía circular es un modelo de producción y consumo que promueve la optimización del uso de recursos mediante prácticas como compartir, reutilizar, reparar, renovar y reciclar materiales y productos existentes tantas veces como sea posible, generando así un mayor valor agregado. Este enfoque busca extender el ciclo de vida de los productos, en contraste con el modelo económico lineal tradicional, que se basa en el paradigma de "usar y desechar", y depende de grandes volúmenes de materiales y energía de bajo costo y fácil acceso (Bourguignon, 2016). El arroz es el cuarto cultivo más producido en el mundo con un 7% del comercio mundial de granos. Los principales productores son China, seguida por India, Indonesia, Bangladesh, Vietnam, Myanmar y Tailandia. Argentina produce 1,6 millones de toneladas anuales. En los últimos 10 años la producción se incrementó un 121% (Ministerio de Hacienda de Argentina, 2017). El salvado de arroz (SA) representa uno de los subproductos más significativos en la producción de arroz y se obtiene a través del pulido posterior al descascarillado, dando lugar al arroz blanco; el destino del SA es principalmente como alimento para animales (Vargas y Aguirre, 2021). Este salvado, equivale a aproximadamente entre un 8% y un 11% del peso total del grano entero. El mismo contiene una variedad de nutrientes presentando una gran oportunidad para tomar este residuo y transformarlo en alimento, debido a sus buenas propiedades nutricionales. La composición química porcentual del SA es: proteínas ($14,18 \pm 0,08$), fibra ($29,24 \pm 1,10$), lípidos ($17,50 \pm 0,02$) y cenizas ($9,19 \pm 0,35$). Además, posee buena proporción de ácidos grasos monoinsaturados y poliinsaturados esenciales: 18:1 (n9): 34,20 (g/100 g de lípidos); 18:2 (n6): 36,44 (g/100 g de lípidos) 18:3 (n3): 1,82 (g/100 g de lípidos) (Mutuberria et al., 2023), que lo convierten en un ingrediente potencial para formular alimentos funcionales y/o saludables utilizando residuos agroindustriales, contribuyendo a la economía circular (Mutuberria et al., 2024).

La fibra dietaria es un conjunto de polímeros y oligómeros de carbohidratos, incluyendo la lignina, que no son digeridos en el intestino delgado y llegan al intestino grueso, donde son fermentados parcial o completamente por la microbiota intestinal. Sus funciones han sido ampliamente estudiadas y están asociadas con la prevención de diversas enfermedades, como el sobrepeso, la obesidad, la

diabetes tipo 2, ciertos tipos de cáncer y patologías cardiovasculares. Las recomendaciones de ingesta de fibra dietaria varían según la edad, el género y el nivel de energía consumida (Perez Vilcanqui y Perales Vilchez, 2017). En Argentina, el Código Alimentario Argentino (CAA) en su capítulo V recomienda el consumo de 25g por día de fibra (para una dieta de 2000 kcal).

La encuesta nacional de gastos de los hogares (INDEC, 1999) que se realiza en nuestro país mostró que el consumo de fibra descendió más de 10% entre la primera (1996-1997) y la última encuesta del 2017-2018 (INDEC, 2019). Esto se relaciona con la disminución del consumo de hortalizas, frutas y legumbres y el aumento de la ingesta de cereales refinados. Los resultados de la última encuesta concluyeron que los argentinos sólo consumían la mitad de la fibra recomendada (INDEC, 2019).

La Ley N° 27.642 de Promoción de la Alimentación Saludable, desarrollada en base a los lineamientos de la Organización Panamericana de la Salud (OPS), busca fomentar hábitos alimentarios saludables en la población. Uno de sus ejes principales es el Etiquetado Frontal de advertencias, que informa de manera sencilla y clara sobre el contenido de nutrientes críticos en los productos, facilitando decisiones de compra y consumo más conscientes. Además, regula la publicidad dirigida a niños, niñas y adolescentes, así como la promoción y el patrocinio de productos que contengan uno o más sellos (Boletín Oficial de la República Argentina, 2021). Sin embargo, esta ley trata a todos los alimentos dentro del mismo rango, sin considerar aspectos como el grado de procesamiento o la presencia de nutrientes esenciales como la fibra dietaria, lo que podría llevar a interpretaciones inadecuadas sobre la calidad nutricional de ciertos productos.

El objetivo de nuestro trabajo fue desarrollar galletitas libres de gluten a base de salvado de arroz, realizar su evaluación sensorial, estimar su composición química teórica y analizar la presencia de sellos de advertencia nutricional.

2. Materiales y métodos

Formulación de galletitas

Se realizaron cuatro formulaciones de galletitas (dos formulaciones dulces F1 y F2 y dos saladas F3 y F4).

Los ingredientes fueron: SA, harina de arroz, aceite de girasol alto oleico, azúcar (para formulaciones dulces), sal (para formulaciones saladas), huevo (para la formulación ovo-vegetariana) y semillas de lino molidas (para preparaciones veganas). Las cantidades de cada formulación se encuentran en la Tabla 1.

El salvado de arroz se estabilizó previo a su uso en horno con circulación de aire a 80 °C durante 2 horas. Este proceso se realizó debido a que durante el proceso de molienda se activa un sistema enzimático que produce la hidrólisis de los triglicéridos del

salvado de arroz, generando ácidos grasos libres que afectan de forma negativa la palatabilidad y la calidad del salvado de arroz (Escamilla et al., 2006).

Se mezclaron los ingredientes secos por un lado y luego se agregaron los líquidos. Se batieron en batidora industrial y se laminaron. Se cortaron con cortante rectangular de 5 cm x 2.5 cm con espesor de 0,3 mm. Por último, fueron a horno industrial por 28 minutos. Para cada formulación, se obtenían galletitas con un peso promedio de 4 g tras el horneado.

Tabla 1. Ingredientes y cantidad porcentual utilizada en cada formulación (g / 100 g de producto crudo)

Ingredientes (g)	F 1	F 2	F 3	F 4
Salvado de arroz	25,0	24,5	26,6	13,0
Harina de arroz	35,0	34,5	26,6	45,0
Aceite de girasol alto oleico	2,5	2,5	4,4	3,3
Azúcar	6,5	6,5	-	-
Sal	-	-	0,2	0,2
Huevo	19,0	-	-	-
Semillas de lino molidas	-	5,0	7,1	5,2
Agua	12,0	27,0	35,0	33,3

Evaluación sensorial

La evaluación sensorial se llevó a cabo mediante una escala hedónica de 9 puntos para medir con datos discretos la aceptabilidad en atributos como color, sabor, textura y aceptabilidad general. También se midió la percepción de qué tan saludables consideran los productos utilizando una escala no estructurada y se evaluó la preferencia de compra y de consumo. Además, se consultó si conocían la ley de promoción de alimentación saludable. El panel estuvo conformado por 73 panelistas semi entrenados en un rango etario de 18 a 66 años. La misma se llevó a cabo en el Centro de Investigación y Desarrollo en Ciencia y Tecnología de los Alimentos (CIDCA) en julio del 2024.

