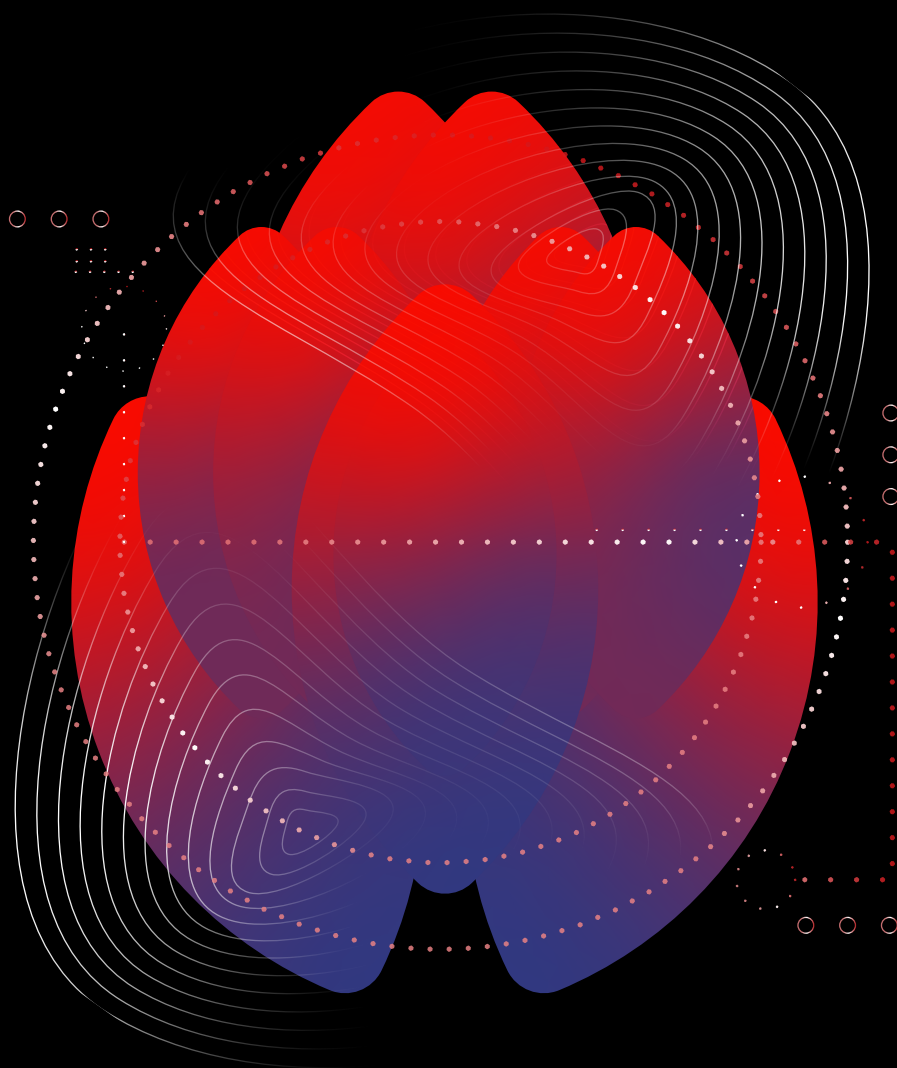




EQUIPO EDITORIAL

DIRECCIÓN

Dr. Jorge Silveira

Laboratorio Tecnológico del Uruguay (LATU), Uruguay

CONSEJO EDITORIAL

Dra. Sofía Barrios

Universidad de la República (UdelaR), Facultad de Ingeniería,
Instituto de Ingeniería Química, Uruguay

MBA. Ing. Mariela De Giuda

Gerente de Tecnología y Gestión, Laboratorio Tecnológico
del Uruguay (LATU), Uruguay

Dr. Andrés Dieste

Universidad de la República (UdelaR), Facultad de
Ingeniería, Instituto de Ingeniería Química, Uruguay

Dr. Gustavo Domínguez

Gerente de Latitud - Fundación LATU, Uruguay

Dra. Gabriela Eguren

Universidad de la República (UdelaR), Facultad de Ciencias,
Instituto de Ecología y Ciencias Ambientales, Uruguay

PhD. Federico Harte

Profesor adjunto de Food Science, Penn State University,
Estados Unidos

MSc. Rosa Márquez

Latitud - Fundación LATU, Uruguay

Dr. Eduardo Méndez

Universidad de la República (UdelaR), Facultad de Ciencias,
Instituto de Química Biológica, Uruguay

PhD. Laura Moya Silva

Universidad ORT Uruguay, Facultad de Arquitectura, Uruguay

Dr. Daniel Vázquez

INIA La Estanzuela, Plataforma de Agroalimentos, Uruguay

MSc. Daniel Volpe

Gerente de Análisis, Ensayo y Metrología, Laboratorio
Tecnológico del Uruguay (LATU), Uruguay

EDICIÓN

Carla Rizzotto

Edición técnica revista INNOTEC, Centro de Información Técnica,
Laboratorio Tecnológico del Uruguay (LATU), Uruguay

ADMINISTRACIÓN DE OJS Y GESTIÓN DE INFORMACIÓN

Lic. Lorena Fiori

Centro de Información Técnica. Laboratorio Tecnológico
del Uruguay (LATU), Uruguay

IMPLEMENTACIÓN, HOSTING Y SOPORTE DE OJS

Luis Ramírez Caldas,

Bibliolatio

DISEÑO Y ARMADO

Manosanta desarrollo editorial

<https://manosanta.com.uy/>

ACERCA DE INNOTECH

INNOTECH es una publicación arbitrada en modalidad doble ciego por un comité independiente de revisores externos a su entidad editora, el Laboratorio Tecnológico del Uruguay (LATU). Editada en Montevideo (Uruguay), bajo la modalidad de publicación continua, contiene artículos originales inéditos y su periodicidad es semestral (enero-junio y julio-diciembre).

El objetivo de la revista es la divulgación y transferencia del conocimiento en las áreas de Forestales, Medio Ambiente, Metrología y Tecnología Alimentaria. INNOTECH está dirigida a académicos, investigadores y técnicos de la comunidad científica uruguaya e internacional.

INNOTECH se encuentra indexada en las siguientes bases de datos: DOAJ, EBSCOhost Academica Premier, Latindex, Redalyc y REDIB.



Somos miembros de:

Asociación Uruguaya de Revistas Académicas AURA



La colección completa se puede consultar en línea en <http://ojs.latu.org.uy/index.php/INNOTECH/index>. Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional. Los conceptos y opiniones vertidas en los artículos aquí publicados, así como el uso que otros puedan hacer de ellos, son de responsabilidad exclusiva de los autores y no reflejan el punto de vista del Laboratorio Tecnológico del Uruguay.

INNOTECH - NÚMERO 29

Enero-junio de 2025

ISSN electrónico: 1688-6593

Título clave: INNOTECH (En línea)

Título clave abreviado: Innotec (En línea)

Centro de Información Técnica, LATU

Av. Italia 6201. Tel. (598) 2601 3724,

internos 1314 y 1350

innotec@latu.org.uy

<http://www.latu.org.uy>

<http://ojs.latu.org.uy>

SUMARIO

Artículos

- e681 Instrumental texture and sensory characteristics of freeze-dried starfruit snacks with added trehalose and sucrose**
Textura instrumental y características sensoriales de snacks de carambola liofilizada con adición de trehalosa y sacarosa
Mariela Guberman, Trinidad Soteras, Iván Méndez, Mara Virginia Galmarini
- e666 Propiedades fisicoquímicas de cerveza artesanal a partir de malta de cebada y malta de quinua con zarzamora deshidratada**
Physicochemical properties of craft beer from barley malt and quinoa malt with dehydrated blackberry
Ana Cristina de la Rosa Aguilar, Juan José Figueroa-González, Francisco Javier Cruz Guillén, Areli Leyva Maldonado, Martha Ávila Ontiveros
- e680 Caracterización botánica de drogas vegetales comercializadas en Uruguay**
Botanical characterization of herbal drugs marketed in Uruguay
Gastón Martínez Alfonso, Pilar Perna, Rossina Figliolo, Paula Rodríguez, Carmen Rossini
- e682 Inventario de cesio-137 y plomo-210 en suelos de referencia del centro-oeste de Uruguay: base para estudios de erosión y vigilancia radiológica**
Inventory of cesium-137 and lead-210 in reference soils from the center-west of Uruguay: baseline for erosion studies and radiological monitoring
Marcos Tassano, Pablo Cabral, Mirel Cabrera
- e676 Validación de una metodología para estimar el biovolumen de fitoplancton en un embalse subtropical**
Validation of a methodology to estimate the biovolume of phytoplankton in a subtropical reservoir
Mariana Vidal, Facundo Bordet, Soledad Andrade

Revisiones

- e679 Contaminación fecal en playas recreativas: revisión de normativas a nivel nacional, regional e internacional e insumos para la gestión en Uruguay**
Fecal contamination on recreational beaches: review of national, regional, and international regulations and inputs for management in Uruguay
Fernanda de León, Ángel Segura, Carla Kruk, Claudia Piccini

POLÍTICA EDITORIAL DEL LATU

La actividad editorial del Laboratorio Tecnológico del Uruguay (LATU) tiene como finalidad la difusión en la comunidad académica y profesional uruguaya de las investigaciones que apoyen el desarrollo de tecnologías y modelos de gestión que aporten valor a los procesos de innovación.

