

Artículo de Investigación Original

Obtención eco sustentable de hidratos de carbono del alga parda *Undaria pinnatifida* (Alariaceae) colectada en la región central del Golfo San Jorge (Patagonia Argentina)

[Eco-sustainable extraction of carbohydrates from the brown seaweed *Undaria pinnatifida* (Alariaceae) collected in the central region of the Golfo San Jorge (Patagonia Argentina)]

**María Soledad Namuncurá^{1,4}, Diana Paula Quezada^{1,2}, Osvaldo León Córdoba³,
María Luján Flores^{1*}**

¹Farmacognosia, ²Tecnología Farmacéutica II, ³Química Biológica II. GQMBRNP y LACROMI-AAI, Centro Regional de Investigación y Desarrollo Científico Tecnológico (CRIDECIT), Facultad de Ciencias Naturales y Ciencias de la Salud (FCNyCS), Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco (UNPSJB), Km 4, S/N°, Comodoro Rivadavia, 9000, Chubut, Argentina.

⁴Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Godoy Cruz 2290 (C1425FQB), Ciudad Autónoma de Buenos Aires (CABA), Argentina.

(*Autor de correspondencia: mlujanflo@gmail.com)

Resumen:

Undaria pinnatifida (Harvey) Suringar (Alariaceae) es un alga parda alóctona, invasora, ampliamente distribuida en las costas de la Patagonia Argentina, cuya biomasa representa una oportunidad para la obtención de compuestos de interés biotecnológico. En este trabajo se desarrolló un esquema de extracción secuencial exhaustivo utilizando solventes ecológicamente aceptables, orientado a la obtención de hidratos de carbono, a partir de esporofitos colectados en otoño en la Región Central del Golfo San Jorge (Patagonia Argentina). A partir del alga seca y reducida a polvo, se realizaron extracciones consecutivas con etanol al 80 % v/v a temperatura ambiente y posteriormente a 70 °C, obteniéndose los extractos UpOEt1 y UpOEt2, enriquecidos en manitol. Sobre el marco se efectuaron extracciones acuosas exhaustivas a temperatura ambiente y a 70 °C, generando los extractos UpOW1 y UpOW2, enriquecidos en polisacáridos sulfatados. Finalmente, el residuo remanente fue procesado para extraer y purificar alginato de sodio. Paralelamente, se trabajó con extractos obtenidos a partir de una secuencia que involucró solventes de polaridad creciente (hexano-cloroformo-metanol) comparando los resultados. Los extractos hidroetanólicos presentaron rendimientos superiores respecto a la extracción metanólica proveniente de la secuencia de hexano y cloroformo, alcanzando UpOEt1 un 40.1 %. Los extractos acuosos mostraron elevados contenidos de hidratos de carbono, sulfatos y ácidos urónicos, con predominio de fucosa, galactosa y manosa como monosacáridos constituyentes, siendo los obtenidos a temperatura ambiente aquellos en los que se recuperaron preferencialmente polisacáridos con mayor grado de sulfatación. El alginato de

©The Authors 2026. This article is published with open access by Sociedad Latinoamericana de Biotecnología Ambiental y Algal

sodio purificado presentó un rendimiento de 28.1 % con una composición química comparable al alginato comercial, incluyendo mayor purificación que este último. Se obtuvo un predominio de bloques GG (53 %), seguido de bloques MG (44 %) y baja proporción de bloques MM (3 %), indicando una elevada contribución de residuos gulurónicos asociados a potenciales propiedades gelificantes de importancia farmacéutica. El análisis mediante TLC y CG-MS, confirmó al manitol como constituyente mayoritario, con contenido de hasta 95.5 % en cristales originados en el extracto UpOEt1. Los resultados demuestran que la biomasa de *Undaria pinnatifida* del Golfo San Jorge constituye una fuente renovable para la obtención eco sustentable de manitol, fucoidanos y alginatos mediante procesos de extracción secuencial exhaustiva con solventes verdes, contribuyendo a la valorización biotecnológica de esta especie en la región.

Palabras clave: *alginato de sodio, eco sustentabilidad, fucoidanos, manitol, Undaria pinnatifida.*

Abstract:

Undaria pinnatifida (Harvey) Suringar (Alariaceae) is an invasive, introduced brown seaweed widely distributed along the coast of Patagonia Argentina; its biomass represents an opportunity for obtaining compounds of biotechnological interest. In this work, it was shown a comprehensive sequential extraction scheme using ecologically acceptable solvents, aimed at obtaining carbohydrates from sporophytes collected in autumn in the Central Region of the Golfo San Jorge (Patagonia Argentina). The dried and ground seaweed was extracted consecutively with 80 % v/v ethanol at room temperature and subsequently at 70 °C, obtaining the UpOEt1 and UpOEt2 extracts, enriched in mannitol. Exhaustive aqueous extractions were then carried out on the same frame at room temperature and at 70 °C, generating the UpOW1 and UpOW2 extracts, enriched in sulfated polysaccharides. The remaining residue was processed to extract and purify sodium alginate. In parallel, extracts obtained from a sequence involving solvents of increasing polarity (hexane-chloroform-methanol) were analyzed, and the results were compared. The hydroethanolic extracts showed higher yields than the methanolic extraction from the hexane-chloroform sequence, reaching a yield of 40.1 % for UpOEt1. The aqueous extracts showed high contents of carbohydrates, sulfates, and uronic acids, with fucose, galactose, and mannose predominating as constituent monosaccharides. The fractions obtained at room temperature showed polysaccharides with a higher degree of sulfation. The purified sodium alginate yielded 28.1 % with a chemical composition comparable to commercial alginate, and had a greater purity. A predominance of GG blocks (53 %) was obtained, followed by MG blocks (44 %) and a low proportion of MM blocks (3 %), indicating a high contribution of guluronic residues associated with potential gelling properties of pharmaceutical importance. Analysis by TLC and GC-MS confirmed mannitol as the major constituent, with a content of up to 95.5 % in crystals originating from the UpOEt1 extract. The results demonstrate that the *Undaria pinnatifida* biomass from the Golfo San Jorge constitutes a renewable resource for the eco-sustainable production of mannitol, fucoidans, and alginates through exhaustive sequential

extraction processes with green solvents, contributing to the biotechnological valorization of this species in the region.

Keywords: *sodium alginate, eco-sustainability, fucoidans, mannitol, Undaria pinnatifida.*

Información del Artículo: Recibido – 18 de junio de 2026 // Revisión – 31 de Agosto de 2026 //

Aceptado – 31 de Agosto de 2026 // Publicado – 03 de septiembre de 2026

1. Introducción

Undaria pinnatifida (Harvey) Suringar (Alariaceae), es un alga parda nativa del nordeste asiático, en donde no solo es consumida como alimento, sino también forma parte de la medicina tradicional asiática, con usos para el tratamiento del bocio, problemas gastrointestinales, afecciones del tracto urinario, edema y recuperación posparto (Machado *et al.*, 2025). Es considerada como una de las especies invasoras marinas más exitosas con una distribución extendida en todo el mundo. En Argentina se registra desde 1992 en Puerto Madryn sobre el Golfo Nuevo, y se ha propagado sobre el litoral patagónico, incluyendo el Golfo San Jorge (Casas y Piriz, 1996; Alvarez y Boraso, 2020). Si bien esta expansión genera alteraciones en la flora y fauna nativa de los sectores invadidos, por su capacidad de crecimiento y actividades documentadas, la gran biomasa disponible representa una materia prima renovable de alto interés para la obtención de compuestos de valor agregado. En este sentido, su valorización biotecnológica constituye además una estrategia para el manejo sostenible de esta especie (Epstein y Smale, 2017; Matos *et al.*, 2024).

Como parte de sus estrategias adaptativas, *U. pinnatifida* biosintetiza metabolitos primarios y secundarios, los cuales desempeñan funciones fisiológicas y ecológicas vitales (Flores y Córdoba, 2018). Si bien estudios previos de la especie en la región revelan la presencia de fenoles, péptidos, lípidos, esteroides y minerales (Escobar Daza *et al.*, 2016; Quezada *et al.*, 2023), son los hidratos de carbono los que despiertan mayor interés debido a su abundancia, versatilidad estructural, variabilidad estacional, propiedades biológicas y medicinales, destacándose el manitol, los fucoidanos y los alginatos.

El manitol es un poliol de bajo peso molecular que actúa como producto de reserva de la fotosíntesis. En las algas pardas, se puede encontrar en forma libre dependiendo de la especie, alcanzando entre 20 y 30 % del peso seco (Graisillier *et al.*, 2014), o formando parte de hasta un 2 % de la laminarina tipo M, como unidad terminal de este polisacárido (Li *et al.*, 2021). Cumple funciones fisiológicas claves, actuando frente al estrés ambiental como osmoregulador, en la tolerancia a la salinidad, antioxidante y protector térmico. Farmacológicamente, es empleado como diurético osmótico, en edemas e intoxicaciones; además, como hiperosmótico inhalado, puede contribuir

a la expectoración por medio de la actividad mucociliar, sobre todo en pacientes con fibrosis quística. También, uso diagnóstico en la identificación de la hiperreactividad bronquial.