Composición química teórica de las galletitas

Se determinó la cantidad teórica del valor energético (Kcal y KJ), hidratos de carbono (g), azúcares totales (g), azúcares añadidos (g), proteínas (g), grasas totales (g), grasas saturadas (g), grasas trans (g), fibra alimentaria (g) y sodio (mg) de las cuatro formulaciones. Los mismos fueron calculados a partir de la Tabla de composición química de alimentos para Argentina, Compilación para ENNys (SARA 2) (Ministerio de Salud de la Nación, 2022).

Presencia de sellos de advertencia nutricionales

Los valores obtenidos de la composición química teórica fueron cargados a la calculadora de sellos provista por la ANMAT. Esta herramienta realiza los cálculos oficiales del perfil de nutrientes y presenta

los sellos de advertencia nutricionales para los productos alimenticios según establece la Ley N° 27642 y el Decreto 151/2022 (Ministerio de Salud de Argentina, 2021).

3. Resultados y Discusión

Panel sensorial

Las galletitas dulces que contenían huevo (F1) fueron las más aceptadas en términos generales destacándose por su color, sabor y textura. A continuación, se ubicaron las galletitas dulces con semillas de lino (F2), seguidas por las saladas con mayor cantidad de salvado de arroz (F3), y finalmente, las saladas con mayor proporción de harina de arroz respecto al SA (F4). Estos resultados se ilustran en la Figura 1. En cuanto a la percepción de su valor saludable, el promedio obtenido fue de 7,5, lo que indica una valoración alta (Mutuberria et al. 2025).

En cuanto al conocimiento sobre la Ley N° 27642 de sellos de advertencia nutricionales, el 100% de los encuestados respondió afirmativamente, y el 95% indicó que sabía interpretarlos correctamente. Sin embargo, al preguntar si sus decisiones de compra se

veían influenciadas por estos sellos, el 78% respondió negativamente.

Respecto a la preferencia de compra, un 83% manifestó que compraría alguna de las formulaciones que acababan de probar. Al indagar sobre cuál preferirían, casi el 37% optó por las galletitas dulces con huevo (F1), aproximadamente el 27% eligió las F2 (dulces con lino), y alrededor del 17% prefirió la saladas con mayor contenido de salvado de arroz (F3) (valores que coinciden con las preferencias observadas en la evaluación sensorial). Los resultados de preferencia de compra se presentan en la Figura 2.

Composición química teórica de las galletitas

Los resultados de la composición química teórica de cada formulación se presentan en la Tabla 2. Estos valores han sido ajustados a una porción de 30 g, de acuerdo con lo establecido en el capítulo V del Código Alimentario Argentino (CAA).

Análisis de sellos de advertencia nutricionales

Los resultados obtenidos mostraron la presencia de sellos de advertencia nutricional (exceso de calorías y de grasas totales) en las primeras tres formulaciones, como se observa en la Tabla 3.

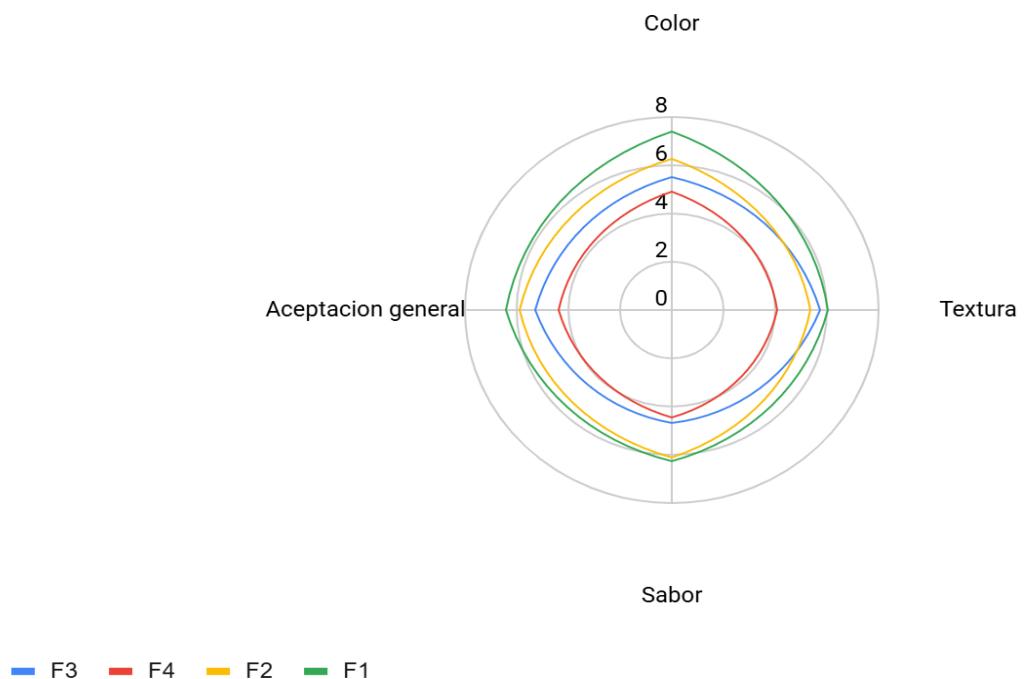


Figura 1. Aceptabilidad general, color, sabor y textura de las cuatro formulaciones de galletitas.