Misión

Nuestra misión es la publicación de trabajos originales, con un enfoque de rigor y calidad teórica y metodológica, que contribuyan a la producción sistemática de nuevo conocimiento científico tecnológico y al fortalecimiento de la presencia uruguaya en redes regionales e internacionales.

Es de interés del LATU consolidar el campo de la documentación científica a nivel local mediante la creación e innovación de productos editoriales.

Los objetivos específicos son:

- Promover la publicación de investigaciones de excelencia en las áreas de conocimiento estratégicas del LATU, alineadas a su misión como impulsor del desarrollo sustentable del país y su inserción internacional a través de la innovación.
- Posicionar a los autores, técnicos y colaboradores en las plataformas electrónicas internacionales, estimulando su participación en el marco de un proceso de edición arbitrado por especialistas.
- Contribuir al desarrollo y transferencia de tecnologías de innovación orientadas a la mejora de procesos industriales, empresariales y sociales.
- Aportar y divulgar conocimiento científico de calidad a los técnicos, académicos, investigadores y a la sociedad en su conjunto, tanto para la efectiva transmisión de las experiencias como para el crecimiento profesional.
- Facilitar el intercambio y la creación de nuevo conocimiento entre instituciones.

Invitamos a los autores interesados en publicar en INNOTECH a ingresar a nuestra página en la plataforma Open Journal Systems (<http://ojs.latu.org.uy>) o a contactarse con el Centro de Información Técnica del LATU a través del correo electrónico innotec@latu.org.uy para recibir instrucciones para el envío de artículos a nuestro proyecto editorial.

CÓDIGO ÉTICO DE INNOTECH

La revista INNOTECH adhiere a los principios publicados por COPE (Committee on Publication Ethics) en <https://publicationethics.org/resources/code-conduct> y promueve así la conducta ética de todos los participantes del proceso editorial: autores, revisores y equipo editorial.

Los autores se comprometen a:

- Enviar artículos originales, de su autoría y que no infrinjan derechos de propiedad intelectual y/o derecho de imagen y/o de datos personales de terceros, e inéditos, que no hayan sido presentados simultáneamente a otra publicación.
- Asegurar la veracidad de los datos presentados en su investigación.
- Asegurar la integridad de su investigación, evitando la publicación de resultados parciales.
- Consignar a los autores en base al nivel de responsabilidad intelectual que han tenido en la elaboración del artículo, en orden decreciente, sin que medien otros criterios jerárquicos.
- Designar un autor de correspondencia, que asume la responsabilidad de difundir entre todos los autores los avances y resultados del proceso editorial.
- Identificar debidamente las fuentes originales de los trabajos que cita en su artículo.
- Revisar los antecedentes de otras investigaciones del ámbito teórico inmediato de su trabajo para dar cuenta de la información más actualizada y relevante.
- Reconocer los apoyos académicos, financieros y logísticos que hicieron posible la investigación y/o la elaboración del artículo.

Los revisores se comprometen a:

- Declarar que no existe conflictos de interés para la evaluación de un artículo.
- Realizar su evaluación respondiendo a criterios objetivos y respetando su independencia académica.
- Asegurar la confidencialidad tanto del contenido del artículo como del resultado de su evaluación.
- Preservar el anonimato en todo el proceso, apelando al editor como intermediario de cualquier comunicación con los autores.
- Respetar los tiempos acordados con los editores de la revista para la realización de su trabajo.

El equipo editorial se compromete a:

- Asegurar la honestidad y transparencia de todo el proceso editorial, desde la presentación del artículo, evaluación por pares y publicación en las condiciones pautadas.
- Seleccionar los revisores idóneos para cada trabajo.
- Garantizar la independencia de criterio de los revisores en el ejercicio de su rol.
- Asegurar el anonimato de todas las partes involucradas en el proceso de arbitraje por pares.
- Mediar en posibles conflictos de interés con el apoyo del consejo editorial.
- Velar por el cumplimiento de los plazos acordados en cada fase del proceso.
- Difundir los números publicados en las redes académicas y bases bibliográficas de su entorno local y regional.
- Controlar el cumplimiento de los requisitos por parte de los autores y la actuación acorde de los árbitros.
- Identificar casos de incumplimiento de los compromisos éticos enumerados en este código y penalizar a sus responsables con sanciones que van de la suspensión del infractor en su rol en el proceso editorial a la difusión de una rectificación pública y la remoción del artículo.

INSTRUCCIONES A LOS AUTORES PARA PUBLICAR EN INNOTECH

Ámbito de los artículos y proceso de revisión

INNOTECH publica artículos originales inéditos en español e inglés. Los campos temáticos que aborda responden a las áreas estratégicas de investigación del LATU: Forestales, Medio Ambiente, Metrología y Tecnología Alimentaria.

Esta publicación semestral arbitrada por un comité de revisores externos recopila las investigaciones realizadas en el marco de distintos proyectos y procesos de transferencia de conocimiento para el desarrollo de sistemas innovadores, productivos y de investigación.

Las publicaciones editadas por el Centro de Información Técnica son gestionadas en Open Journal Systems, software para la gestión del proceso editorial, desarrollado, soportado y libremente distribuido por el Public Knowledge Project bajo licencia pública general GNU.

INNOTECH no cobra cargos de ningún tipo por el envío de originales ni por su procesamiento.

El tiempo estimado para los procesos de evaluación y publicación es de 18 semanas.

El proceso de envío de artículos para la revista incluye los siguientes pasos:

- (a) Ingreso por parte del autor del artículo completo en el sistema utilizado por el Centro de Información Técnica para la edición de sus publicaciones en la web: <http://ojs.latu.org.uy>.
- (b) Por medio del sistema se notifica al autor la recepción del artículo y su eventual publicación. En este paso se considera la originalidad del trabajo y se priorizan aquellos de áreas estratégicas y temáticas nacionales.
- (c) Una vez aprobado por el Consejo editorial de la revista, el artículo es enviado a proceso de arbitraje.
- (d) Se asignan los árbitros, independientes y externos, quienes evaluarán el desarrollo específico del manuscrito, tanto en sus aspectos temáticos como metodológicos.
- (e) Devuelto el informe de arbitraje, el editor se comunica con el/los autor/es en respuesta de los comentarios que hace el evaluador del artículo. En caso de ser necesario habrá otras rondas de evaluación.
- (f) Se edita el artículo aplicando en el texto las normas del Manual de estilo del LATU y se envía la última versión diseñada al/los autor/es para su aprobación final.

Para poder incluir artículos completos, se debe considerar que estos no tengan derechos de autor otorgados a terceros a la fecha de envío y que no se hayan presentado a otras publicaciones simultáneamente. Los artículos son publicados en OJS y se distribuyen bajo la modalidad de acceso abierto. Los derechos autorales son protegidos por Creative Commons (CC) Atribución-NoComercial 4.0 Unported. Al ingresar al sistema <https://ojs.latu.org.uy/inicio/> los autores deberán aceptar la nota de copyright en la que se asumen los términos de responsabilidad, se reconoce la licencia CC y se establece el compromiso a realizar la cita completa de la edición institucional de esta primera publicación del artículo en sus siguientes publicaciones –completas o parciales– efectuadas en cualquier otro medio de divulgación, impreso o electrónico.

Los autores están autorizados a realizar una publicación simultánea en sistemas de autoarchivo o repositorios institucionales.

Los conceptos y opiniones vertidos en los artículos publicados y el uso que otros puedan hacer de ellos son de responsabilidad de sus autores. Esta responsabilidad se asume con la sola publicación del artículo enviado. El LATU se reserva el derecho de publicar aquellos artículos que responden a las áreas estratégicas fijadas por la organización para cada edición y de realizar modificaciones que considere favorables a la óptima presentación de los contenidos en la revista.