Industrialmente, se considera además como materia prima para generar biocombustible (Zhang *et al.*, 2020).

Los fucoidanos, polisacáridos de la pared celular, se caracterizan por presentar como unidad estructural fundamental la α -L-fucosa sulfatada acompañada de otros monosacáridos, como galactosa, manosa, entre otros; presentan actividad anticoagulante, antiviral e inmunomoduladora documentada en diversas especies de algas pardas (Ponce *et al.*, 2003).

En cuanto a los alginatos, son polisacáridos constituidos por los ácidos β -D-manurónico y α -L-gulurónico, ampliamente utilizados por sus propiedades gelificantes y para la encapsulación y liberación controlada de fármacos (Kothale *et al.*, 2020; Zhang *et al.*, 2021).

La bioprospección marina actual se orienta hacia la búsqueda de compuestos de interés para la Salud y el Ambiente, optimizando el empleo de procedimientos de extracción que posibiliten la valorización simultánea de los compuestos descritos en párrafos anteriores, destacándose para el escalado, el uso de procesos de biorrefinería, lo que lleva a un aprovechamiento integral de los recursos (Lawrence *et al.*, 2023). Bajo esta perspectiva, el empleo de solventes ecológicamente aceptables es un requisito central. Las mezclas hidroalcohólicas como etanol al 80 % v/v, representan una alternativa frente al uso de solventes de elevada toxicidad, siendo clave para la obtención de polialcoholes solubles de bajo peso molecular y otros metabolitos acompañantes, constituyendo además una

etapa esencial para el posterior aislamiento de polisacáridos. A continuación, a partir del marco remanente, las extracciones con agua permiten obtener fracciones enriquecidas en fucoidanos, para finalmente purificar los alginatos desde el residuo final.

En este contexto, en el presente trabajo se planteó como objetivo, determinar la composición química y en particular el perfil de hidratos de carbono, de extractos obtenidos de *Undaria pinnatifida* colectada en otoño, en la región central del Golfo San Jorge, utilizando una metodología eco sustentable, siendo el primer estudio con estas características realizado para la especie que habita en la región. Para ello, se evaluó la eficacia y sostenibilidad de un protocolo de extracción exhaustivo de hidratos de carbono a partir del material algal seco reducido a polvo, empleando solventes ecológicamente aceptables (etanol al 80 % v/v y agua), en comparación con una metodología que, previamente a la extracción acuosa, utiliza hexano, cloroformo y metanol. Este enfoque busca caracterizar químicamente los hidratos de carbono de los extractos obtenidos con potencial aplicación en salud, contribuyendo al conocimiento de la especie que habita las costas locales y promoviendo su uso como un recurso natural renovable con valor biotecnológico aún poco explorado en la región.

2. Materiales y métodos

2.1 Obtención del material algal

Los esporofitos de *Undaria pinnatifida* fueron colectados en otoño de 2021, en Playa Bonita (45°59'35"S 67°35'26"O), al sur de Comodoro Rivadavia, en el Golfo

San Jorge (Figura 1) y se lavaron con agua de mar para eliminar los epibiontes e impurezas. Un ejemplar se conserva en el Herbario Regional Patagónico bajo el código HRP No. 7861. El resto del material se secó bajo techo, a temperatura

ambiente y al abrigo de la luz directa del sol, y se redujo a polvo empleando un molinillo de paletas equipado de un tamiz de malla 20 (Micro Soil Grinding Machines FT-102).



Figura 1. Sitio de colecta de *Undaria pinnatifida* en otoño, en Playa Bonita (45°59'35"S 67°35'26"O), región central del Golfo San Jorge. (Fotografía tomada durante la colecta).

2.2 Obtención de extractos

2.2.1 Extracción secuencial exhaustiva

Para la obtención de extractos alcohólicos y acuosos, se realizó un protocolo de extracción secuencial exhaustivo a partir de 10 g de material algal seco y molido, como se esquematiza en la Figura 2. La

primera etapa consistió en una extracción con etanol al 80 % (v/v) bajo agitación mecánica constante, a temperatura ambiente (Agitador vertical DLAB OS20-S). Este proceso se realizó en dos ciclos consecutivos de 24 h cada uno, con renovación de solvente entre cada uno para asegurar el agotamiento del solvente. Tras la centrifugación refrigerada a 4000 rpm, a 4 °C, durante 15 minutos, los

sobrenadantes se combinaron y se concentraron a presión reducida en un evaporador rotatorio (Büchi RII), y finalmente se secaron en estufa al vacío (Peet Lab MP-20C). El marco de esta extracción (Marco 1, Figura 2), pesado, se continuó trabajando con el mismo procedimiento, pero a 70 °C, obteniéndose así los extractos UpOE1 y UpOE2. La metodología fue puesta a punto previamente en el grupo de investigación (Becerra, 2016; Escobar Daza, 2018).

Sobre el marco pesado resultante de la última etapa de etanol en caliente (Marco 2, Figura 2), se llevaron a cabo extracciones acuosas exhaustivas a temperatura ambiente en ciclos de 7 h cada uno, renovando el solvente entre los ciclos. El proceso se realizó hasta que la reacción del fenol - ácido sulfúrico resultara negativa. Una vez centrifugados los sobrenadantes tal como se indicó más arriba para las extracciones con etanol, se combinaron, se concentraron a presión reducida y se secaron mediante liofilización. El marco de esta extracción (Marco 3, Figura 2) fue pesado y sometido

al mismo procedimiento, pero utilizando agua a 70 °C, lo que dio como resultado los extractos UpOW1 y UpOW2. Finalmente, el marco resultante del protocolo de extracción descrito (Marco 4, Figura 2), fue pesado y procesado para realizar la purificación del alginato de sodio, AlgUpO, como se detalla más adelante.

Paralelamente, se trabajó con un extracto metanólico de otoño proveniente de una extracción secuencial exhaustiva con solventes de polaridad creciente (n-hexano, cloroformo, metanol), al cual se denominó EUpOMe, cuyo análisis fue publicado por Quezada *et al.* (2023). A partir del marco de metanol de esa secuencia extractiva, se efectuó el mismo protocolo descrito en párrafos anteriores para la obtención de UpOW1 y UpOW2, a fin de garantizar la reproducibilidad y claridad comparativa. De esta forma se obtuvieron EUpOW1 y EUpOW2. El marco resultante fue pesado y procesado para realizar la purificación del alginato de sodio, de igual forma que lo indicado para el Marco 4.

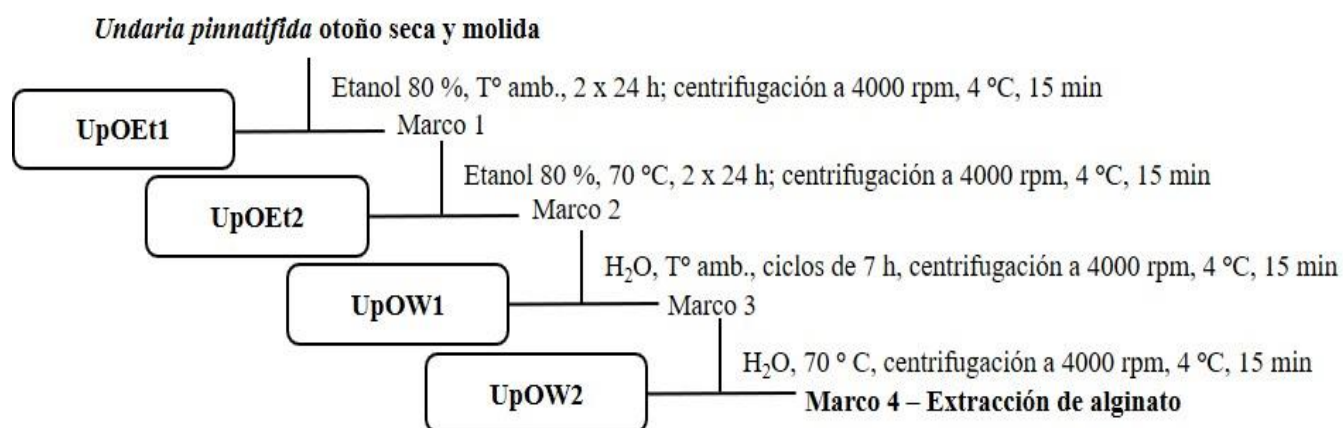


Figura 2. Esquema de obtención de extractos exhaustivos a partir de material seco y molido de *Undaria pinnatifida*, colectada en otoño, en el Golfo San Jorge.