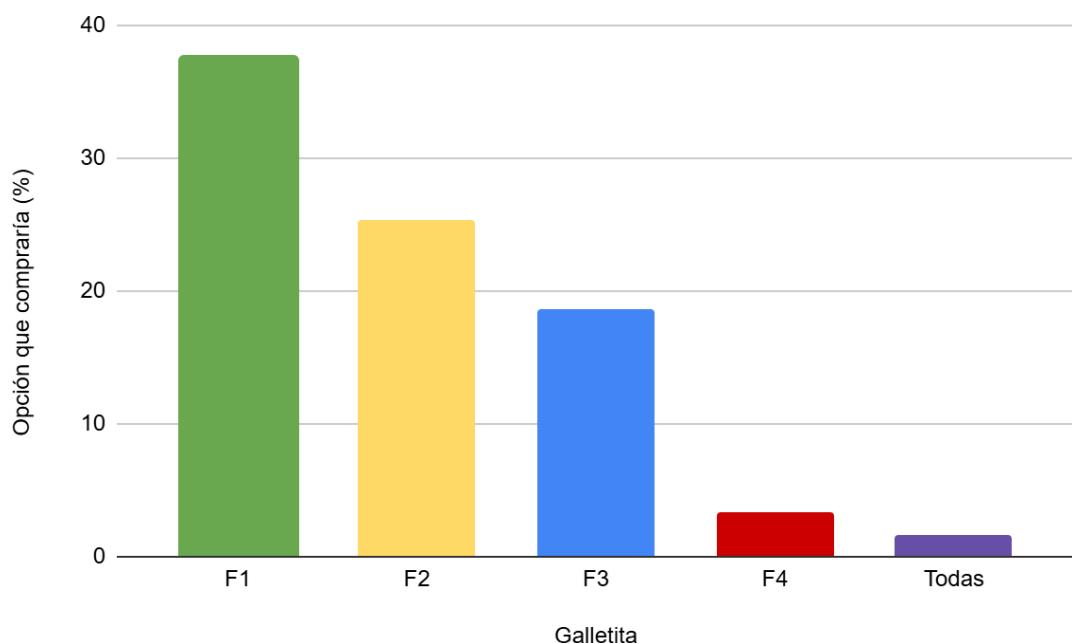


Figura 2. Preferencia de compra de las 4 formulaciones.

Tabla 2. Composición química teórica de las 4 formulaciones.

Composición química	F1	F2	F3	F4
Valor energético (Kcal)	121	126	124	130
Valor energético (kJ)	508	529	523	544
Carbohidratos (g)	17,9	18,8	14,4	20,1
Azúcares totales (g)	2,9	3,0	0,1	0,1
Azúcares añadidos (g)	2,8	3,0	0,0	0,0
Proteínas (g)	3,2	2,9	3,1	2,8
Grasas totales (g)	4,1	4,4	6,0	4,3
Grasas saturadas (g)	1,0	0,9	1,1	0,8
Grasas trans (g)	0,0	0,0	0,0	0,0
Fibra alimentaria (g)	2,7	3,5	4,1	2,8

Tabla 3. Sellos de advertencia nutricionales presentes en las cuatro formulaciones

Sellos de advertencia nutricional	F1	F2	F3	F4
Exceso en azúcares	N/A	N/A	N/A	N/A
Exceso en grasas totales	EXCESO	EXCESO	EXCESO	N/A
Exceso en grasas saturadas	N/A	N/A	N/A	N/A
Exceso en sodio	N/A	N/A	N/A	N/A
Exceso en calorías	EXCESO	EXCESO	EXCESO	N/A
Contiene edulcorante	N/A	N/A	N/A	N/A
Contenido cafeína	N/A	N/A	N/A	N/A

Los resultados de la evaluación sensorial de nuestras galletitas muestran una aceptabilidad general, color, textura y sabor comparables a las de otras galletitas sin gluten reportadas en la literatura, como las desarrolladas por Sacco et al. (2014). Las mismas se hicieron a base de almidón de maíz y distintos porcentajes de harina de ahipa. Además, contenían huevo, yemas, azúcar, manteca y leudante. En particular, nuestras galletitas F1 (dulces con huevo) obtuvieron puntuaciones similares promedio de todas las características al compararlas con el estudio citado anteriormente (8/9 frente a 6,5/9). Por otro lado, al compararlas con galletitas sin gluten elaboradas con una premezcla industrial, azúcar y huevo (Pallares 2022), nuestras formulaciones mostraron valores sensoriales menores en la mayoría de las características evaluadas (6,5/9 vs 4,5/5), excepto en textura, donde los resultados fueron similares (3,4/5 frente a 6/9). Cabe destacar que dicho estudio fue realizado con solo 8 jueces, en contraste con los 73 participantes de nuestro análisis. Además, al compararlas con galletitas formuladas con arroz integral (Almora-Hernández et

al., nuestras galletitas F1 evidenciaron una mejor aceptabilidad general (8/9 frente a 5/7).

Si bien nuestras galletitas se destacan por su mejor calidad nutricional gracias al uso de ingredientes naturales (en contraste con los aromatizantes artificiales que suele estar presente en las opciones industriales), la poca cantidad o ausencia (en caso de las saladas) de azúcar añadido, un menor contenido de sodio y un mayor aporte de fibra, el análisis basado únicamente en los sellos de advertencia podría inducir a decisiones erróneas. Evaluar exclusivamente la cantidad de sellos, sin considerar la calidad de los ingredientes y nutrientes, podría hacer que algunas galletitas industriales con un solo sello se perciban como una opción más saludable, cuando en realidad nuestras formulaciones ofrecen un perfil nutricional superior.

Entre las limitaciones del trabajo, podemos mencionar que la composición centesimal de las galletitas de las diferentes formulaciones fue estimada de manera teórica y no

experimentalmente, por lo que los valores no son tan exactos. Además, al no estar el SA incluido en el CAA, actualmente no es posible transferir las galletitas a la industria alimentaria para su elaboración y comercialización. De todos modos, hemos iniciado el trámite para la inclusión del SA a través del CONAL y se encuentra en estado de tramitación. Asimismo, tenemos previsto la realización de la composición química experimental de las galletitas y su futura transferencia a la industria.

4. Conclusiones

La cantidad de residuos generados por la industria alimentaria es preocupante. Sin embargo, muchos de estos subproductos podrían aprovecharse en la formulación de nuevos productos, contribuyendo así a la economía circular. Investigaciones previas realizadas por nuestro grupo de trabajo han demostrado que el salvado de arroz, un subproducto de la industria es rico en nutrientes que lo convierten en un ingrediente prometedor para el desarrollo de alimentos saludables. En este estudio, confirmamos que la incorporación de salvado de arroz en galletitas sin gluten (en su versión vegana u ovo-vegetariana) mejora su calidad nutricional. Además, la evaluación sensorial de las galletitas fue positiva, destacándose en cuanto a aceptabilidad general, color, sabor y textura.

La presencia de dos sellos de advertencia nutricional (exceso de calorías y grasas totales) resalta la necesidad de educar a los consumidores. Es fundamental que la población entienda que lo más importante es analizar los ingredientes y la cantidad de nutrientes críticos, como las proteínas y la fibra, en lugar de basarse únicamente en los sellos de advertencia. Esto permitirá una mejor toma de decisiones en cuanto a la elección de productos alimenticios más saludables.