PROCESO DE REVISIÓN

El arbitraje de esta revista se realiza por pares y bajo modalidad doble ciego, por lo que autores y árbitros permanecen anónimos a lo largo de todo el proceso. El arbitraje es el proceso de evaluación crítica especializada de un manuscrito por parte de pares idóneos que operan en el área temática que dicho texto desarrolla. Cada artículo es revisado por un mínimo de dos árbitros. Los comentarios y recomendaciones de los evaluadores son un insumo determinante para la aceptación o rechazo de un manuscrito en el proceso editorial de publicaciones técnicas del LATU; no obstante, el equipo editor es responsable de la decisión final de publicación o rechazo de un artículo y de la notificación al autor de contacto.

El comité técnico de arbitraje de INNOTECH es un cuerpo de especialistas técnicos seleccionados por su grado de especialización, prestigio académico y experiencia profesional y editorial. Nuestros árbitros cumplen la vital función de evaluar el desarrollo específico del contenido de las publicaciones, tanto en sus aspectos temáticos como metodológicos, guiados por un formulario de revisión que una vez completo es presentado a los autores del artículo.

Los autores cuentan con un plazo de siete días para la devolución del artículo corregido según las recomendaciones de los árbitros.

NORMAS DE PRESENTACIÓN Y ENVÍO DE LOS TEXTOS

Para que el artículo sea considerado para su publicación, debe cumplir con las siguientes normas de presentación. Ante cualquier consulta dirijase al correo electrónico de referencia innotec@latu.org.uy. Para el correcto envío de su artículo, siga las instrucciones que se indican en OJS. Recuerde completar todos los datos del artículo, entre ellos: título, autores, filiación, resumen y palabras clave. Nota: Los nombres completos de los autores deberán ser incluidos en los metadatos en la forma en la que se solicitan en OJS, pero omitidos en el documento Word del artículo, primera medida para asegurar la integridad de la revisión ciega.

DEFINICIONES:

Autor. Persona o colectividad responsable del contenido intelectual del documento.

Título. Refleja el contenido del texto con precisión, es neutro e informativo.

Resumen. Provee información específica. Sintetiza, anuncia y jerarquiza contenidos.

Introducción. Incluye antecedentes concretos y datos del proceso, enumeración de objetivos e importancia del tema.

Materiales y métodos. Relato de los métodos y procedimientos que permitieron obtener los resultados presentados. Obtención del material, condiciones y metodología. Análisis estadísticos, programas.

Resultados. Presentación y expresión de los hallazgos en tablas, gráficos y/o figuras.

Discusión y conclusiones. Síntesis de los avances y las contribuciones más relevantes de la investigación. En esta sección se discuten los resultados en el orden en el que fueron presentados. Asimismo, se define y diferencia claramente el aporte del trabajo con respecto al conocimiento previo. Si procede, se mencionan posibles líneas futuras de investigación y de aplicación de los resultados.

Agradecimientos. Breve agradecimiento a quienes colaboraron en la producción del artículo y/o que permitieron el desarrollo de la investigación.

Referencias. Referencias al material bibliográfico consultado para la elaboración del artículo.

LOS ARTÍCULOS DEBEN PRESENTAR:

Título del artículo en mayúsculas y minúsculas, en inglés, español y portugués.

Nombre completo de todos los autores (solo en metadatos de OJS), ingresados en orden decreciente según el grado de responsabilidad en el desarrollo del artículo, sin que medien jerarquías funcionales. Indicar la sección o departamento al que pertenecen y empresa de la que forman parte. Se debe señalar además el autor de contacto para las comunicaciones electrónicas subsiguientes. Los autores deberán contar con un número de registro en ORCID, que se consigna en OJS al ingresar los autores en metadatos. Para más información sobre ORCID y su relevancia para los autores puede consultar esta página: <https://orcid.org/>.

Resumen en inglés, español y portugués, de 200 palabras máximo en su versión castellana.

Palabras clave, en inglés, español y portugués, de dos a cinco, las cuales no deben repetir los términos ya utilizados en el título.

Texto de tres (3) a veinticinco (25) páginas de desarrollo (introducción, métodos, descripción de equipos, descripción de programas, desarrollo de teorías, resultados y discusión, conclusiones, referencias, tablas, figuras e imágenes, (ver sección Estilo y formato de citas y referencias en este documento). El texto deberá ser presentado en fuente Arial 11, a espacio doble y con numeración de líneas, con títulos en mayúsculas y minúsculas y en formato.doc, de cualquier versión de Microsoft Word. Evitar las notas al pie en el desarrollo del artículo. Las denominaciones en latín deben ir en cursiva.

Secciones. Los títulos de sección (que señalan Introducción, Materiales y Métodos, Discusión, etc.) deben ser escritos en mayúscula y minúsculas, estilo de fuente bold y centrados en el texto. Los subtítulos serán justificados a la izquierda, escritos en mayúscula y minúsculas, también en bold. Tanto la primera letra del título y la primera letra de los nombres propios deben ser escritas en mayúscula. Se debe dejar un espacio entre líneas antes y después de cada subtítulo.

Fórmulas, figuras, tablas e imágenes. Las figuras deben numerarse correlativamente en orden de aparición en el texto, y deben incluir un breve título explicativo en el margen inferior a las mismas. Si es necesario incluir fotos o imágenes, éstas se deben designar como figuras. Las fotos deben ser nítidas y enviadas en formato jpg (mínimo 300 px aseguran una buena calidad de impresión). Las tablas deben ser numeradas correlativamente y en forma independiente de las figuras, y cada entrada debe

ocupar su propia celda. Se deben numerar según el orden de aparición en el texto, incluyendo un título explicativo en la parte superior de la tabla. Evitar utilizar líneas verticales y en la medida de lo posible no incluir más de dos tablas por carilla, no dividir tablas en más de un folio o en forma perpendicular al texto. El texto presenta las tablas, no desarrolla su contenido, éstas deben explicarse en sí mismas. Además de estar insertadas en el artículo, cada figura y tabla debe ser remitida en su propio archivo como fichero complementario en OJS, con la referencia numérica correspondiente. Los números y símbolos empleados no deben ser menores al tamaño usado en el resto del texto (Arial 11).

ESTILO DE CITAS Y REFERENCIAS SEGÚN EL SISTEMA HARVARD

Si el texto está en inglés utilizar «and» en lugar de «y», «In:» en lugar de «En:», «[Accessed: day month year]» en lugar de «[Consulta: día mes año]» y «Available at:» en lugar de «Disponible en:»

Ejemplos usuales de citas

Registro de citas textuales

(López, 1985, p. 93)

(González y Rubio, 1990, pp. 110-111)

(Johnson et al., 1970, pp. 25-26)

Para más de una obra del mismo autor y año en citas textuales

(Alonso, 1988a, p. 126-128)

(Alonso, 1988b, p. 84)

Registro de cita ideológica o paráfrasis

Amor (2000) analiza los motivos para comenzar un negocio en línea...

Si el motivo para comenzar un negocio en línea es sólo para imitar a la competencia, se puede considerar que dicha razón no es la estrategia adecuada (Amor, 2000).

(Pérez y González, 2005)

(Rodríguez et al., 2011).

(Pérez, 2014a)

(Pérez, 2014b)

Ejemplos usuales de referencias monografías (libros)

Apellidos(s), Nombre o Inicial, año de edición. *Título del libro en cursiva*. N° de edición. Lugar de edición: editorial. (Serie; N°). ISBN (este último si se posee) DOI (siempre que el libro lo posea)

Bobbio, Norberto, 1958. *Autobiografía*. Madrid: Taurus. ISBN: 84-306-0267-4.

Newman, R. y Walter, C., 2008. *Barley for food and health: science, technology, and products*. Nueva York: John Wiley & Sons.

Revistas como un todo

Título de la publicación en cursiva. Responsabilidad. Edición. Identificación del fascículo. Lugar de edición: editorial, fecha del primer volumen-fecha del último volumen. ISSN

Boletín Económico. Banco de España. 1998, (1). Madrid: Banco de España, Servicio de Publicaciones, 1979. ISSN: 0210-3737

Artículos de revistas

Apellido(s), Nombre o Inicial, año. Título del artículo. En: *Título de la publicación seriada*, Volumen (Número), páginas. DOI (siempre que el artículo lo posea).