2.2.2 Obtención de alginato de sodio de calidad óptima para la salud

A partir del Marco 4 obtenido tras la extracción secuencial con etanol seguido de agua (Figura 2), se llevó a cabo la purificación del alginato de sodio, siguiendo el protocolo puesto a punto en el grupo de investigación por Becerra (2016). En la primera etapa, se realizó una turbo maceración del Marco 4 con HCl 0.1 M, a 60 °C, durante 2 horas, a fin de intercambiar los cationes de la muestra, transformando el alginato presente en ácido algínico insoluble. La separación se efectuó mediante centrifugación refrigerada y el residuo se lavó con solución de HCl 0.001 M. El extracto ácido (UpOHA) fue recuperado para analizar los fucoidanos que pudieron extraerse. El residuo lavado fue sometido a una turbo maceración con Na₂CO₃ al 2 %, a 50 °C, durante 2 h, en la cual se controló que el pH fuera 10. En este paso el ácido algínico es transformado a alginato de sodio, que es soluble en el medio de trabajo. Posteriormente, se procedió a la purificación del alginato de sodio obtenido. Inicialmente, se realizó una diálisis utilizando bolsas de tamaño de poro de 6000 a 8000 Dalton, para eliminar compuestos de menor peso molecular, contra agua corriente por 48 h, y contra agua destilada 24 h, renovando el agua 2 veces en este último paso. Seguidamente, el material contenido en la bolsa (dializado) fue precipitado por el agregado de una solución de CaCl₂ al 10 %, manteniendo el sistema a 50 °C, durante 1 h; en este paso el alginato de sodio se convierte a alginato de calcio, que es insoluble en el medio de trabajo. Este producto se separó por centrifugación refrigerada y fue blanqueado y

desodorizado mediante un lavado con hipoclorito de sodio al 10 %. A continuación, se liberó el ácido algínico con un tratamiento adicional de acidificación con HCl al 5 %, a 50 °C, por 30 minutos. Finalmente, el producto fue transformado en alginato de sodio por alcalinización con Na₂CO₃ al 2 %, pH 7-8, a 50 °C, por 2 h. El alginato de sodio obtenido fue precipitado con etanol de 96°. Luego de la evaporación del alcohol, se secó mediante liofilización.

Para el marco procedente de la extracción exhaustiva con solventes de polaridad creciente, seguido de agua, se efectuó el mismo tratamiento descrito en el párrafo anterior.

A todos los extractos se les determinó el rendimiento. Sobre los extractos etanólicos se efectuaron análisis químicos cualitativos y análisis cromatográficos planar e instrumental empleando cromatografía gaseosa. Los alginatos se analizaron mediante determinaciones cuantitativas y cromatográficas, y se compararon con ácido algínico comercial (Sigma®), previamente transformado a alginato de sodio según el protocolo indicado (Becerra, 2016).

2.3 Screening químico

A los extractos etanólicos se les realizaron determinaciones cualitativas mediante reacciones usuales orientadas a los principales grupos químicos (Flores y Córdoba, 2018). Sobre una porción de extracto seco retomada en agua, se efectuaron las siguientes reacciones de reconocimiento: para hidratos de carbono, reacción de Molisch; para flavonoides, reacción de Shinoda; para hidroxilos fenólicos, se observó el comportamiento frente a FeCl₃ al 1%, y para taninos, se

observó si ocurría precipitación tras el tratamiento con $K_2Cr_2O_7$ al 5 %. Por otro lado, otra porción de extracto seco fue retomada en cloroformo para poner en evidencia cardenólidos con la reacción de Kedde, quinonas mediante la reacción de Bornträger, y esteroides y/o triterpenos mediante la reacción de Liebermann-Burchard. Finalmente, una última porción del extracto seco fue redisuelta en HCl 1%, y se analizó la presencia de alcaloides con el reactivo de Dragendorff.

2.4 Métodos analíticos

Para evaluar el contenido de azúcares totales se empleó el método del fenol - ácido sulfúrico (Dubois *et al.*, 1956). Para ello, se preparó una solución madre de cada muestra (0.5 mg/ml en agua destilada), en referencia a una curva patrón de D-galactosa de 100 μ g/ml.

La cuantificación de fenoles totales se realizó empleando el reactivo de Folin-Ciocalteu con modificaciones para adecuarla al material de estudio (Flores y Córdoba, 2018). En este caso, se preparó una solución madre de cada muestra (1.0 mg/ml en agua destilada) y una curva de referencia empleando como patrón ácido gálico de concentración 100 μ g/ml.

Los sulfatos se determinaron por el método turbidimétrico propuesto por Dodgson y Price (1962). Para ello, se colocaron de 1 a 3 mg de las muestras en 1.5 ml de HCl 1 M en viales provistos de tapas de teflón, y se calentaron en estufa a 110 °C, durante 4.5 h. Una vez enfriadas, se tomaron alícuotas que fueron tratadas según indica el método. Como solución patrón se empleó una solución preparada disolviendo sulfato de sodio anhidro en HCl 1 M, a manera de lograr una

concentración equivalente a 400 μ g/ml de SO_4^{2-} .

La cantidad de ácidos urónicos totales se determinó según el procedimiento de Filisetti-Cozzi y Carpita (1991) con adecuaciones a las muestras en estudio, frente a una curva patrón con D-glucuronolactona de concentración 80 μ g/ml.

Para la determinación del peso molecular promedio de los alginatos, se realizó el análisis de grupos reductores siguiendo la técnica de Park y Johnson (1949), en muestras preparadas con una concentración de 2 mg/ml. Para la construcción de la curva patrón, se efectuaron diluciones a partir de una solución madre de D-galactosa conteniendo hasta 30 nanomoles de azúcar reductor/0.5 ml de agua destilada. Para calcular el peso molecular (promedio numérico) ($\overline{PM}$) los datos se volcaron en la siguiente ecuación:

$$\overline{PM} = \frac{m \times \% H \text{ de } C \times p \times V_{\text{alic}} \times 10}{A \times V_t} \times PM_{\text{anh}} \times \frac{180}{162}$$

donde,

m: masa del polisacárido en mg; % H de C: porcentaje de hidratos de carbono totales del polisacárido; p: pendiente de la curva de absorbancia vs concentración del azúcar; V_{alic} : volumen de la alícuota de la solución del polisacárido; A: absorbancia a 690 nm; V_t : volumen total de la solución (0.5 ml); PM_{anh} : peso molecular promedio de la unidad monosacarídica anhidra; 180/162: factor que corrige el hecho de que el peso molecular de la unidad monosacarídica en el polisacárido, tiene 18 unidades de masa menos que el azúcar empleado como estándar.

2.5 Perfiles cromatográficos

2.5.1 Determinación de manitol según Farmacopea Argentina (7° Ed., 2013)

La presencia de manitol en las muestras (UpOEt1, cristal UpOEt1, UpOEt2 y EUpOMe) se analizó mediante cromatografía en capa delgada sobre placas de Sílicagel G60F254, empleando n-propanol-acetato de etilo-agua (70:20:10) como fase móvil, y manitol en concentración 1 mg/ml como sustancia de referencia. La detección y revelado se realizó mediante aplicaciones sucesivas de soluciones de ácido p-aminobenzoico y periodato de sodio, con calentamiento a 100 °C.

2.5.2 Determinación de azúcares componentes mediante cromatografía gaseosa

Se procedió a realizar hidrólisis ácida del material. Se pesó 1 a 3 mg de muestra en viales provistos de tapas de teflón, a los cuales se les añadió 1 ml de TFA 2 M, y se hidrolizaron en estufa a 121 °C, durante 90 min. A continuación, los hidrolizados fueron lavados para eliminar totalmente el ácido y llevados a sequedad bajo corriente de aire. A fin de poder analizar los hidrolizados (o en el caso de los extractos alcohólicos, sin hidrólisis previa), mediante cromatografía gaseosa, se derivatizaron como aldononitrilos peracetilados (Seymour, 1979). Se

prepararon también alditoles peracetilados (Shea y Carpita, 1988).

Para la determinación de los hidratos de carbono constituyentes de los extractos, previa hidrólisis y derivatización, se utilizó un cromatógrafo gas líquido Shimadzu GCMS-QP2010 equipado con un detector masa. Se empleó una columna capilar SP-2330 (Supelco) de 30 m de largo, 0.25 mm de diámetro interno y 0.20 µm de espesor de la fase líquida. El flujo del gas portador (He) fue de 1 ml/min. Se efectuó una corrida isotérmica a 220 °C, con temperaturas de inyector y detector de 235 °C. Los resultados se compararon con los correspondientes a monosacáridos estándares derivatizados de igual forma y con espectros de masa de la biblioteca Wiley 9.0.