5. Agradecimientos

Las autoras agradecen a la Universidad Nacional de La Plata (UNLP), Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Comisión de Investigaciones Científicas (CIC) de la Provincia de Buenos Aires, y al Centro de Investigaciones Agrobiotecnológicas (CIAB) Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional La Plata.

6. Observaciones

Parte de los resultados presentados en el presente manuscrito fueron publicados en la Revista "Actualización en Nutrición" de la Sociedad Argentina de Nutrición (SAN) Innovación en productos sin gluten: uso de salvado de arroz y análisis de sellos de advertencia nutricional. ISSN 1667-8052. Código RSAN 1315-25. Milagros Mutuberria, Belén Giménez, Malena Orsini, Cecilia Gaillard y Natalia Graiver.

7. Referencias

- Almora-Hernández E, Monteagudo-Borges R, Lago-Abascal V, Leon-Sánchez G, Rodríguez-Jiménez E (2023). Evaluación fisicoquímica y sensorial de galletas de arroz integral suplementadas con Moringa oleifera y Stevia rebaudiana. Revista Tecnología Química, 43, 81-100.
- Boletín Oficial de la República Argentina (2021). Promoción de la alimentación saludable: Ley 27642. <https://www.boletinoficial.gob.ar/detalleAviso/primera/252728/20211112>.
- Bourguignon D. Closing the loop (2016). New circular economy package. European Union.
- Instituto Nacional de Estadística y Censos - I.N.D.E.C (1999). Encuesta Permanente de Hogares: situación sociodemográfica y laboral 1997-1998, 1a edición, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Instituto Nacional de Estadística y Censos - INDEC.
- Instituto Nacional de Estadística y Censos - I.N.D.E.C (2019). Encuesta Nacional de Gastos de los Hogares 2017-2018: resultados preliminares, 1a edición, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Instituto Nacional de Estadística y Censos - INDEC.
- Milagros Mutuberria, Belén Giménez, Malena Orsini, Cecilia Gaillard y Natalia Graiver (2025). Innovación en productos sin gluten: uso de salvado de arroz y análisis de sellos de advertencia nutricional. Actualización en nutrición. Vol. 26 N° 2 <https://doi.org/10.48061/SAN.2024.26.1.52>
- Ministerio de Hacienda de Argentina (2017). Arroz: informes de cadena de valor.
- Ministerio de Producción y Trabajo de Argentina (2014). Ficha 33: Fibra Alimentaria.
- Ministerio de Salud De Argentina (2021). Calculadora de sellos. <https://sellos.anmat.gob.ar/Calculadora>.
- Ministerio de Salud de la Nación (2022). SARA 2: tabla de composición química de alimentos para Argentina: compilación para ENNyS 2, 1a edición, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Ministerio de Salud de la Nación.
- Mutuberria M, Gimenez B, Graiver N (2024). Aprovechamiento de un subproducto de la industria arrocera para el desarrollo de un alimento innovador.

- Revista Innovación y Desarrollo Tecnológico y Social, 6, 1-7.
- Mutuberria M, Larrosa V, Gimenez B, Graiver N (2023). Maximizando el valor nutricional: reutilización de un subproducto de la industria arrocera en alimentos saludables. Revista del laboratorio tecnológico del Uruguay, 26, 1-21.
- Pallares AC (2022). Estudio del efecto del gel de aloe sp. en la calidad sensorial y nutricional de galletitas dulces sin T.A.C.C. Tesis de grado, Facultad de Ciencias Agrarias, Mendoza.
- Perez Vilcanqui F, Perales Vilchez C (2017). Fibra dietaria: nuevas definiciones, propiedades funcionales y beneficios para la salud. Revisión. Revista Archivos latinoamericanos de nutrición, 67, 146-156.
- Sacco F, Doperto MC, Dini C, Viña S, García MA (2014). Elaboración de galletitas dulces libres de gluten con harina de *Pachyrhizus ahipa*. international conference on food innovation.
- Vargas M, Aguirre L (2021). El salvado de arroz: Procesos de estabilización y usos potenciales en la industria colombiana. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural República de Colombia



Análisis del perfil de textura de panes sin gluten a base de harinas de arroz y quinoa modificada

Yamila Gisela Sánchez^{1,2}, Inés Bodmer¹, Eunice Valentina Contigiani^{1,2}, María Ana Loubes^{1,2*}

1. Departamento de Industrias, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales - Universidad de Buenos Aires, Intendente Güiraldes 2160, Ciudad Universitaria, C1428EGA, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina.
2. Instituto de Tecnología de Alimentos y Procesos Químicos, CONICET - UBA, Intendente Güiraldes 2160, Ciudad Universitaria, C1428EGA, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina.

*E-mail: maeelar@yahoo.com.ar

PALABRAS CLAVES

TPA
Pseudocereal
Harina modificada
Molienda de alta energía

RESUMEN

El objetivo del trabajo fue desarrollar una formulación de pan sin gluten con buena calidad tecnológica y nutricional, incorporando harina de quinoa modificada como sustituto parcial de harina de arroz. Para ello, se utilizó quinoa roja desaponificada, procesada en un molino planetario de bolas para obtener una fracción rica en proteínas y grasas. Se elaboraron panes con sustituciones del 10%, 15%, 20%, 25% y 30% de harina de arroz por harina de quinoa, junto con un control sin quinoa. Se realizó un análisis del perfil de textura de la migra (TPA) en una máquina universal de ensayos, obteniendo parámetros como dureza, cohesividad, elasticidad, gomosidad y masticabilidad. Se observaron diferencias significativas en todos los parámetros. La adhesividad no se registró en ninguna formulación. El 15% de sustitución generó la migra más blanda, mientras que las formulaciones con 10% y 25% presentaron buena cohesividad, elasticidad, gomosidad y masticabilidad. La formulación con 30% presentó los valores más bajos de estos parámetros, indicando una textura menos deseable. Se concluye que la formulación con 25% de harina de quinoa modificada resulta la más adecuada, por su equilibrio entre textura y valor nutricional, contribuyendo al desarrollo de productos sin gluten más saludables y funcionales.