Llosa, J.; Smith, M.; Moore, A. y Cave, K., 1998. Modulo scheduling with reduced register pressure. En: *IEEE Transactions on computers*, 47(6), pp. 625-638. DOI: 10.1109/12.689643

Álvarez, Begoña; Ballina, F. Javier de la y Vázquez, Rodolfo, 2000. La reacción del consumidor ante las promociones. En: *MK Marketing + Ventas*, (143), pp. 33-37.

Normas

Entidad responsable de la norma (País de la entidad), año de publicación. *No. o código de la norma: Título*. Lugar de publicación: editorial abreviada.

Asociación Española de Normalización y Certificación (España), 2010. *UNE 166000 EX, UNE 166001 EX, UNE 166002 EX: Gestión de la I+D+I*. Madrid: AENOR.

Instituto Uruguayo de Normas Técnicas (Uruguay), 2000. *UNIT-ISO 9001: Sistemas de gestión de calidad - requisitos*. Montevideo: UNIT.

Textos electrónicos, bases de datos y programas informáticos

Responsabilidad principal, año. *Título* [tipo de soporte]. Edición. Lugar de publicación: editor, [fecha de consulta]. Descripción física. (Colección). Notas. Disponibilidad y acceso. Número normalizado. DOI (siempre que el material lo posea)

Rapp, A. O.; Augusta, U. y Peek, R. D., 2001. *Facts and ideas of testing wood durability above ground* [En línea]. Hamburgo: BFH. [Consulta: 25 de setiembre de 2008]. Disponible en: <http://www.bfafh.de/inst4/43/pdf/3doublay.pdf>

Patentes

Mención de responsabilidad principal, Año de publicación del documento. *Denominación del elemento patentado*. Identificador del documento (país u oficina que lo registra). Clase internacional de documento de patente. Número.

Green, Daniel R., 2008. *Cereal flake with topical pieces*. United State Patent. 0101. D572,427.

Crosa, M. J.; Harispe, R.; Repiso, L.; Silvera, C. y Wurtz, P, 2009. *Sistema que acelera el ingreso de solutos en alimentos porosos*. Uruguay. Dirección Nacional de la Propiedad Industrial. 31620.

Instrumental texture and sensory characteristics of freeze-dried starfruit snacks with added trehalose and sucrose

Textura instrumental y características sensoriales de snacks de carambola liofilizada con adición de trehalosa y sacarosa

Textura instrumental e características sensoriais de snacks de carambola liofilizada com adição de trealose e sacarose

 **MARIELA GUBERMAN** (1,2)

 **TRINIDAD SOTERAS** (1,3)

 **IVÁN MÉNDEZ** (4,5)

 **MARA VIRGINIA GALMARINI** (2,6)

- (1) Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Centro de Investigación de Agroindustria (CIA), Instituto Tecnología de Alimentos (ITA), Buenos Aires, Argentina.
- (2) Consejo Nacional de Investigación Científica y Tecnológica (CONICET), Buenos Aires, Argentina.
- (3) Instituto de Ciencia y Tecnología de Sistemas Alimentarios Sustentables (UEDD INTA CONICET), Buenos Aires, Argentina.
- (4) Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Ciudad de México, México.
- (5) MBSense, Ciudad de México, México.
- (6) Laboratorio de Neurociencia, Centro de Inteligencia Artificial y Neurociencia (CIAN), Escuela de Negocios, Universidad Torcuato Di Tella, Buenos Aires, Argentina.

RECIBIDO: 7/4/2025 → APROBADO: 23/5/2025  guberman.mariela@inta.gob.ar

ABSTRACT

This study assessed the impact of sucrose and trehalose as osmotic agents on the quality of freeze-dried starfruit snacks, with particular emphasis on sensory and textural attributes. Starfruit slices were subjected to three pre-treatments before freeze-drying: a control (no dehydration agent), osmotic dehydration in a sucrose solution (ODSAC), and osmotic dehydration in a trehalose solution (ODTRE). The resulting dehydrated samples were analyzed for water activity (a_w), instrumental color and texture, and sensory attributes, including consumer acceptability. Both osmotic treatments significantly altered the instrumental texture of the starfruit slices compared to the control. Sensory analysis revealed significant differences in appearance, texture, flavor, and odor among treatments, with the ODTRE treatment receiving the highest acceptability scores. These

findings suggest that using trehalose as an osmotic agent enhances the quality attributes of the dehydrated starfruit slices, supporting their potential as a fruit snack option.

Keywords: carambola, pre-treatment sugars, acceptability, instrumental hardness, flash profile.

RESUMEN

Este estudio evaluó el impacto del uso de sacarosa y trehalosa como agentes osmóticos en la calidad de un snack de carambola liofilizada, con especial enfoque en los atributos sensoriales y texturales. Las rodajas de carambola fueron sometidas a tres tratamientos previos antes de la liofilización: control (sin agente de deshidratación), deshidratación osmótica en una solución de sacarosa (ODSAC) y deshidratación osmótica en una solución de trehalosa (ODTRE). Las muestras deshidratadas finales se analizaron en cuanto a actividad de agua (a_w), color instrumental, textura instrumental y análisis sensorial, incluyendo la aceptabilidad por parte de los consumidores. Ambos tratamientos osmóticos modificaron la textura instrumental de las rodajas de carambola en comparación con el control. El análisis sensorial reveló diferencias significativas en apariencia, textura, sabor y olor entre las muestras, siendo el tratamiento con trehalosa (ODTRE) el que obtuvo las mayores puntuaciones de aceptabilidad. En conjunto, el uso de trehalosa como agente osmótico mejoró los atributos de calidad de las rodajas de carambola deshidratadas, destacándolas como una opción potencial de snack de fruta.

Palabras clave: carambola, tratamiento previo con azúcares, aceptabilidad, dureza instrumental, perfil flash.

RESUMO

Este estudo avaliou o impacto da sacarose e da trealose como agentes osmóticos na qualidade de um snack de carambola liofilizada, com foco especial em atributos sensoriais e texturais. As fatias de carambola foram submetidas a três pré-tratamentos antes da liofilização: controle (sem agente de desidratação), desidratação osmótica em solução de sacarose (ODSAC) e desidratação osmótica em solução de trealose (ODTRE). As amostras desidratadas finais foram analisadas quanto à atividade de água (a_w), cor instrumental, textura instrumental e análise sensorial, incluindo a aceitabilidade pelos consumidores. Ambos tratamentos osmóticos alteraram a textura instrumental das fatias de carambola em comparação com o controle. A análise sensorial revelou diferenças significativas na aparência, textura, sabor e odor entre as amostras, sendo o tratamento com trealose (ODTRE) o que recebeu as maiores pontuações de aceitabilidade. De modo geral, o uso da trealose como agente osmótico melhorou os atributos de qualidade das fatias de carambola desidratadas, destacando seu potencial como opção de lanche de fruta.

Palavras-chave: carambola, pré-tratamento com açúcares, aceitabilidade, dureza instrumental, perfil flash.

INTRODUCTION

Fruit is an essential component of a healthy and balanced diet, providing vitamins, minerals, and antioxidants that promote optimal health and reduce the risk of disease. The World Health Organization recommends consuming two to three servings of fruit per day as part of a healthy diet (Nishida et al., 2004). However, fruit consumption varies significantly by country and region. For example, in Argentina, according to the 2018 National Survey of Risk Factors (ENFR), only 6% of the population met the recommended requirements, suggesting that new strategies are needed to increase the consumption of fruits and vegetables (Argentina. Ministerio de Salud y Desarrollo Social, 2018).

Starfruit (*Averrhoa carambola* L.) is a tropical fruit with a characteristic star-shaped cross-section and a sour-to-sweet taste. It is a rich source of antioxidants, vitamin C, potassium, phosphorus, magnesium and dietary fiber, and is low in carbohydrates and calories (Shofian et al., 2011; Sharma and Shantaram, 2013; Ramadan et al., 2020). Due to its unique shape and taste, starfruit has gained popularity both as a fresh fruit and as the main ingredient in processed products such as jams, juices (Mamede and Benassi, 2016), and candies.

Dehydrated fruits, in particular, offer a means of developing healthy and convenient snack products (De Vlieger et al., 2017; Schlinkert et al., 2020; Sadler et al., 2019). Dehydration preserves fruit by reducing its water content, thereby inhibiting microbial growth, extending shelf life, and offering a convenient option for storage and consumption (Prosapio and Norton, 2017). Osmotic dehydration (OD), for example, is a technique used to lower the water activity (a_w) of foods—primarily fruits—by immersing them in a concentrated sugar solution (Ciurzyńska et al., 2016). OD is commonly employed as a pre-treatment to improve the quality of fruits that will undergo more energy-intensive drying methods such as air-drying or freeze-drying (Alvarez et al., 1995; Nieto et al., 1998; Iglesias et al., 2017; Sette et al., 2016).