2.6 Fraccionamiento del alginato

Para la separación de los bloques constituyentes del alginato purificado, se pesaron 0.250 g del polisacárido y se suspendieron en 25 ml de agua destilada conteniendo 0.75 ml de HCl 3 M, llevando a reflujo bajo atmosfera de N₂ por 20 min (Chandía *et al.*, 2001). El producto resultante se centrifugó a 3000 rpm, separándose un material insoluble y el sobrenadante que fue neutralizado con NaOH 0.1 M. A continuación, al sobrenadante neutralizado, se le adicionaron 100 ml de etanol al 98 % y se dejó en reposo en heladera, 24 h. Transcurrido ese tiempo, se eliminó el solvente a presión reducida y el residuo se secó en una estufa de vacío, obteniéndose Fx1 constituida por los bloques MG. Por otra parte, el material insoluble obtenido de la centrifugación indicada más arriba, se llevó a reflujo con HCl 0.3 M por 2 h, bajo atmosfera de N₂. El precipitado

fue separado por centrifugación y el nuevo sobrenadante fue neutralizado también con NaOH 0.1 M; posteriormente se llevó a pH 2.8 con HCl 1 M. La fracción soluble así obtenida, Fx2, constituida por los bloques MM, fue neutralizada y dializada; luego, se le adicionó etanol al 98 %, se centrifugó y el precipitado se secó en estufa de vacío. Por último, este precipitado, denominado Fx3 y constituido por los bloques GG, se disolvió por neutralización, se dializó, se precipitó con etanol al 98 % y se secó en estufa de vacío.

2.7 Análisis estadístico

Los resultados se expresaron como media $\pm$ desviación estándar (DE). Las diferencias entre tratamientos se evaluaron mediante un análisis de varianza unidireccional (ANOVA), seguido de la prueba post hoc de Tukey para comparaciones múltiples de medias. Las diferencias se consideraron

estadísticamente significativas con un valor de $p < 0.05$. Se empleó el programa InfoStat (versión libre para estudiantes, 2017, UNC).

3. Resultados

Los rendimientos de las extracciones realizadas se muestran en la Tabla 1. El extracto hidroalcohólico obtenido a temperatura ambiente, UpOEt1, presentó un rendimiento importante (40.1 %), disminuyendo notablemente a 13.5 % cuando se subió la temperatura a 70 °C (UpOEt2). Las fracciones acuosas obtenidas posteriormente, presentaron mayor rendimiento cuando se pretrataron con solventes de polaridad creciente, EUpOW1 51.3 % y EUpOW2 44.2 %. Sin embargo, el rendimiento del alginato de sodio no evidenció diferencias marcadas cuando se le obtuvo tras las secuencias extractivas directas o pretratadas con solventes de polaridad creciente (Tabla 1).

Tabla 1. Rendimientos de los extractos de *U. pinnatifida* colectada en otoño, en el Golfo San Jorge, obtenidos sin (Up-) y con pretratamiento con solventes de polaridad creciente (EUp-).

Muestra	Rendimiento (%)
UpOEt1	40.1
UpOEt2	13.5
UpOW1	35.7
UpOW2	36.2
Alginato de sodio (U)	28.1
UpOHA	18.0
EUpOMe	8.0
EUpOW1	51.3
EUpOW2	44.2
Alginato de sodio (EU)	32.5

Los resultados obtenidos del screening químico de los extractos etanólicos y de metanol (en el caso de la secuencia extractiva previa con solventes de polaridad creciente), se presentan en la Tabla 2. Los principales grupos evidenciados en todos los extractos fueron fenoles (flavonoides, ácidos fenólicos y taninos), destacándose en EUpOMe. Los hidratos de carbono (de bajo peso

molecular dado que se trata de extractos alcohólicos) y aminoácidos / péptidos mostraron variabilidad. El ensayo de Liebermann-Burchard resultó positivo en todas las muestras, siendo destacable la presencia de triterpenos en UpOEt2; los demás contenían mezclas de este grupo y esteroides. En todos los casos, se obtuvieron resultados negativos para cardenólidos, quinonas y alcaloides.

Tabla 2. Screening químico de extractos alcohólicos UpOEt1, UpOEt2 y EUpOMe de *U. pinnatifida* colectada en otoño, en el Golfo San Jorge.

Reacción	Grupo químico	UpOEt1	UpOEt2	EUpOMe
Molisch	Hidratos de carbono	++	++	-
Ninhidrina 0.5 %	Aminoácidos y/o péptidos	+++	+	++
FeCl ₃ 1%*	OH fenólicos	+ amarillo/verde	+ amarillo/verde	++ amarillo/verde
K ₂ Cr ₂ O ₇	Taninos	+	+	+++
Shinoda	Flavonoides	+	+	++
Liebermann – Burchard**	Esteroides/ triterpenos	+ verde azulado/ naranja	+ naranja	++ verde azulado/ naranja

(+: ligeramente positivo; + +: positivo; +++: positivo sobresaliente; -: negativo; *amarillo/verde: OH fenólicos aislados / 2 OH fenólicos adyacentes; **verde azulado o verde: esteroides, naranja: triterpenos).

En cuanto a las determinaciones cuantitativas y a la composición de monosacáridos de los extractos acuosos, el análisis reveló marcadas variaciones (Tabla 3). Con relación al rendimiento, en la primera etapa de extracción acuosa a temperatura ambiente, fue de 35.7 % y

51.3 % para UpOW1 y EUpOW1, respectivamente. En la segunda etapa de extracción acuosa (a 70 °C), el rendimiento fue semejante para UpOW2 y disminuyó a 44.2 % en EUpOW2. Al analizar el contenido de hidratos de carbono totales expresado como galactosa,

los extractos provenientes de la secuencia de etanol al 80 % a temperatura ambiente y a 70 °C, evidenciaron valores de 30.1 y 25.3 %, respectivamente, sin presentar diferencias estadísticamente significativas entre sí ($p > 0.05$). En cambio, en la secuencia proveniente del tratamiento con solventes de polaridad creciente, el extracto a temperatura ambiente (EUpOW1, 29.3 % de hidratos de carbono) resultó estadísticamente equivalente a los anteriores, mientras que en caliente (EUpOW2) su contenido fue mayor (36.2 %) diferenciándose de forma significativa ($p < 0.05$) del extracto de la secuencia de etanol al 80 % (UpOW2). En cuanto a los sulfatos, en la secuencia de etanol al 80 %, el contenido fue mayor a temperatura ambiente (10.8 % en UpOW1), superando significativamente a UpOW2 (5.9 %), ($p < 0.05$). Este mismo efecto se observó en los extractos acuosos

provenientes de la secuencia con solventes de polaridad creciente (12.4 % en EUpOW1 frente a 6.3 % en EUpOW2). Cabe destacar que UpOW1 no mostró diferencias significativas respecto a EUpOW1 ($p > 0.05$), al igual que lo ocurrido entre los extractos en caliente de ambas secuencias (Tabla 3).

Para los ácidos urónicos expresados como glucuronolactona, el comportamiento dependió del tipo de pretratamiento realizado ($p < 0.05$). Para los extractos acuosos provenientes de la secuencia de etanol al 80 %, el contenido disminuyó significativamente al realizar la extracción en caliente, pasando de 18.1 % en UpOW1 a 12.8 % en UpOW2 ($p < 0.05$). Por el contrario, en la secuencia de polaridad creciente, la tendencia fue opuesta, con un incremento desde 11.1 % en EUpOW1 a 23.7 % en EUpOW2 ($p < 0.05$) (Tabla 3).

Tabla 3. Resultados de las determinaciones cuantitativas y monosacáridos constituyentes de fracciones acuosas de *U. pinnatifida* colectada en otoño, en el Golfo San Jorge.

	R (%)	H de C (%)	Sulfatos (%)	A. urón. (%)	Fuc	Xil	Man	Gal	Glc
UpOW1	35.7	30.1±3.0 ^{a,b}	10.8±1.2 ^{a,b}	18.1±1.3 ^b	36.7	6.8	31.5	20.1	4.9
UpOW2	36.2	25.3±0.6 ^b	5.9±1.2 ^c	12.8±1.4 ^c	34.5	6.8	15.1	25.2	11.1
EUpOW1	51.3	29.3±3.5 ^{a,b}	12.4±1.1 ^a	11.1±1.2 ^c	29.3	<i>tr</i>	48.7	18.0	4.0
EupOW2	44.2	36.2±2.9 ^a	6.3±1.2 ^{b,c}	23.7±1.0 ^a	41.7	7.3	12.7	28.3	8.5

(R: rendimiento; H d C: hidratos de carbono; A. urón: ácidos urónicos; Fuc: fucosa; Xil: xilosa; Man: manosa; Gal: galactosa; Glc: glucosa; *tr*: trazas; las letras representan diferencias significativas, $p < 0.05$).

El análisis de los monosacáridos constituyentes mostró en todos los casos fucosa, galactosa y manosa como mayoritarios, seguidos de xilosa y glucosa (Tabla 3, Figura 3). Sin embargo, el

comportamiento de la fucosa presentó diferencias; mientras que en el extracto acuoso a temperatura ambiente proveniente de la secuencia iniciada con etanol al 80 % v/v, la proporción de fucosa

bajó levemente al pasar a la temperatura de trabajo de 70 °C, en la secuencia derivada del pretratamiento con metanol, este monosacárido experimentó un incremento notable al aplicar temperatura. A diferencia de la fucosa, los porcentajes de galactosa se elevaron en los extractos

obtenidos a 70 °C en ambos casos. Por su parte, la manosa exhibió concentraciones relativamente más elevadas en los extractos acuosos de temperatura ambiente, superando notablemente a la fucosa en EUpOW1 (Tabla 3).