Texture profile analysis of gluten-free breads formulated with rice flour and modified quinoa flour

KEYWORDS

TPA
Pseudocereal
Modified flour
High-energy milling

ABSTRACT

The aim of this study was to develop a gluten-free bread formulation with good technological and nutritional quality by incorporating modified quinoa flour as a partial substitute for rice flour. For this purpose, dehulled red quinoa was processed in a planetary ball mill to obtain a fraction rich in proteins and fats. Breads were formulated by replacing 10%, 15%, 20%, 25%, and 30% of rice flour with quinoa flour, along with a control without quinoa. A texture profile analysis (TPA) of the crumb was performed using a universal testing machine to obtain parameters such as hardness, cohesiveness, springiness, gumminess, and chewiness. Significant differences were observed in all parameters. Adhesiveness was not detected in any formulation. The 15% substitution resulted in the softest crumb, while the 10% and 25% formulations showed good cohesiveness, springiness, gumminess, and chewiness. The 30% formulation had the lowest values for these parameters, indicating a less desirable texture. It is concluded that the formulation with 25% modified quinoa flour is the most suitable, due to its balance between texture and nutritional value, contributing to the development of healthier and more functional gluten-free products.

1. Introducción

La enfermedad celíaca y otras condiciones que requieren dietas sin gluten han impulsado el desarrollo de productos panificados libres de esta proteína. Sin embargo, la ausencia de la red viscoelástica que el gluten provee representa un desafío tecnológico, ya que afecta negativamente la textura, el volumen, la elasticidad y la aceptabilidad sensorial de dichos productos (Foschia et al., 2016). Para mitigar estas limitaciones, se ha recurrido al uso de materias primas alternativas, como pseudocereales, fibras y proteínas vegetales, que aportan propiedades funcionales y valor nutricional (Alvarez-Jubete et al., 2009; Alvarez-Jubete et al., 2010). Entre estas alternativas, la incorporación de hidrocoloides y almidones modificados también ha mostrado mejoras en la estructura y la retención de humedad en panes sin gluten (Sabanis y Tzia, 2011; Ziobro et al., 2012).

La quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) es un pseudocereal andino de alto valor nutricional, que contiene todos los aminoácidos esenciales, presenta buena digestibilidad y posee propiedades funcionales destacadas, como la capacidad de retención de agua y formación de espuma (Repo-Carrasco y Serna, 2011; Repo-Carrasco et al., 2003). La inclusión de su harina en formulaciones sin gluten ha demostrado efectos positivos sobre la calidad nutricional y, en ciertos casos, sobre parámetros tecnológicos como el volumen específico o la textura (Sciarini et al., 2010). No obstante, niveles elevados de sustitución pueden inducir defectos estructurales y sensoriales, como una textura más densa o un sabor amargo no deseado (Burešová et al., 2017).

La modificación física de materias primas mediante tecnologías como la molienda de alta energía permite obtener fracciones enriquecidas en componentes específicos (proteínas, lípidos) y modificar sus propiedades funcionales, facilitando su incorporación en matrices panificables sin gluten (Gómez y Martínez, 2016; Sánchez et al., 2024). Estas técnicas pueden mejorar la capacidad de la harina de quinoa para interactuar con otros ingredientes, optimizando la estructura del pan. Sin embargo, existen escasos antecedentes sobre el impacto textural de la incorporación de harina de quinoa modificada en panes sin gluten elaborados a base de harina de arroz.

El objetivo de este trabajo fue desarrollar una formulación de pan sin gluten con adecuada calidad tecnológica y nutricional, evaluando el efecto de la sustitución parcial de harina de arroz por harina de quinoa modificada sobre el perfil de textura de la migra. Se planteó como hipótesis que niveles moderados de sustitución (10–25 %) mejorarían los atributos texturales sin comprometer la integridad estructural del producto, en comparación con formulaciones sin quinoa o con niveles más altos de sustitución.

2. Materiales y métodos

Materias Primas

Los panes fueron elaborados a base de harinas de arroz y quinoa. Se utilizó una harina de arroz comercial (Kapac Alimentos Específicos S.A., Argentina) con 10,2% de humedad, 4,2% de proteínas, 82% de carbohidratos, 1,6% de grasa, 0,45% de cenizas y 1,6% de fibra (AACC, 2000). Esta harina presentó una distribución multimodal del tamaño de partícula (determinada por tamizado), con un valor medio de $220 \pm 22 \mu\text{m}$ y un índice de dispersión de $1,37 \pm 0,2$.

La harina modificada de quinoa se obtuvo a partir de semillas desaponificadas de quinoa roja (Naccato, Buenos Aires), molidas en un molino planetario de bolas Retsch PM100 (Retsch GmbH, Haan, Alemania) a 350 rpm durante 30 minutos (Sánchez et al., 2024). Se utilizó una fracción de molienda con un tamaño de partícula medio de $185 \pm 37 \mu\text{m}$ y un índice de dispersión de $1,83 \pm 0,3$. Esta fracción presentó 10,6% de humedad, 55,8% de carbohidratos, 8,3% de fibra, 2,4% de cenizas, 14,9% de proteínas y 7,9% de grasa (AACC, 2000).

Las formulaciones también incluyeron almidón de mandioca (Dimax Alimentos, Argentina), leche en polvo (La Serenísima, Argentina), huevo en polvo (Ovofull, Argentina), aceite de girasol (Natura, AGD Alimentos Naturales, Argentina), levadura seca (Calsa, Argentina), goma xántica (Onza de Oro, Condiment S.A., Argentina), sal (Dos Anclas, Argentina) y azúcar (Ledesma, Argentina).

Formulación y elaboración de los panes

La formulación control incluyó: harina de arroz (384 g), almidón de mandioca (16 g), leche en polvo (84 g), azúcar (12 g), huevo en polvo (10 g), sal (8 g),

levadura seca (8 g), goma xántica (8 g), agua bidestilada (468 g) y aceite de girasol (40 ml). Las demás formulaciones se prepararon reemplazando parcialmente la harina de arroz por harina de quinoa modificada en proporciones del 10 %, 15 %, 20 %, 25 % y 30 %.

La elaboración de los panes se realizó utilizando una panificadora (Liliana SRL, Argentina). El proceso incluyó las siguientes etapas: mezclado (31 rpm durante 25 minutos), fermentación (25 °C durante 20 minutos, 32 °C durante 25 minutos y 38 °C durante 45 minutos) y horneado (121 °C durante 65 minutos). En la Figura 1 se presenta un esquema general del proceso, que abarca desde el procesamiento de las semillas de quinoa hasta la elaboración de los panes, y en la Figura 2 se muestran los productos obtenidos para cada formulación. Se elaboraron al menos dos réplicas por cada una de ellas.