Sucrose is commonly used in OD of fruits because of its sensory acceptability and wide availability. However, sucrose solutions can cause quality defects such as non-enzymatic browning and sucrose crystallization owing to its relatively low glass transition temperature (T_g), which compromises structural stability. Alternative sugars, like trehalose, have been proposed to overcome these disadvantages (Iglesias et al., 2017).

Trehalose is a non-reducing disaccharide known for its cryoprotective, thermoprotective, and stabilizing effects on biological systems (Roser, 1991). With a sweetness level of only 45% that of sucrose (Birch et al., 1970; Galmarini et al., 2009), trehalose is particularly well-suited for fruit preservation without significantly increasing perceived sweetness (Galmarini et al., 2009). It has been employed as an osmotic agent in the dehydration of various fruits and vegetables, such as bananas, carrots, potatoes, and mangoes (Aktas et al., 2007; Iglesias et al., 2017; Tan et al., 2020). However, limited information exists regarding its use in the osmotic dehydration of starfruit slices.

As proposed by Castagnini et al. (2022), trehalose may enhance the crispness of dehydrated fruits by promoting greater water removal during drying, which leads to a more compact structure due to shrinkage. Furthermore, the collapse of cells and pores, along with alterations in the carbohydrate matrix, contribute to the improved crispness of the final product.

Sensory and instrumental analyses are useful tools to evaluate the effects of osmotic agents on texture and flavor. Flash Profile, a rapid descriptive method (Dairou and Sieffermann, 2002), allows panelists to freely generate their own vocabulary. This method has been successfully applied to characterize dehydrated fruits and vegetables, quickly offering valuable insights into consumer-relevant attributes (Tarea et al., 2007; Dueik et al., 2013; Bredie et al., 2017; Pérez-González et al., 2023) while avoiding lengthy training sessions.

The aim of this study was to determine the sensory and physicochemical characteristics of freeze-dried starfruit snacks subjected to osmotic pre-treatments using sucrose or trehalose.

MATERIALS AND METHODS

Sample preparation

Fresh starfruits were purchased from a local grocery store in Buenos Aires, Argentina. The fruits were sanitized in a 0.15% sodium hypochlorite solution for 15 minutes, then sliced crosswise into star-shaped pieces approximately 5 mm thick. Seeds were manually removed, and the slices were immersed for 20 minutes in an anti-browning acidic solution containing 0.5% citric acid and 0.5% ascorbic acid (both supplied by Biopack, Argentina).

After acidification, the slices were divided into three treatment groups:

- **Control:** slices were frozen at -40°C and then freeze-dried in a laboratory freeze-dryer (RIFICOR L-A-B4-C, Argentina) for 48 hours (freezing plate at -35°C , vacuum $< 100\ \mu\text{mHg}$).
- **ODSAC (osmotic dehydration in sucrose):** slices were immersed in a 40% w/w sucrose solution (food-grade; purchased locally) for 2 hours at 25°C , then frozen at -40°C and freeze-dried following the same procedure as the control.
- **ODTRE (osmotic dehydration in trehalose):** slices were immersed in a 40% w/w trehalose dihydrate solution (TrehalTM) for 2 hours at 25°C , then frozen at -40°C and freeze-dried following the same procedure as the control.

All dehydrated fruit pieces were packed in polyamide-polyethylene pouches, heat-sealed, and stored at -18°C until analysis.



FIGURE 1. Example of starfruit snack (after dehydration).

In this study, a moderate sugar concentration (40% solutions) was intentionally selected for two main reasons. First, health-conscious consumers are increasingly cautious about products with high added sugar content. Second, trehalose has a lower water solubility than sucrose (68.9 g/100 g H₂O at 20 °C) (Galmarini et al., 2008), which limits the maximum practicable concentration for the trehalose solution.

Water activity

Water activity (a_w) of the starfruit snacks was measured at 23–24 °C using a dew-point hygrometer (Aqualab Series 3B, Decagon Devices, Pullman, WA, USA). The instrument was calibrated and verified using standard unsaturated NaCl solutions covering the a_w range of interest (Chirife and Resnik, 1984). For each treatment batch, a_w measurements were performed in triplicate, and results were reported as the mean $\pm$ standard deviation.

Instrumental color

Color of the dehydrated starfruit snacks was measured with a chroma meter (Minolta CR-400, Konica Minolta, Japan) using the CIE Lab* color scale (L^* = lightness; a^* = redness/greenness; b^* = yellowness/blueness). The instrument was set to D65 illuminant and a 2° observer angle and calibrated against a white standard tile. Each sample's color was measured six times at different locations.

Instrumental texture

The instrumental texture of the dried starfruit slices was measured using a Texture Analyzer (TA.XT.Plus, Stable Micro Systems, 2018) equipped with a 5-kg load cell. Each dried slice was punctured at the center with a rounded-end spherical probe (P/0.5 S) using a Crisp Fracture Support Rig. Test parameters were as follows: pre-test speed of 1.0 mm/s, test speed of 0.7 mm/s, post-test speed of 10.0 mm/s, trigger force of 0.049 N, and puncture distance of 11 mm.

Data were processed using Texture Expert EXCEED software (Stable Micro Systems, 2018). Ten replicate measurements were recorded for each treatment.

Descriptive sensory evaluation

Descriptive sensory evaluation using the Flash Profile method was carried out by 14 trained panelists (all female, aged 27–52) from the staff of the *Instituto de Tecnología de Alimentos* (Buenos Aires). Panelists were preselected based on regular fruit consumption, availability, and prior experience in sensory analysis. All participants provided informed consent. Evaluation sessions were conducted in individual sensory booths under standardized white lighting (6,000 K).

Flash Profile evaluation of the three snack treatments was conducted over three sessions, each lasting approximately 40 minutes. During the first two sessions, panelists received all three samples and individually generated descriptive terms they considered most relevant for

distinguishing between the products. Each panelist was instructed to generate at least eight descriptors covering appearance, texture, flavor (aroma and taste), and odor.

In the third session, all three treatments were presented simultaneously, and panelists ranked the samples for each descriptor, one descriptor at a time, based on perceived intensity. Panelists were allowed to re-taste the samples and take as much time as needed for each ranking (Bredie et al., 2017). A continuous linear scale was used to allow assessors to indicate the relative distance between samples in terms of intensity differences for each attribute.

On average, panelists generated approximately 10 descriptors each. Following a consolidation step involving lemmatization by the panel leader and assistant, a final set of descriptors was agreed upon and grouped into four sensory categories: appearance (4 descriptors), texture (6), flavor/taste (7), and odor (1).

Samples were served on plastic plates labeled with random three-digit codes, following a balanced block design. Presentation order was randomized across panelists and sessions. Water was provided for palate cleansing between samples.

Hedonic assessment

A consumer acceptability test was conducted at the Sensory Analysis Laboratory of Universidad Católica Argentina (Buenos Aires) in individual booths under white lighting. Seventy-five untrained consumers (25 male, 50 female, aged 17–58) were recruited via email. All reported consuming fruits or snacks at least four times per week. Informed consent was obtained, and participants recorded their responses anonymously using their smartphones.

Each consumer evaluated the three treatments monadically in a single session. Samples were served on plastic plates labeled with random three-digit codes, and presentation order was randomized across consumers. Water was provided for palate cleansing.

Consumers tasted each sample and rated overall liking using a 9-point hedonic scale (1 = Extremely Dislike, 9 = Extremely Like; 5 = Neither like nor dislike). After tasting, they completed a short survey in which they were shown a photo of a whole starfruit and asked whether they recognized it or had tried it before. They were also asked whether they liked the shape of the dehydrated snack and whether its appearance made it more appealing.

Statistical analysis

Physicochemical measurements

For each a_w determination, three replicates per batch were analyzed, and results were expressed as mean $\pm$ standard deviation. Color measurements were performed in six replicates, and results were expressed as mean L^* , a^* , and b^* values. For both determinations, statistical differences among samples were assessed using one-way analysis of variance (ANOVA), followed by Student–Newman–Keuls (SNK) post-hoc tests ($p < 0.05$). All analyses were performed using InfoStat software (Di Rienzo et al., 2017).