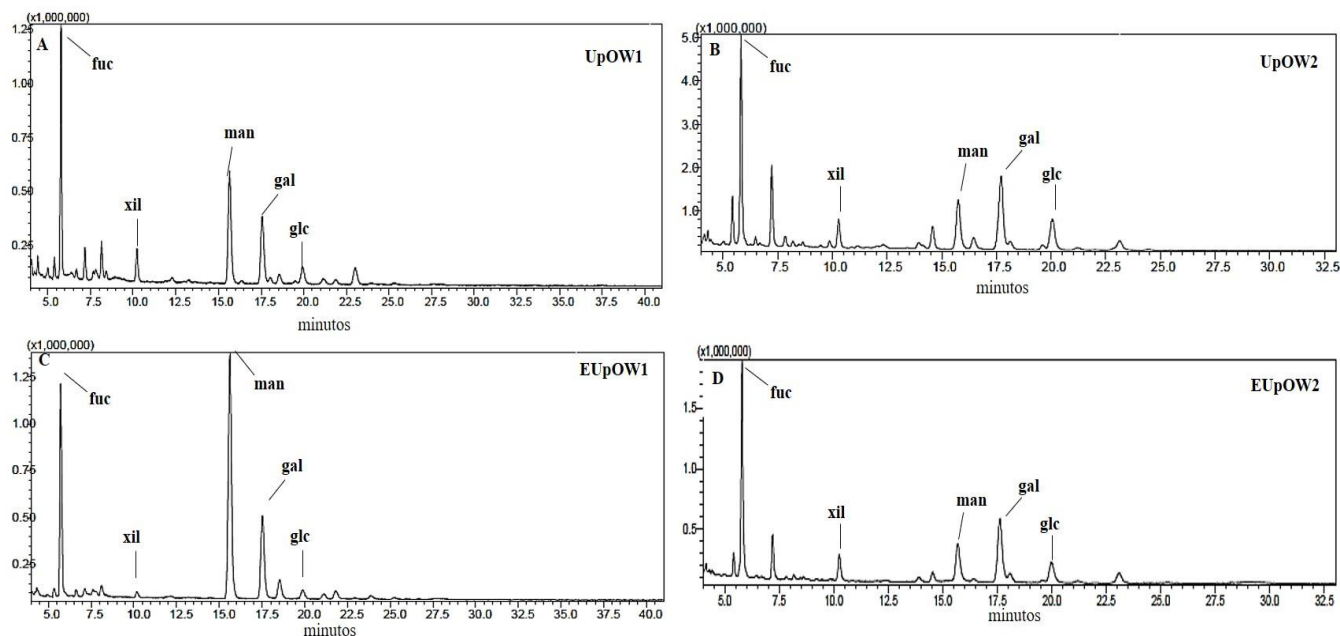


Figura 3. Cromatogramas obtenidos mediante CG-MS, de los extractos acuosos de la secuencia extractiva iniciada con etanol al 80 % (A, B) y de la secuencia con solventes de polaridad creciente (C, D), de *Undaria pinnatifida* colectada en otoño, en el Golfo San Jorge.

El análisis cuantitativo del alginato de sodio obtenido a partir del residuo final de la secuencia de extracción exhaustiva iniciada con etanol al 80 % v/v (Figura 2), mostró similitudes con respecto al producto comercial utilizado como referencia (Tabla 4). En cuanto a la composición química, el contenido de hidratos de carbono y de ácidos urónicos fue semejante para AlgUpO y el producto comercial. Por otra parte, el contenido de

fenoles y de sulfatos totales fue menor en el alginato purificado; este alginato evidenció también un peso molecular promedio superior. Finalmente, en AlgUpO predominaron los bloques homopoliméricos de ácido gulurónico (GG), seguidos de los bloques mixtos MG; en cambio en el polisacárido comercial, fueron mayoritarios los bloques homopoliméricos de ácido manurónico (MM) (Tabla 4).

Tabla 4. Resultados del rendimiento y del análisis cuantitativo del alginato de sodio de *U. pinnatifida* colectada en otoño, en el Golfo San Jorge, y del alginato comercial (Sigma®).

	H d C (%)	A. urón. (%)	Fenoles (%)	Sulfatos (% SO ₄ ²⁻)	MM (kDa)	Bloques (%)
AlgUpO	35.1±2.9	40.9±0.2	< 0.01	1.74±0.26	5.3	GG: 53 MM: 3 MG: 44
Alg comercial (Sigma®)	35.2±1.7	46.8±3.1	0.1±0.02	4.31±1.2	3.8	GG: 33 MM: 61 MG: 6

(H d C: hidratos de carbono; A. urón.: ácidos urónicos; MM: peso molecular promedio).

En cuanto al manitol, los resultados del análisis mediante cromatografía en capa fina (TLC), implementado según las indicaciones de la Farmacopea Argentina (2013), permitió demostrar la presencia de este poliol en los extractos alcohólicos analizados (Tabla 5). El estándar de manitol presentó un Rf de 0.4, caracterizado por la aparición de una

mancha blanca sobre un fondo oscuro del cromatograma tras la aplicación del revelado específico. En todas las muestras se constató la aparición de la mancha blanca característica del sistema para evidenciar manitol, con valores de Rf que se corresponden con el estándar de manitol.

Tabla 5. Resultados del perfil cromatográfico planar orientado al estudio de manitol en muestras obtenidas a partir de *U. pinnatifida* colectada en otoño, en el Golfo San Jorge.

Muestra	Rf	Revelado específico	Compuesto probable
Quercetina*	0.93	Marrón	
Rutina*	0.73	Marrón	
Manitol*	0.40	Mancha blanca	Manitol
UpOEt1	0.42	Mancha blanca	Manitol
Cristal UpOEt1	0.41	Mancha blanca	Manitol
UpOEt2	0.39	Mancha blanca	Manitol
EupOMe	0.39	Mancha blanca	Manitol

(*sustancias estándares).

El análisis de estos extractos empleando cromatografía gaseosa, reveló la presencia de manitol como componente mayoritario en todos los casos, con variaciones de purificación (Tabla 6, Figura 4). Los

cristales obtenidos durante el proceso de secado de UpOEt1 (Cristal UpOEt1) mostraron mayor pureza; en cuanto a UpOEt2, el manitol estaba acompañado de restos de otros monosacáridos.

Tabla 6. Resultados del análisis del perfil cromatográfico obtenido mediante cromatografía gaseosa con un detector de masa (CG-MS), orientado al estudio de manitol en extractos alcohólicos de *U. pinnatifida* colectada en otoño, en el Golfo San Jorge.

Muestra	Manitol (Area %)
UpOEt1	75.4
Cristal UpOEt1	95.5
UpOEt2	90.1
EUpOMe	92.5

(Area %: % que representa el área de la señal del manitol respecto al área total de los metabolitos observados en el cromatograma).

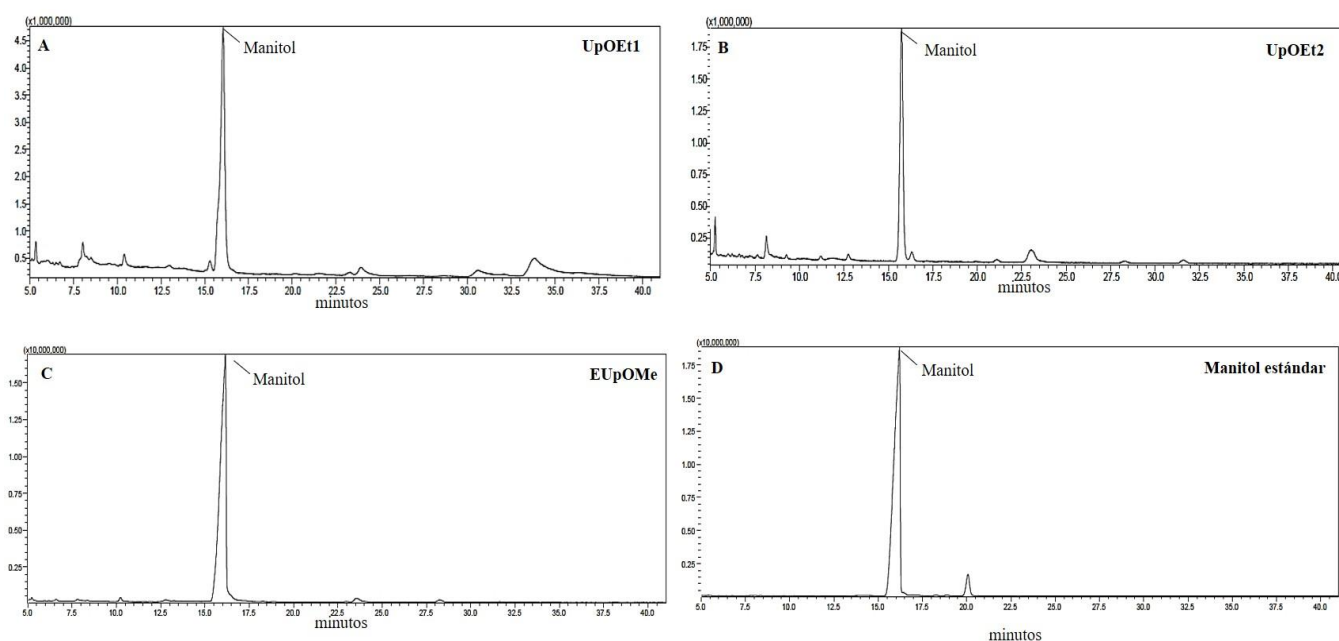


Figura 4. Cromatogramas obtenidos mediante CG-MS, de los extractos alcohólicos de la secuencia extractiva iniciada con etanol al 80 % (A, B), de la secuencia con solventes de polaridad creciente (C), de *Undaria pinnatifida* colectada en otoño, en el Golfo San Jorge, y del manitol estándar (D).