Análisis del Perfil de Textura

Los panes recién horneados se dejaron estabilizar a temperatura ambiente, y las pruebas se realizaron dentro de las 24 horas posteriores a la cocción. El análisis del perfil de textura (TPA) del pan sin gluten se llevó a cabo utilizando una máquina de ensayos universales Instron, modelo 3345 (Canton, Massachusetts, Estados Unidos), equipada con una celda de carga de 50 N. Se empleó una sonda cilíndrica de 30 mm de diámetro para comprimir, dos veces, cilindros de migas (diámetro: 20 mm, espesor: 15 mm) a una velocidad de 50 mm/min, alcanzando una deformación del 70 % (Figura 3). Los parámetros de textura analizados incluyeron dureza (D), adhesividad (A), cohesividad (C), elasticidad (E), gomosidad (G) y masticabilidad (M), calculados mediante el software provisto por el fabricante. Los valores reportados corresponden al promedio de al menos 12 repeticiones por formulación.



Figura 1. Esquema del proceso de obtención de los panes sin gluten enriquecidos con harina de quinoa modificada.

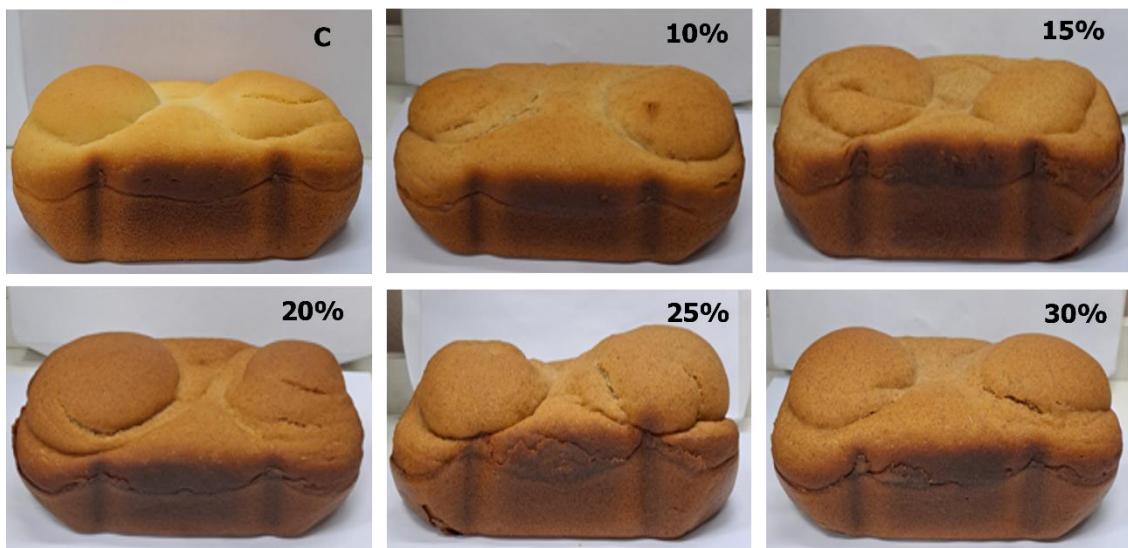


Figura 2. Panes sin gluten elaborados con diferentes niveles de sustitución de harina de arroz por harina de quinoa modificada (0 %, 10 %, 15 %, 20 %, 25 % y 30 %).

Análisis estadístico

Los resultados se expresaron como media \pm desviación estándar (DS). Para evaluar el efecto del porcentaje de sustitución de la harina de quinoa modificada sobre el perfil textural de los panes sin gluten, se realizó un análisis multivariado de la varianza (MANOVA) de una vía, considerando simultáneamente las siguientes variables dependientes: dureza, cohesividad, elasticidad, gomosidad y masticabilidad.

Cuando se observaron efectos multivariados significativos ($p < 0,05$), se realizaron análisis univariados posteriores (ANOVA de una vía) para cada parámetro, seguidos por comparaciones múltiples mediante la prueba LSD (Least Significant Difference), dado que el análisis multivariado previo permitió controlar el error global de tipo I.

El análisis estadístico se llevó a cabo utilizando el software Statgraphics Centurion versión XVI (Statistical Graphics Corporation, USA), con un nivel de significancia del 5 %.



Figura 3. Ensayo de perfil de textura (TPA) de la migra de pan sin gluten mediante compresión con sonda cilíndrica.

3. Resultados y Discusión

Perfil de textura de la migra del pan

La textura de la migra es un atributo crítico de calidad en el pan, especialmente en productos sin gluten, donde lograr características texturales deseables sigue siendo un desafío debido a la ausencia de gluten. Por ello, su evaluación es esencial para la optimización del producto y la aceptación del

consumidor (Matos & Rosell, 2015). En la Figura 4 se presentan los perfiles promedio de fuerza-tiempo obtenidos durante el análisis TPA, los cuales ilustran las diferencias mecánicas entre formulaciones en cuanto a resistencia inicial y comportamiento tras la compresión.

Como se muestra en la Tabla 1, se observó un efecto significativo del nivel de sustitución de harina de quinoa sobre el perfil de textura de la migra. Todos los parámetros analizados presentaron diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$), con excepción de la adhesividad, que no se detectó en ninguna formulación.

Las migas más firmes correspondieron al control y a la formulación con 20 % de sustitución de harina de quinoa ($D_{control} = 18,91 \pm 1,29$ N; $D_{20\%} = 18,35 \pm 2,57$ N), mientras que la migra más blanda se observó en la muestra con 15 % de sustitución ($D_{15\%} = 11,80 \pm 1,60$ N).

Estos resultados coinciden parcialmente con los reportados por Wang et al. (2015), quienes señalaron que un mayor contenido de quinoa tiende a incrementar la firmeza y masticabilidad de panes a base de trigo, aunque el efecto depende del tipo de producto.

La cohesividad y la elasticidad siguieron tendencias similares, con los valores más altos en las muestras con 10 % y 25 % de sustitución ($C_{10\%} = 0,11 \pm 0,02$; $E_{10\%} = 0,59 \pm 0,05$; $C_{25\%} = 0,10 \pm 0,02$; $E_{25\%} = 0,54 \pm 0,05$).

Estos resultados sugieren una textura más elástica y menos quebradiza, característica deseable en panes sin gluten. Mejoras comparables en parámetros texturales con sustituciones moderadas de quinoa (hasta 25 %) también fueron reportadas por Elgeti et

al. (2014), quienes lo atribuyen a la alta capacidad de retención de agua y formación de espuma del almidón y proteínas de la quinoa.

La mayor gomosidad se registró en el pan control, seguida por las formulaciones con 10 % y 25 % de sustitución ($G_{control} = 1,54 \pm 0,22$ N; $G_{10\%} = 1,37 \pm 0,14$ N; $G_{25\%} = 1,32 \pm 0,19$ N).