For instrumental texture, force–distance data were processed using Texture Expert EXCED software to obtain values for hardness, brittleness, crispness, and crunchiness. Each texture parameter was analyzed by one-way ANOVA, followed by SNK post-hoc tests

($p < 0.05$) using InfoStat (Di Rienzo et al., 2017). Global differences among samples were visualized using principal component analysis (PCA). Additionally, multivariate analysis of variance (MANOVA) and Hotelling's T^2 test with Bonferroni correction were applied to confirm overall differences between samples.

Sensory measurements

Flash Profile data were analyzed by General Procrustes Analysis (GPA) (Gower, 1975) using XLSTAT (Addinsoft, 2023).

Hedonic liking scores were subjected to one-way ANOVA to compare the three treatments, followed by Tukey's HSD post-hoc test ($p < 0.05$), using InfoStat (Di Rienzo et al., 2017). Consumers were further segmented by hierarchical cluster analysis, and internal preference mapping (PrefMap) was applied to the resulting clusters using FIZZ software (Biosystèmes, 2022).

The relationship between sensory attributes and instrumental texture parameters was explored using principal component analysis (PCA) in XLSTAT (Addinsoft, 2023).

RESULTS

Soluble solids content and aw

Table 1 presents the total soluble solids (°Brix) before and after osmotic dehydration (OD), as well as the final a_w after freeze-drying for the three treatments. Given the naturally low sugar content of starfruit, osmotic dehydration resulted in an almost tenfold increase in soluble solids.

TABLE 1. Total soluble solids (°Brix) before and after osmotic dehydration (OD), and final water activity after freeze-drying, for the three treatments.

Treatments	Control	ODTRE	ODSAC
SS (°Brix before OD)	3.5 ± 0.9	3.5 ± 0.9	3.5 ± 0.9
SS (°Brix after OD)	-	30.8 ± 0.4 A	33.1 ± 0.1 B
a_w (after freeze-drying)	0.187 ± 0.043 A	0.187 ± 0.069 A	0.246 ± 0.028 A

Values are expressed as mean ± standard deviation. Different uppercase letters within the same row indicate significant differences among treatments (SNK test, $p < 0.05$).

Although final a_w differences were not statistically significant (Table 1), the ODSAC sample showed a slightly higher a_w compared to the other treatments despite its greater sugar uptake.

Color

Figure 2 shows the mean L*, a*, and b* color values for the three treatments. A significant difference was observed only in L*, with control samples exhibiting higher L* values (lighter color) than ODTRE, while ODSAC presented intermediate values. No significant differences were found in a* or b* values among the treatments.

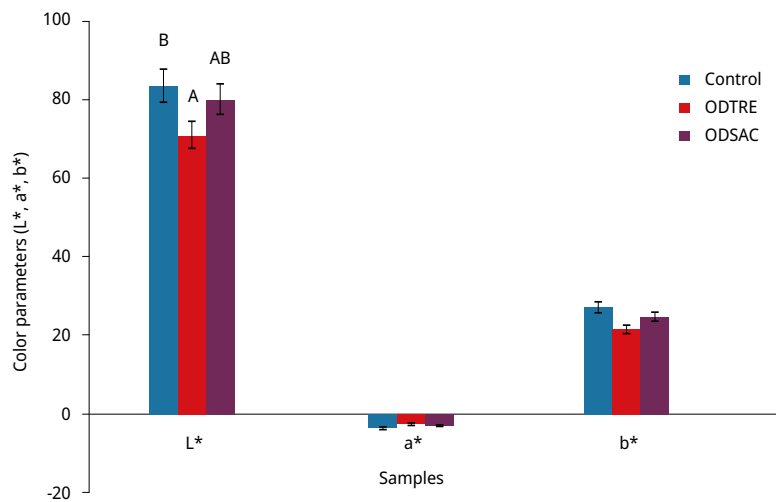


FIGURE 2. Color parameters L* (lightness), a* (greenness) and b* (yellowness) for the three treatments. Different uppercase letters indicate significant differences among treatments (SNK test, p < 0.05).

Instrumental texture

Table 2 presents the mean values ± standard deviation for hardness, brittleness, crispness, and crunchiness for each treatment. Osmotic dehydration (OD) pre-treatments using different sugars had distinct effects on the final texture of the snacks.

TABLE 2. Instrumental texture parameters for the three treatments.

Sample	Control	ODTRE	ODSAC
Hardness (gf)	360.2 ± 107.6 A	530.9 ± 137.0 B	831.1 ± 205.9 C
Brittleness (mm)	3.3 ± 1.5 B	1.0 ± 0.5 A	3.7 ± 1.0 B
Crispness	1.9 ± 1.0 B	4.1 ± 1.4 C	0.2 ± 0.42 A
Crunchiness (gf.sec)	3899.1 ± 958.4 A	3424.3 ± 1096.3 A	9396.4 ± 2314.3 B

Values are expressed as mean ± standard deviation. Different uppercase letters in the same row indicate significant differences among treatments (SNK test, p < 0.05).

Principal component analysis (PCA; Figure 3) was conducted to evaluate overall texture differences among samples. The results showed that ODSAC was associated with higher hardness and crunchiness, ODTRE was characterized by increased crispness and lower brittleness, while the control exhibited the lowest hardness.

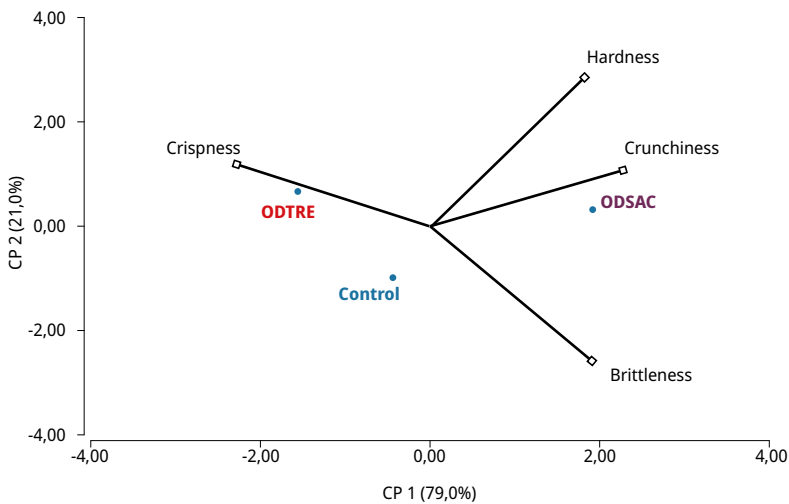


FIGURE 3. Principal Component Analysis (PCA) of instrumental texture parameters for the three treatments.

Both ODTRE and ODSAC slices were impregnated with disaccharides, which increased the total solids content and resulted in a stiffer dried matrix, requiring greater force to fracture (Dziki, 2020).

Suyatma et al. (2015) reported that in banana chips, “crispy” products are mechanically less resistant than “crunchy” ones, requiring more force to break. This aligns with our findings: ODSAC (sucrose OD) produced slices that were harder and crunchier, whereas ODTRE (trehalose OD) yielded slices that were crisper and less hard.

Sensory descriptive evaluation

Descriptive sensory profile

Flash Profile analysis showed that the three samples had distinct sensory profiles. Panelists generated a broad range of descriptors, which were then grouped into four sensory categories: appearance, texture, aroma, and taste.

Appearance-related descriptors included brightness, color (ranging from yellow-green to brownish), surface moisture (perceived humidity), and shape integrity (the degree to which the characteristic star shape was preserved). Texture descriptors included crispness, crunchiness, gumminess, hardness, porosity, and stickiness. The only odor descriptor identified (orthonasal) was a green fruity odor. Flavor and taste descriptors included aftertaste, astringency, bitterness, fruity flavor, green (unripe) flavor, sourness, and sweetness.

General Procrustes Analysis (GPA) of the Flash Profile data (Figure 4) showed clear sensory discrimination among the three treatments. The control sample was described by attributes such as gumminess, porosity, and sourness. ODSAC was characterized by astringency, hardness, stickiness, and sweetness. ODTRE was associated with higher aftertaste, crispness, crunchiness, and fruity flavor.