4. Discusión

Actualmente, la tendencia a nivel mundial es propender al uso sostenible y sustentable de recursos naturales buscando su máximo aprovechamiento. Para ello, resulta crucial optimizar el diseño de protocolos de extracción, purificación y caracterización de metabolitos, que

permitan el empleo de la biomasa en su totalidad con la recuperación de productos de valor, minimizando la generación de residuos. Zhang y colaboradores, señalaban hacia fines de 2020, que la biorrefinería de algas pardas era aún un campo incipiente; sin embargo, aunque persisten los desafíos, el avance de los desarrollos tecnológicos en los últimos

años ha sido notable (Zhang *et al.*, 2020). En este contexto, la obtención de hidratos de carbono que proponemos mediante un esquema de extracción secuencial exhaustivo con solventes “verdes”, ambientalmente aceptables (Figura 2), a partir de la abundante biomasa del alga parda alóctona *U. pinnatifida*, disponible en la región patagónica, representa una contribución ecosustentable y una oportunidad regional de valorización del recurso (Lawrence *et al.*, 2023).

El primer extracto obtenido con etanol al 80 % a temperatura ambiente, UpOEt1, en la secuencia desarrollada en este trabajo, exhibió un buen rendimiento de extracción (40.1 %, Tabla 1), en contraposición a lo ocurrido para EUpOMe (8.0 %), el cual provenía de una extracción realizada con solventes de polaridad creciente. La elección de mezclas hidroalcohólicas, específicamente etanol al 80 % v/v, para el aislamiento inicial de polioles solubles de bajo peso molecular, manitol en este caso, se alinea firmemente con metodologías validadas tanto en la fitoquímica de plantas (Percival y Young, 1974) como en las tendencias actuales de bioprospección de macroalgas (Hosseini *et al.*, 2024). Un aspecto a destacar en la secuencia, es la aplicación de calor en la segunda etapa, lo que optimiza el rendimiento global de obtención del manitol.

El perfil químico cualitativo de los extractos alcohólicos UpOEt1, UpOEt2 y EUpOMe (Tabla 2), mostró la presencia de esteroides/triterpenos y derivados fenólicos. No obstante, en referencia a hidratos de carbono, el análisis mediante cromatografía en capa fina (TLC) (Tabla 5), y cromatografía gaseosa (GC-MS) (Tabla 6), confirmaron que el componente mayoritario en estos extractos era el manitol. Comparativamente, UpOEt1 presentó 75.4 % de manitol, a diferencia de EUpOMe, que evidenció 92.5 %. Sin

embargo, la eficiencia de la secuencia extractiva con etanol propuesta radica en el comportamiento de UpOEt1 durante el proceso de secado, dada la formación espontánea de cristales (Cristal UpOEt1), que contenían 95.5 % de manitol, evidenciando una purificación primaria de este compuesto. Con relación a este metabolito, un estudio de transcriptoma de *U. pinnatifida* (Shan *et al.*, 2015), reveló enzimas claves implicadas en la biosíntesis, lo cual permite comprender su metabolismo y definir su época de colecta, ya que tiende a acumularse durante el verano y otoño, para ser utilizado en invierno (Schiener *et al.*, 2015). Estudios realizados en otras especies, destacan su importancia, como el uso de extractos enriquecidos en este poliol para la curación de heridas (Premarathna *et al.*, 2023), subrayando la importancia de su extracción a partir de *U. pinnatifida*. La comparación de los extractos alcohólicos evidencia la recuperación relevante de manitol empleando la secuencia que parte de etanol al 80 %; este resultado demuestra la factibilidad técnica de obtener este compuesto de interés farmacéutico prescindiendo de solventes de elevada toxicidad, corroborando la sostenibilidad del proceso a escala de laboratorio, lo que constituye una de las bases para proyectar un escalado.

Existen diversos estudios que abordan el aprovechamiento integral de *U. pinnatifida* empleando distintas estrategias extractivas, aunque en muchos casos utilizan diferentes solventes, metodologías y se dirigen a otros metabolitos. Zhang *et al.* (2020), trabajaron con etanol, seguido de agua a temperatura ambiente, agua con microondas, y finalmente con una solución de Na₂CO₃ al 1.5 %, para recuperar pigmentos, manitol, florotaninos, fucoidanos y alginatos. Kim *et al.* (2024) eligieron una metodología de

extracción verde empleando dióxido de carbono supercrítico seguido de agua supercrítica, y compararon con una extracción con hexano, aunque se orientaron al estudio de fucoxantina, betacarotenos y ácidos grasos. Park *et al.* (2024) emplearon agua supercrítica para distintas partes del alga, comparando las propiedades químicas de florotaninos, azúcares totales y proteínas. Lee *et al.* (2022), evaluaron también el efecto de diferentes solventes en distintas partes del alga, empleando etanol, metanol y agua caliente, para el estudio de fenoles y flavonoides. En nuestro caso, los resultados del estudio integral dirigidos a los hidratos de carbono, representan una contribución en el marco de las estrategias de aprovechamiento de la biomasa de *U. pinnatifida* ampliamente distribuida en la región.

Al avanzar en la secuencia de extracción, los extractos acuosos (Tabla 3), muestran que la aplicación de temperatura constituye un factor crítico de fraccionamiento selectivo de polisacáridos de tipo fucoidanos. La elección del agua como solvente extractivo en esta etapa, resulta de las investigaciones previas realizadas en nuestro grupo de investigación sobre el alga parda de la Patagonia Argentina, *Adenocystis utricularis*, donde se compararon tres solventes convencionales para la extracción de fucoidanos, tanto a temperatura ambiente como a 70 °C, esto es agua destilada, cloruro de calcio al 2 % y ácido clorhídrico a pH 2, obteniendo productos similares en todos los casos. El agua resultó el solvente de elección, ya que no presentaba interferencias, es un solvente simple, disponible, práctico y no nocivo, aunque requiere más pasos de extracción (Ponce *et al.*, 2003). En el presente estudio, en la secuencia iniciada con etanol al 80 % v/v (UpO), el extracto

acuoso obtenido a temperatura ambiente (UpOW1), presentó mayor contenido de sulfatos (10.8 %) y de ácidos urónicos (18.1 %), que el obtenido a 70 °C, UpOW2 (5.9 % y 12.8 %, respectivamente), indicando que en la primera etapa se extrajeron los polisacáridos más sulfatados y solubles a temperatura ambiente. En la secuencia proveniente de extracciones con solventes de polaridad creciente, (EUpO), se observó igual tendencia para los sulfatos (EUpOW1 y EUpOW2, 12.4 % y 6.3 %, respectivamente), aunque para los ácidos urónicos, la situación fue inversa, registrándose un incremento significativo a 70 °C en EUpOW2 (pasando de 11.1 % a temperatura ambiente, a 23,7 % en caliente). El mayor contenido de ácidos urónicos respecto al observado en el extracto realizado en caliente, podría atribuirse, al menos en parte, a la presencia de uronofucoidanos. En cuanto a monosacáridos constituyentes, en ambas secuencias se observó una disminución de manosa, de 31.5 % a 15.1 % en la secuencia UpO, y de 48.7 % a 12.7 % en EUpO, mientras que la galactosa aumentó en ambos casos, de 20.1 % a 25.2 %, y de 18.0 % a 28.3 %, respectivamente. La fucosa se mantuvo prácticamente estable para los extractos UpO (36.7 % y 34.5 %), mientras que para los EUpO aumentó de manera apreciable al pasar a 70 °C (29.3 % a 41.7 %). Este patrón puede interpretarse en función de la heterogeneidad estructural observada para los fucoidanos de *U. pinnatifida*, en donde resulta característica la presencia de galactofucanos sulfatados, a diferencia de *Fucus vesiculosus*, que se compone principalmente de fucosa sulfatada. Se ha demostrado que la composición de los fucoidanos suele fluctuar a lo largo del ciclo de vida del alga, encontrándose en especímenes jóvenes un contenido excepcionalmente alto de manosa, clasificando a este

polisacárido en esta etapa como manogalactofucano. Estudios sobre variaciones mensuales de fucoidanos de *U. pinnatifida* colectada en otras regiones, las explican en función de la etapa de maduración del alga y/o de la parte del alga investigada. En Bahía de Pedro el Grande (Rusia), demostraron que el contenido de manosa disminuyó al madurar el alga, mientras que el de galactosa aumentó (Skriptsova *et al.*, 2010). Por otro lado, Park *et al.* (2024) atribuyeron la variación en el contenido de manosa a la parte del alga que se analice, siendo valores máximos en estípite (17.4 %), seguida de esporofilo (10.3 %) y fronda (9.4 %). Nuestros resultados resultan esperables dada la estación anual en la cual se estudian estos metabolitos, esto es en otoño, período en que el alga se encuentra en maduración.