La masticabilidad no presentó diferencias significativas entre estas tres formulaciones, aunque mostraron los valores más altos dentro del estudio ($M_{control} = 0,82 \pm 0,17$ N; $M_{10\%} = 0,81 \pm 0,12$ N; $M_{25\%} = 0,71 \pm 0,15$ N).

Estos resultados indican que niveles bajos a moderados de sustitución no comprometen la integridad estructural ni el esfuerzo de masticación, en concordancia con los hallazgos de Turkut et al. (2016), quienes observaron que panes con hasta 25 % de harina de quinoa mantenían buenas propiedades sensoriales y texturales.

Por el contrario, el nivel de sustitución del 30 % resultó en una textura notablemente inferior, con valores significativamente más bajos de cohesividad, elasticidad, gomosidad y masticabilidad ($C_{30\%} = 0,02 \pm 0,01$; $E_{30\%} = 0,25 \pm 0,08$; $G_{30\%} = 0,31 \pm 0,13$ N; $M_{30\%} = 0,08 \pm 0,05$ N).

Estos resultados sugieren que niveles elevados de harina de quinoa modificada pueden alterar negativamente la matriz de la migra, posiblemente debido a la dilución de la red de almidón de la harina de arroz y a la presencia predominante de componentes de quinoa con comportamiento de gelatinización distinto, como proponen Wang y Zhu (2016).

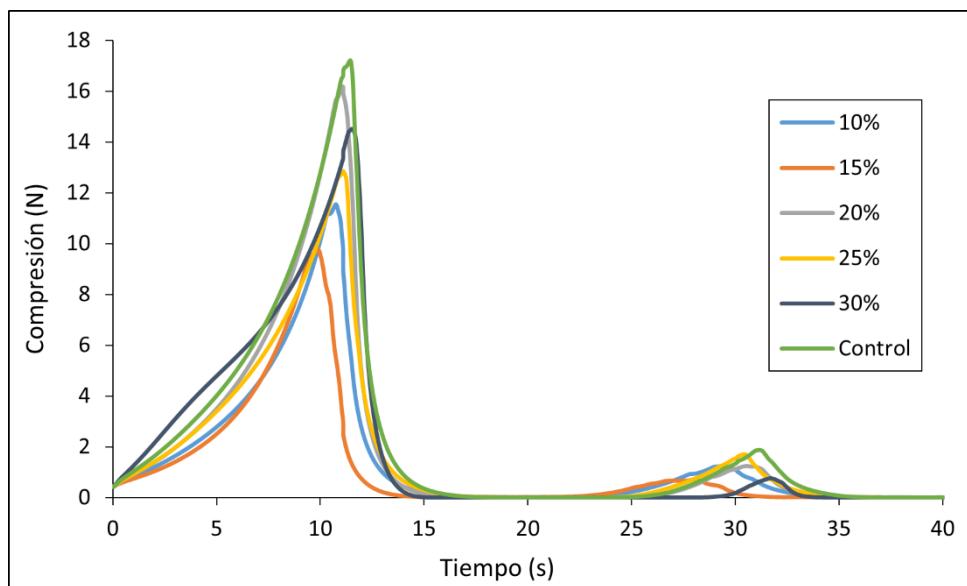


Figura 4. Perfiles promedio de fuerza-tiempo obtenidos en el análisis de textura (TPA) de las distintas formulaciones de pan sin gluten.

Tabla 1. Parámetros texturales de la miga del pan según el porcentaje de sustitución con harina de quinoa.

Muestra	Dureza (N)	Cohesividad	Elasticidad (cm)	Gomosidad (N)	Masticabilidad (J)
Control	$18,9 \pm 1,3^d$	$0,08 \pm 0,01^{c,d}$	$0,53 \pm 0,05^c$	$1,54 \pm 0,22^e$	$0,82 \pm 0,17^d$
10%	$13,3 \pm 2,4^b$	$0,11 \pm 0,02^e$	$0,59 \pm 0,05^d$	$1,37 \pm 0,14^d$	$0,81 \pm 0,12^d$
15%	$11,8 \pm 1,6^a$	$0,07 \pm 0,02^{b,c}$	$0,48 \pm 0,08^b$	$0,85 \pm 0,14^b$	$0,41 \pm 0,13^b$
20%	$18,4 \pm 2,6^d$	$0,07 \pm 0,02^b$	$0,47 \pm 0,08^b$	$1,16 \pm 0,24^c$	$0,56 \pm 0,19^c$
25%	$13,9 \pm 1,5^{b,c}$	$0,10 \pm 0,02^{d,e}$	$0,54 \pm 0,05^{c,d}$	$1,32 \pm 0,19^d$	$0,71 \pm 0,15^d$
30%	$15,0 \pm 1,5^c$	$0,02 \pm 0,01^a$	$0,25 \pm 0,08^a$	$0,31 \pm 0,13^a$	$0,08 \pm 0,05^a$

Media \pm DS. Valores en la misma columna con la misma letra no difieren significativamente ($p < 0,05$).

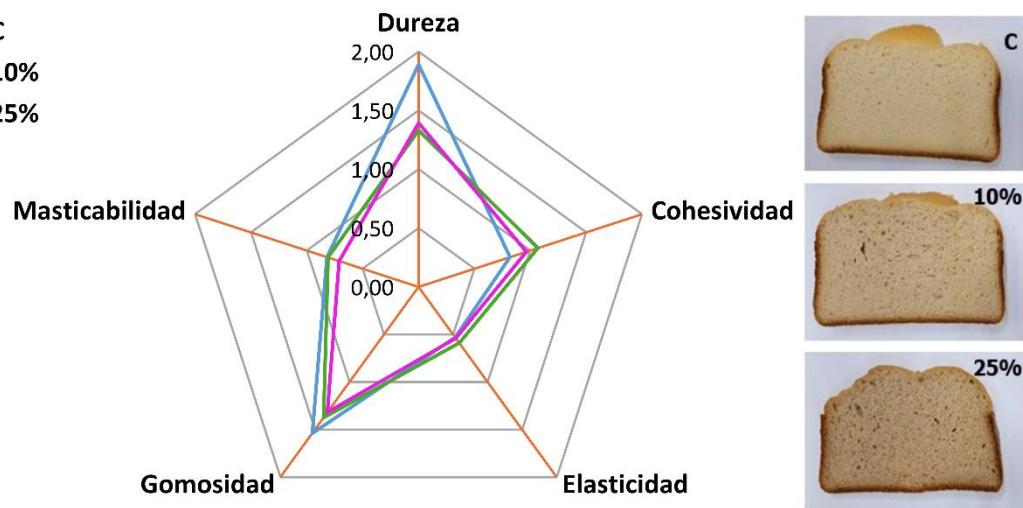


Figura 5. Diagrama comparativo del perfil de textura de las muestras seleccionadas (control, 10 % y 25 % de harina de quinoa modificada).