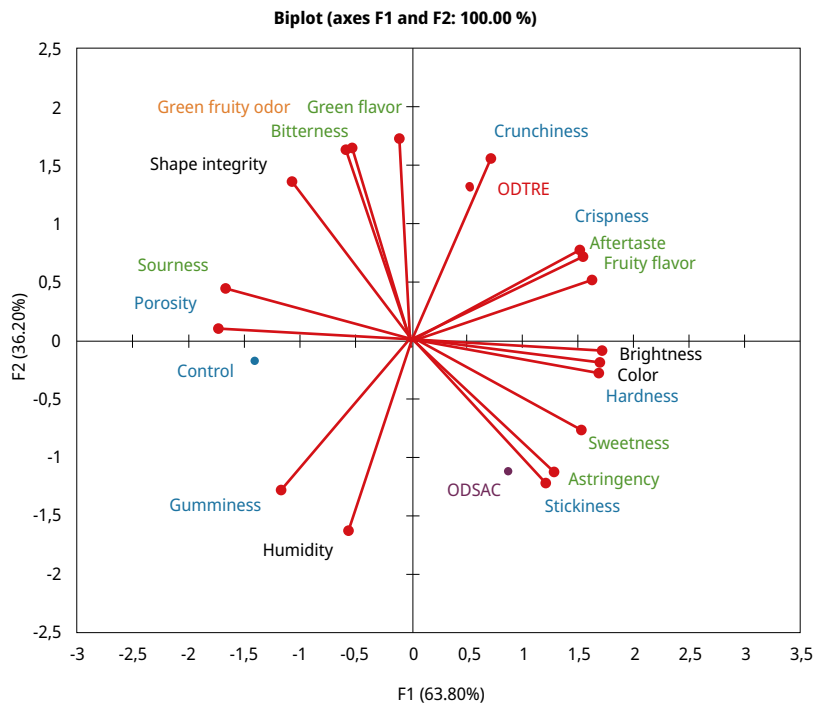


FIGURE 4. General Procrustes Analysis (GPA) of the Flash Profile intensity scores for the three treatments.

Consumer acceptability

The mean overall liking score for ODTRE was significantly higher than those for the control or ODSAC (Table 3).

TABLE 3. Liking scores of the samples.

Samples	Control	ODTRE	ODSAC
Liking	5.87 ± 1.58 B	6.89 ± 2.13 A	5.85 ± 2.02 B

Values are expressed as mean ± standard deviation. Different uppercase letters indicate significant differences among treatments (Tukey test, $p < 0.05$).

Crispness is widely recognized as a desirable attribute in dried snacks (Kayacier and Singh, 2003; Wong et al., 2020; Pravitha et al., 2021). However, consumer preferences may

also be influenced by other sensory characteristics. To better understand the drivers of liking, a hierarchical cluster analysis was conducted based on preference scores. Although the consumer sample size was limited, the analysis provided valuable insights for potential product optimization. Three distinct consumer clusters were identified (Table 4).

TABLE 4. Overall liking scores of each sample by consumer cluster.

Clusters	% Consumers	Control	ODTRE	ODSAC
1	35%	7.46	7.77	4.77
2	17%	4.54	4.85	3.08
3	48%	5.19	7.00	7.64

Cluster 1 (35% of consumers) showed a higher preference for the ODTRE and control samples. Cluster 3 (48%) preferred the ODTRE and ODSAC samples, while Cluster 2 (17%) gave relatively low liking scores to all three samples, but still showed a slight preference for ODTRE and control. Notably, ODTRE was among the most liked treatments across all clusters.

The preference patterns of Clusters 1 and 2 seem to be influenced by sensory attributes such as shape integrity, green fruity odor and flavor, and bitterness. In contrast, Cluster 3 consumers showed a positive association with attributes like hardness, color, and brightness (Figure 5).

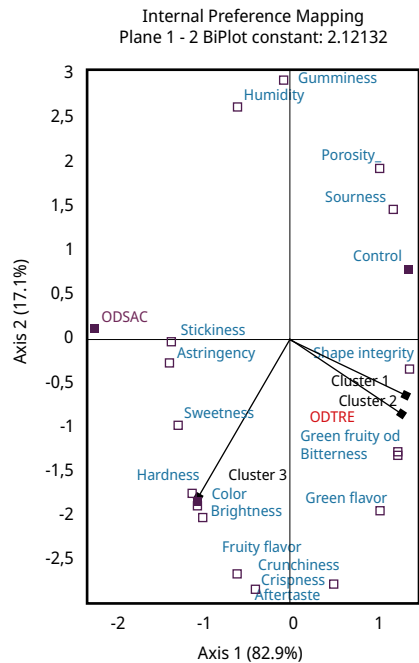


FIGURE 5. Internal preference map showing the relationship between consumer clusters and Flash Profile attributes for the three samples.

Correlation between instrumental and sensory texture

A combined PCA of instrumental and sensory texture data was performed to explore their relationships (Figure 6). A clear correlation was observed between instrumental and sensory hardness. However, no direct one-to-one correspondence emerged for crispness and in particular for crunchiness. Notably, the sensory attribute crunchiness was more closely aligned with the instrumental measurement of crispness than with instrumental crunchiness. This discrepancy may be attributed to the tendency of Spanish-speaking panelists to use the terms “crispy” and “crunchy” interchangeably, leading to a semantic overlap between these descriptors (Varela et al., 2008). The PCA also indicated that instrumental brittleness was associated with the sensory descriptors porosity and gumminess. Porosity was likely perceived both visually and during the initial bite reflecting a brittle, airy structure, while gumminess became more evident in later stages of chewing as the product formed a cohesive bolus. This interpretation aligns with known texture transitions during oral processing (Chen and Stokes, 2012).

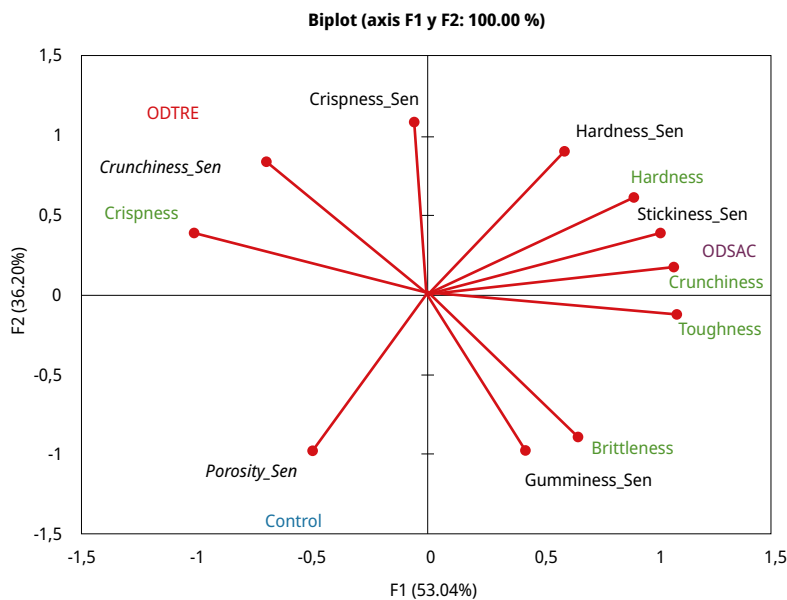


FIGURE 6. Principal Component Analysis (PCA) of sensory and instrumental textural measurements of the three samples.

DISCUSSION

The results showed that both types of sugar used in osmotic dehydration (OD) significantly influenced the final properties of the starfruit slices. Both OD-treated samples differed markedly from the control (which had no OD pre-treatment), highlighting the role of sugar impregnation in altering product characteristics.

The effects of OD on the physical and sensory properties of fruits and vegetables have been widely studied using a variety of osmotic agents and process conditions (Konopacka

et al., 2009; Ahmed et al., 2016). For starfruit specifically, previous studies have employed sucrose as the osmotic agent, but to our knowledge, none have reported the use of trehalose. Castillo and Cornejo (2007), for example, studied OD kinetics in starfruit slices with sucrose solutions of 40, 50, and 60 °Brix, and found an increase in monolayer moisture content, indicating enhanced product stability prior to drying. Similarly, Grajales-Agudelo et al. (2005) reported favorable results using a 65 °Brix sucrose solution before freeze-drying starfruit. Given that starfruit is naturally low in carbohydrates and energy (under 10 g of sugars and ~36 kcal per 100 g of fruit) (Sharma and Shantaram, 2013), OD with added sugars can substantially modify the product's composition and structure.

Although ODTRE and ODSAC samples differed significantly in total soluble solids content (Table 1), the magnitude of this difference was modest. Nevertheless, marked differences in instrumental texture parameters were observed between the treatments. These distinctions may be attributed to the unique structural effects of trehalose and sucrose on the dried matrix.

Trehalose-treated products are generally more stable than those treated with sucrose (Galmarini et al., 2009), due to trehalose's higher glass transition temperature (T_g) (106 °C vs 60 °C for sucrose; Roe and Labuza, 2005). The lower T_g of sucrose is associated with higher hygroscopicity (Roos and Karel, 1991), which may explain the increased stickiness and surface tackiness observed in ODSAC samples under ambient conditions (Figure 4). However, further shelf-life studies are needed to quantify this effect.