Por otra parte, para este grupo químico particular, el grado de sulfatación es interesante ya que se ha demostrado una clara relación estructura-actividad, en donde el mayor contenido de grupos sulfatos generalmente incrementa los efectos inmunomoduladores del compuesto (Arokiarajan *et al.*, 2022). En el presente trabajo, las fracciones acuosas obtenidas a temperatura ambiente son las de mayor contenido de sulfatos, lo que las posiciona como las de mayor potencial bioactivo. Además, esta secuencia exhaustiva utilizando agua a temperatura ambiente y luego a 70 °C, tiene la ventaja de recuperar la mayor cantidad de compuesto posible, generando un marco final con un alginato mucho más purificado.

Finalmente, el alginato de sodio obtenido a partir de la secuencia UpO, como producto final de la cascada de extracción con solventes verdes, presentó características químicas comparables con el alginato comercial utilizado como

referencia (Tabla 4). El alginato es un polisacárido estructural de la pared celular de las Phaeophyta, constituido por residuos de ácidos β -D-manurónico (M) y α -L-gulurónico (G), agrupados en secuencias homopoliméricas (bloques MM, GG) y heteropoliméricas (bloque MG), coexistiendo y mostrando amplias variaciones en las propiedades, dependiendo del origen del polisacárido. En nuestro caso, se obtuvo un alginato (AlgUpO) con un rendimiento del 28.1 %, con una pureza importante. El contenido de hidratos de carbono, 35.1 %, resultó similar al del producto comercial Sigma® (35.2 %). Por otra parte, en cuanto a sustancias acompañantes, el contenido de sulfatos fue menor en AlgUpO que en el comercial (1.74 % y 4.31 % respectivamente), evidenciando la eficiencia de la metodología diseñada, así como la potencialidad del alga como fuente sustentable de este polisacárido. Estos resultados resultaron comparables a los encontrados por Koo (2020), quien evaluó el contenido de sulfatos en estípite, esporofilo y grampón de la especie, con resultados semejantes (1.75 %, 1.94 % y 2.09 %, respectivamente). En cuanto al contenido de fenoles, nuestro producto presentó un valor menor al encontrado en el comercial, lo que sugiere que la secuencia de extracción realizada es selectiva para estos compuestos, logrando retenerlos en los extractos alcohólicos iniciales. Cabe destacar que, a nivel industrial, uno de los solventes empleados para extraer a estos metabolitos es el formaldehído (Bojorge *et al.*, 2023), siendo un solvente peligroso para la salud y con gran impacto negativo en el medio ambiente.

En las condiciones de trabajo diseñadas en nuestro estudio, el alginato purificado presentó un predominio de bloques de tipo GG (53 %), con bloques MG (44 %) y

menor cantidad de bloques MM (3%), indicando una marcada contribución de residuos gularónicos (Tabla 4). Diversos autores han señalado que las metodologías extractivas suaves favorecen la preservación y recuperación de fracciones enriquecidas en regiones GG. Esta riqueza en GG, sugiere la obtención de un alginato con propiedades reológicas y gelificantes interesantes para la aplicación en salud, asociadas a la elevada interacción con cationes divalentes como el calcio, que permite la formación de estructuras de tipo “egg-box”.

5. Conclusiones

En este trabajo se desarrolló un esquema de extracción secuencial exhaustivo para el aprovechamiento integral de la biomasa del alga parda alóctona *U. pinnatifida*, colectada en la región central del Golfo San Jorge, Patagonia Argentina. La secuencia emplea solventes verdes (etanol 80 % y agua) que generan un menor impacto en el medio ambiente.

Los resultados demuestran la eficacia y selectividad del protocolo propuesto, posibilitando la obtención de extractos enriquecidos en hidratos de carbono. El tratamiento inicial con la mezcla hidroalcohólica permitió recuperar manitol, alcanzando una pureza de 95.5 % con la ventaja de una cristalización espontánea durante el secado. Los extractos acuosos posteriores posibilitaron el fraccionamiento de fucooidanos, donde el agua a temperatura ambiente favoreció la recuperación de polisacáridos con mayor grado de sulfatación. Finalmente, a partir del residuo remanente, se aisló y purificó alginato de sodio con un buen rendimiento y de características químicas similares al alginato comercial. Estos metabolitos son propios de las algas pardas y escasamente

explorados aún en la región, con características óptimas para su aplicación en diferentes industrias relacionadas con la salud y la alimentación, entre otras.

Este trabajo reúne los primeros resultados referidos a esta temática, sobre el alga que habita en la región central del Golfo San Jorge, Patagonia Argentina. En su conjunto representa una contribución importante al conocimiento de la especie que habita en la región, a la vez que la posiciona para un aprovechamiento eco sustentable y una oportunidad regional de valorización del recurso. Los estudios continúan a fin de profundizar en la estructura química y aplicación de los hidratos de carbono de *U. pinnatifida*.

6. Agradecimientos

Se cuenta con subsidios de ANPCYT, Argentina (PICT 2019 – 03865), PME 15-0362, y UNPSJB (Proyectos de Investigación 1683, 1696, 1848; Programas 2024-25-26). MSN es becaria doctoral del CONICET-Argentina. Los autores agradecen a la Dra. Nora M. Andrea Ponce y al Dr. Carlos A. Stortz (FCEN, CIHIDECAR-UBA-CONICET) por el asesoramiento con relación a polisacáridos. El grupo de investigación integra la Conferencia Iberoamericana de Facultades de Farmacia – COIFFA y la Red Iberoamericana de Investigación, Innovación y Desarrollo de Medicamentos de la COIFFA (RIIDEME) AUIP.

Open Access: This article is distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0) which permits any use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author(s) and the source are credited.

7. Referencias

- Alvarez, M.V., Boraso, A. 2020. Development morphology of *Undaria pinnatifida* sporophytes (Phaeophyceae, Alariaceae) in Caleta Cordova (Chubut, Argentina). *MAFIS*. 33(1): 77–94. <https://doi.org/10.47193/mafis.3312020061805>
- Arokiaarajan, M.S., Thirunavukkarasu, R., Joseph, J., Ekaterina, O., Aruni, W. 2022. Advance research in biomedical applications on marine sulfated polysaccharide. *Int. J. Biol. Macromol.* 194: 870–881. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.11.142>
- Becerra, M.B. 2016. Obtención de productos de importancia farmacéutica biosintetizados por especies de algas pardas de las costas del Golfo San Jorge. Tesis Doctoral en Farmacia. Facultad de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco. Comodoro Rivadavia, Chubut, Argentina. 204 p.
- Bojorge, H., López-Rubio, A., Martínez-Abad, A., Fabra, M.J. 2023. Overview of alginate extraction processes: Impact on alginate molecular structure and techno-functional properties. *Trends Food Sci. Technol.* 140. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.104142>
- Casas, G., Piriz, M.L. 1996. Surveys of *Undaria pinnatifida* (Laminariales, Phaeophyta) in Golfo Nuevo, Argentina. *Hydrobiologia*. 326/327: 213–215.
- Chandía, N., Matsuhira, B., Vásquez, A. 2001. Alginic acids in *Lessonia trabeculata*: characterization by formic acid hydrolysis and FT-IR spectroscopy. *Carbohydr. Polym.* 46: 81–87. [https://doi.org/10.1016/S0144-8617\(00\)00286-1](https://doi.org/10.1016/S0144-8617(00)00286-1)
- Dodgson, K.S., Price, R.G. 1962. A note on the determination of ester sulphate content of sulphated polysaccharides. *Biochem. J.* 84(1):106–110. <https://doi.org/10.1042/bj0840106>
- Dubois, M., Gilles, K.A., Hamilton, J.K., Rebers, P.A., Smith, F. 1956. Colorimetric Method for Determination of Sugars and Related Substances. *Anal. Chem.* 28(3): 350–356. <https://doi.org/10.1021/ac60111a017>
- Epstein, G., Smale, D.A. 2017. *Undaria pinnatifida*: A case study to highlight challenges in marine invasion ecology and management. *Ecol. Evol.* 7(20): 8624–8642. <https://doi.org/10.1002/ece3.3430>
- Escobar Daza, M.D. 2018. Búsqueda de metabolitos bioactivos con aplicación farmacéutica en *Undaria pinnatifida* (Alariaceae), un alga invasora de las costas patagónicas argentinas. Tesis Doctoral en Farmacia. Facultad de Ciencias Naturales y Ciencias de la Salud, Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco.