Considerando los factores tecnológicos y nutricionales, las formulaciones con 10 % y 25 % de harina de quinoa modificada mostraron la mejor textura de miga.

En la Figura 5 se muestra un diagrama comparativo de los principales parámetros texturales (dureza, cohesividad, elasticidad, gomosidad y masticabilidad) para las formulaciones seleccionadas (control, 10 % y 25 %), lo cual permite visualizar de forma integral el impacto de la sustitución sobre la calidad del producto.

Dado que el presente estudio busca desarrollar panes sin gluten estructuralmente adecuados y nutricionalmente enriquecidos mediante la incorporación de harina de quinoa modificada, el nivel de sustitución del 25 % se perfila como la formulación óptima. Esto concuerda con la literatura previa, que indica que la incorporación moderada de quinoa mejora la calidad del producto sin afectar negativamente la textura ni el sabor (Wang & Zhu, 2016; Elgeti et al., 2014).

4. Conclusiones

Los panes elaborados con 10 % y 25 % de sustitución de harina de arroz por harina de quinoa modificada presentaron el mejor perfil de textura, destacándose

en parámetros como cohesividad, elasticidad, gomosidad y masticabilidad. Estos resultados permiten confirmar la hipótesis inicial de que niveles moderados de sustitución mejoran los atributos texturales sin comprometer la integridad del producto.

Teniendo en cuenta que este estudio busca contribuir al desarrollo de alimentos saludables y adaptados a requerimientos específicos como la dieta libre de gluten, y considerando además las propiedades nutricionales y funcionales de la quinoa, la formulación con 25 % de sustitución se perfila como la más adecuada.

Estos hallazgos respaldan el uso de quinoa modificada como ingrediente funcional en productos de panificación sin gluten, y sugieren la necesidad de futuras investigaciones orientadas a evaluar su estabilidad durante el almacenamiento, sus propiedades sensoriales y su aceptación por parte de los consumidores.

5. Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad de Buenos Aires por el financiamiento a través de los Proyecto UBACYT 20020220100189BA y 20020220400124BA, al CONICET por el apoyo mediante el programa

PIBAA 28720210100578CO, y a la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCyT) por la financiación otorgada bajo el proyecto PICT-2018-01619.

6. Referencias

- AACC (2000). Approved methods of the American Association of Cereal Chemists (10th ed.). AACC International, St. Paul, MN, USA.
- Alvarez-Jubete, L.; Arendt, E. K.; Gallagher, E. (2009). Nutritive value and chemical composition of pseudocereals as gluten-free ingredients, *International journal of food sciences and nutrition* 60 (4), 240-257.
- Alvarez-Jubete, L.; Arendt, E. K.; Gallagher, E. (2010). Nutritive value of pseudocereals and their increasing use as functional gluten-free ingredients, *Trends in Food Science & Technology* 21 (2), 106-113.
- Burešová, I.; Tokár, M.; Mareček, J.; Hřívna, L.; Faměra, O.; Šottníková, V. (2017). The comparison of the effect of added amaranth, buckwheat, chickpea, corn, millet and quinoa flour on rice dough rheological characteristics, textural and sensory quality of bread, *Journal of Cereal Science* 75, 158-164.
- Elgeti, D.; Nordlohne, S.D.; Föste, M.; Besl, M.; Linden, M. H.; Heinz, V.; Jekle, M.; Becker, T. (2014). Volume and texture improvement of gluten-free bread using quinoa white flour, *Journal of Cereal Science* 59 (1), 41-47.
- Foschia, M.; Horstmann, S.; Arendt, E.K.; Zannini, E. (2016). Nutritional therapy – Facing the gap between coeliac disease and gluten-free food, *International Journal of Food Microbiology* 239, 113-124.
- Gómez M.; Martínez M.M. (2016). Changing flour functionality through physical treatments for the production of gluten-free baking goods, *Journal of Cereal Science* 67, 68-74.
- Matos, M.E.; Rosell, C.M. (2015). Understanding gluten-free dough for reaching breads with physical quality and nutritional balance, *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 95 (4), 653-661.
- Repo-Carrasco, R.; Espinoza, C.; Jacobsen, S.E. (2003). Nutritional Value and Use of the Andean Crops Quinoa (*Chenopodium quinoa*) and Kañiwa (*Chenopodium pallidicaule*), *Food Reviews International* 19 (1-2), 179-189.
- Repo-Carrasco-Valencia, R.; Serna, L.A. (2011). Quinoa (*Chenopodium quinoa*, Willd.) as a source of dietary fiber and other functional components, *Food Sci. Technol* 31 (1), 201-210.
- Sabanis D; Tzia C. (2011). Effect of hydrocolloids on selected properties of gluten-free dough and bread, *Food Science and Technology International* 17 (4), 279-291.
- Sánchez, Y.G.; Loubes, M.A., González, L.C.; Tolaba, M.P. (2024). Energy-size relationship and starch modification in planetary ball milling of quinoa, *Journal of Cereal Science* 119, 104004.
- Sciarini, L.S.; Ribotta, P.D.; León, A.E. y otros tres autores, (2010). Influence of Gluten-free Flours and their Mixtures on Batter Properties and Bread Quality. *Food Bioprocess Technol* 3, 577-585.
- Turkut, G.M.; Cakmak, H.; Kumcuoglu, S.; Tavman, S. (2016). Effect of quinoa flour on gluten-free bread batter rheology and bread quality, *Journal of Cereal Science* 69, 174-181.
- Wang, S.; Opassathavorn, A.; Zhu, F. (2015). Influence of quinoa flour on quality characteristics of cookie, bread and Chinese steamed bread, *Journal of Texture Studies* 46 (4), 281-292.
- Wang, S.; Zhu, F. (2016). Formulation and quality attributes of quinoa food products, *Food and Bioprocess Technology* 9 (1), 49-68.
- Ziobro, R.; Korus, J.; Witczak, M.; Juszczak, L. (2012). Influence of modified starches on properties of gluten-free dough and bread. Part II: Quality and staling of gluten-free bread, *Food Hydrocolloids* 29 (1), 68-74.