- Comodoro Rivadavia, Chubut, Argentina. 353 p. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2023.103330>
- Filisetti-Cozzi, T.M.C.C., Carpita, N.C. 1991. Measurement of Uronic Acids without Interference from Neutral Sugars. *Anal. Biochem.* 197(1): 157-162. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(91\)90372-z](https://doi.org/10.1016/0003-2697(91)90372-z)
- Flores, M.L., Córdoba, O.L. 2018. Biodiversidad algal de las costas patagónicas argentinas: estudio integral químico - biofarmacológicos destinado a revalorizar los recursos a través de un potencial aprovechamiento industrial. BB-34 PNUD ARG 02/018, 2005-2008.
- Groissillier, A., Shao, Z., Michel, G., Goulitquer, S., Bonin, P., Krahulec, S., Nidetzky, B., Duan, D., Boyen, C., Tonon, T. 2014. Mannitol metabolism in brown algae involves a new phosphatase family. *J. Exp. Bot.* 65(2): 559-570. <https://doi.org/10.1093/jxb/ert405>
- Hosseini, S.V., Dastgerdi, H.E., Tahergorabi, R. 2024. Marine Mannitol: Extraction, Structures, Properties, and Applications. *Processes.* 12(8). <https://doi.org/10.3390/pr12081613>
- Kim, S.Y., Roy, V.C., Park, J.S., Chun, B.S. 2024. Extraction and characterization of bioactive compounds from brown seaweed (*Undaria pinnatifida*) sporophyll using two sequential green extraction techniques. *Algal Res.* 77.
- Koo, J. 2020. Chemical composition and rheological properties of polysaccharides isolated from different parts of brown seaweed *Undaria pinnatifida*. *Korean J. Fish Aquat. Sci.* 53(5): 665-671. <https://doi.org/10.5657/KFAS.2020.0665>
- Kothale, D., Verma, U., Dewangan, N., Jana, P., Jain, A., Jain, D. 2020. Alginate as Promising Natural Polymer for Pharmaceutical, Food, and Biomedical Applications. *Curr. Drug Deliv.* 17(9): 755-775. <https://doi.org/10.2174/1567201817666200810110226>
- Lawrence, J., Oliva, A., Murphy, J.D., Lens, P.N.L. 2023. Macroalgae biorefinery and its role in achieving a circular economy. *Algal Systems for Resource Recovery from Waste and Wastewater* 53-74. https://doi.org/10.2166/9781789063547_0053
- Lee, H.H., Kim, J.S., Jeong, J.H., Park, S.M., Sathasivam, R., Lee, S.Y., Kim, C.S. 2022. Effect of Different Solvents on the Extraction of Compounds from Different Parts of *Undaria pinnatifida* (Harvey) Suringar. *J. Mar. Sci. Eng.* 10(9). <https://doi.org/10.3390/jmse10091193>
- Li, Y., Zheng, Y., Zhang, Y., Yang, Y., Wang, P., Imre, B., Wong, A.C.Y., Hsieh, Y.S.Y., Wang, D. 2021. Brown algae carbohydrates: Structures, pharmaceutical

- properties, and research challenges. *J. Mar. Sci. Eng.* 10(9): 1193.
<https://doi.org/10.3390/md19110620>
- Machado, H., Machado, J.P., Alves, C., Soares, C., Grosso, C., Rodrigues, J.M., Criado, M.B. 2025. Exploring the Pharmacological Landscape of *Undaria pinnatifida*: Insights into Neuroprotective Actions and Bioactive Constituents. *Nutraceuticals*. 5(3): 20.
<https://doi.org/10.3390/nutraceuticals5030020>
- Matos, M., Custódio, L., Reis, C.P. 2024. Marine Invasive Algae's Bioactive Ingredients as a Sustainable Pathway in Cosmetics: The Azores Islands as a Case Study. *Mar. Drugs*. 22(12): 575.
<https://doi.org/10.3390/md22120575>
- Menezes, V.P.P., Silva Filho, A.M. da, Costa, A.J., Nascimento, E., Pinheiro, U.S., Chaves, R.P., Andrade, A.L., Vasconcelos, M.A. de, Teixeira, E.H., Sampaio, A.H., Nagano, C.S., Carneiro, R.F. 2025. Bioprospecting of Marine Organisms: Exploring Antibacterial Activities in Aqueous and Organic Extracts. *Microorganisms*. 13(4): 940.
<https://doi.org/10.3390/microorganisms13040940>
- Park, J.S., Han, J.M., Park, S.W., Kim, J.W., Choi, M.S., Lee, S.M., Haq, M., Zhang, W., Chun, B.S. 2024. Subcritical Water Extraction of *Undaria pinnatifida*: Comparative Study of the Chemical Properties and Biological Activities across Different Parts. *Mar. Drugs*. 22(8): 344.
<https://doi.org/10.3390/md22080344>
- Park, J.T., Johnson, M.J. 1949. A submicrodetermination of glucose. *J. Biol. Chem.* 181(1): 149–151.
[https://doi.org/10.1016/S0021-9258\(18\)56635-7](https://doi.org/10.1016/S0021-9258(18)56635-7)
- Percival, E., Young, M. 1974. Carbohydrates of the brown seaweeds Part III. *Desmarestia aculeata*. *Carbohydr. Res.* 32(2): 195-201.
[https://doi.org/10.1016/S0008-6215\(00\)82097-2](https://doi.org/10.1016/S0008-6215(00)82097-2)
- Ponce, N.M.A., Pujol, C.A., Damonte, E.B., Flores, M.L., Stortz, C.A. 2003. Fucoidans from the brown seaweed *Adenocystis utricularis*: extraction methods, antiviral activity and structural studies. *Carbohydr. Res.* 338(2): 153-165.
[https://doi.org/10.1016/S0008-6215\(02\)00403-2](https://doi.org/10.1016/S0008-6215(02)00403-2)
- Premarathna, A.D., Tuvikene, R., Somasiri, M., De Silva, M., Adhikari, R., Ranahewa, T., Wijesundara, R., Wijesekera, S., Dissanayake, I., Wangchuk, P., Rjabovs, V., Jayasooriya, A. P., Rajapakse, R. 2023. A novel therapeutic effect of mannitol-rich extract from the brown seaweed *Sargassum ilicifolium* using in vitro and in vivo models. *BMC Complement. Med. Ther.* 23(1): 26.
<https://doi.org/10.1186/s12906-023-03840-0>

- Quezada, D.P., Flores, M.L., Córdoba, O.L. 2023. Seasonal Chemical Screening and Biological Activity of *Undaria pinnatifida* (Harvey) Suringar (Alariaceae, Laminariales, Phaeophyta), collected at Golfo San Jorge (Patagonia Argentina). *J. Appl. Phycol.* 35: 2413-2429. <https://doi.org/10.1007/s10811-023-03058-0>
- Schiener, P., Black, K.D., Stanley, M.S., Green, D.H. 2015. The seasonal variation in the chemical composition of the kelp species *Laminaria digitata*, *Laminaria hyperborea*, *Saccharina latissima* and *Alaria esculenta*. *J. Appl. Phycol.* 27(1): 363-373. <https://doi.org/10.1007/s10811-014-0327-1>
- Seymour, F.R. 1979. Identification of aldoses by use of their peracetylated aldonitrile derivatives: A G.L.C-M.S. approach. *Carbohydr. Res.* 73(1): 19-45. [https://doi.org/10.1016/S0008-6215\(00\)85472-5](https://doi.org/10.1016/S0008-6215(00)85472-5)
- Shan, T.F., Pang, S.J., Li, J., Li, X. 2015. De novo transcriptome analysis of the gametophyte of *Undaria pinnatifida* (Phaeophyceae). *J. Appl. Phycol.* 27(2): 1011-1019. <https://doi.org/10.1007/s10811-014-0393-4>
- Shea, E.M., Carpita, N.C. 1988. Separation of Partially Methylated Alditol Acetates on SP-2330 and HP-1 Vitreous Silica Capillary Columns. *J. Chromatogr.* 445: 426-428. [https://doi.org/10.1016/S0021-9673\(01\)84556-8](https://doi.org/10.1016/S0021-9673(01)84556-8)
- Skriptsova, A.V., Shevchenko, N.M., Zvyagintseva, T.N., Imbs, T.I. 2010. Monthly changes in the content and monosaccharide composition of fucoidan from *Undaria pinnatifida* (Laminariales, Phaeophyta). *J. Appl. Phycol.* 22(1): 79-86. <https://doi.org/10.1007/s10811-009-9438-5>
- Zhang, H., Cheng, J., Ao, Q. 2021. Preparation of Alginate-Based Biomaterials and Their Applications in Biomedicine. *Mar. Drugs.* 19(5): 264. <https://doi.org/10.3390/md19050264>
- Zhang, R., Yuen, A.K.L., de Nys, R., Masters, A.F., Maschmeyer, T. 2020. Step by step extraction of bio-actives from the brown seaweeds, *Carpophyllum flexuosum*, *Carpophyllum plumosum*, *Ecklonia radiata* and *Undaria pinnatifida*. *Algal Res.* 52. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2020.102092>