The significant increase in total soluble solids following OD in both treatments (Table 1) aligns with previous findings (Iglesias et al., 2017). This sugar uptake contributed to notable changes in texture. ODSAC samples exhibited the highest hardness and crunchiness (Table 2), likely due to the stiffening effect of increased solids content, which raises the force required to fracture (Dziki, 2020). Similar outcomes were reported by Díaz Barrios (2017), who observed increased hardness in freeze-dried banana slices pretreated with sucrose or trehalose. Moreover, Flash Profile data showed that control samples had higher porosity, which may explain their higher L^* values (Figure 2) due to enhanced light scattering in a more porous structure (Nowak and Jakubczyk, 2020).

Sensory analysis confirmed significant differences in attributes such as crispness, crunchiness, gumminess, hardness, porosity, and stickiness. The combined PCA (Figure 6) comparing instrumental and sensory texture measurements showed strong alignment between instrumental and sensory hardness suggesting that puncture force measurements reliably reflect perceived hardness. However, no direct one-to-one correspondence was observed for crispness and crunchiness. Panelists' perception of crunchiness correlated better with instrumental measurement of 'crispness' count than with the quantification of 'crunchiness' (area under the curve). This may reflect both linguistic and perceptual overlap: in Spanish "crujiente" and "crocante" are often used interchangeably (Varela et al., 2008) and the auditory cues linked to multiple fracture events may be perceived as crispness. PCA also indicated that instrumental brittleness correlated with sensory porosity and gumminess likely reflecting a structural eating sequence. A highly brittle matrix is initially perceived as porous (visually and during biting) and collapses quickly, and as the product breaks down, it forms a cohesive bolus that elicits a sensation of gumminess (Chen and Stokes, 2012).

Flavor perception also differed between treatments. Komes et al. (2003, 2005, 2007) investigated aroma retention in dehydrated fruit products and found that trehalose addition prior to drying enhanced the retention of volatile compounds responsible for fruit aroma. In our study, ODTRE samples were preferred by consumers and described as having a fruity flavor and a green fruity aroma (Figure 5). Galmarini et al. (2009) also found that trehalose helped maintain a balanced sweetness–sourness profile in strawberry puree products. In the case of starfruit snacks, the lower sweetness of trehalose may have preserved more of the fruit’s natural tartness, contributing to a more authentic flavor. This might explain the higher overall liking scores for ODTRE, which was perceived as less sweet than ODSAC and retained more of the fruit’s original flavor. Excessive sweetness may also conflict with the expectation of a healthy fruit-based snack.

In Argentina, starfruit is cultivated only in a small northern region of the country and remains unfamiliar to most consumers. A post-test survey confirmed that 67% of participants had never heard of or tried starfruit before, and only 8% had previously tasted it. Interestingly, 92% of the consumers found the star shape appealing, and 67% indicated that the shape increased their willingness to try the snack. Only 3% disliked the shape, and 5% were neutral. These findings, together with the high hedonic ratings for the Trehalose-treated samples, suggest strong potential for introducing freeze-dried starfruit snacks to new markets. The combination of visual appeal, health perception and distinctive flavor profile —especially in the ODTRE formulation— positions this product as a promising and innovative fruit snack.

CONCLUSIONS

The results of this study demonstrate that osmotic dehydration with trehalose is a promising strategy for producing freeze-dried starfruit snacks with improved sensory and textural properties compared to samples treated with sucrose or without osmotic pre-treatment. Trehalose-treated samples exhibited more desirable texture attributes —such as chip-like crispness and lower stickiness— and received the highest consumer acceptability ratings. These samples also retained more of the fruit’s characteristic flavor, aligning well with consumer expectations for a chip-like healthy fruit snack. In contrast, sucrose-treated samples were perceived as stickier and may be less texturally stable over time, likely due to sucrose’s higher hygroscopicity.

This study also highlights the potential of adding value to underutilized seasonal tropical fruits like starfruit by transforming them into convenient and appealing snack formats. The fruit’s distinct natural star shape provides a unique marketing advantage, enhancing visual appeal and increasing consumers’ willingness to try it. Combining this natural appeal with the functional benefits of trehalose as an osmotic agent offers a promising approach for developing innovative, shelf-stable, and consumer-friendly fruit-based snacks.

ACKNOWLEDGMENTS

This research was funded by Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). The authors wish to express their gratitude to Flair S.R.L. for kindly providing trehalose.

REFERENCES

- Addinsoft, 2023. *XLSTAT Statistical and data analysis solution* [Online]. Version 2023.1.1. New York: Addinsoft. [Accessed: March 1, 2023]. Available at: <https://www.xlstat.com/>
- Ahmed, I.; Qazi, I. M. and Jamal, S., 2016. Developments in osmotic dehydration technique for the preservation of fruits and vegetables. In: *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 34, pp. 29–43. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2016.01.003>
- Aktas, T.; Fujii, S.; Kawano, Y. and Yamamoto, S., 2007. Effects of pretreatments of sliced vegetables with trehalose on drying characteristics and quality of dried products. In: *Food and Bioprocesses Processing*, 85(3 C), pp. 178–183. DOI: <https://doi.org/10.1205/fbp07037>
- Alvarez, C. A.; Aguerre, R.; Gómez, R.; Vidales, S.; Alzamora, S. M. and Gerschenson, L. N., 1995. Air dehydration of strawberries: Effects of blanching and osmotic pretreatments on the kinetics of moisture transport. In: *Journal of Food Engineering*, 25(2), pp. 167–178. DOI: [https://doi.org/10.1016/0260-8774\(94\)00026-6](https://doi.org/10.1016/0260-8774(94)00026-6)
- Argentina. Ministerio de Salud y Desarrollo Social, 2018. *Enfr*. Buenos Aires: Departamento Nacional de Planeación.
- Biosystèmes, 2022. *FIZZ Sensory Software*. Version 2.70b. Couternon: Biosystèmes
- Birch, G. G.; Cowell, N. D. and Eyton, D., 1970. A quantitative investigation of Shallenberger's sweetness hypothesis. In: *International Journal of Food Science & Technology*, 5(3), pp. 277–280. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1970.tb01567.x>
- Bredie, W. L. P.; Liu, J.; Dehlholm, C. and Heymann, H., 2017. Flash profile method. In: Kemp, Sarah E.; Hort, Joanne and Hollowood, Tracey, eds. *Descriptive analysis in sensory evaluation*. New Jersey: Wiley. pp. 513–533. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781118991657.ch14>
- Castagnini, J. M.; Tappi, S.; Tylewicz, U.; Laghi, L. and Rocculi, P., 2022. Study of water distribution, textural and colour properties of cold formulated and air-dried apple snacks. In: *Foods*, 11(5), pp. 1–9. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods11050731>
- Castillo, M. and Cornejo, F., 2007. Estudio del efecto del proceso de deshidratación osmótica en la obtención de trozos secos de carambola (Averroha carambola L.) [Online]. In: *Revista Tecnológica ESPOL*, 20(1), pp. 183–188. [Accessed: July 17, 2023]. Available at: <http://www.rte.espol.edu.ec/index.php/tecnologica/article/view/179/123>
- Chen, J. and Stokes, J. R., 2012. Rheology and tribology: Two distinctive regimes of food texture sensation. In: *Trends in Food Science & Technology*, 25(1), pp. 4–12. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.TIFS.2011.11.006>
- Chirife, J. and Resnik, S. L., 1984. Unsaturated solutions of sodium chloride as reference sources of water activity at various temperatures. In: *Journal of Food Science*, 49(6), pp. 1486–1488. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1984.tb12827.x>

- Ciurzyńska, A.; Kowalska, H.; Czajkowska, K. and Lenart, A., 2016. Osmotic dehydration in production of sustainable and healthy food. In: *Trends in Food Science and Technology*, 50, pp. 186–192. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.01.017>
- Dairou, V. and Sieffermann, J. M., 2002. A comparison of 14 jams characterized by conventional profile and a quick original method, the flash profile. In: *Journal of Food Science*, 67(2), pp. 826–834. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2002.tb10685.x>
- De Vlieger, N. M.; Collins, C. and Bucher, T., 2017. What is a nutritious snack? Level of processing and macronutrient content influences young adults' perceptions. In: *Appetite*, 114, pp. 55–63. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.appet.2017.03.021>
- Di Rienzo, J. A.; Casanoves, F.; Balzarini, M. G.; González, L.; Tablada, M. and Robledo, C. W., 2017. InfoStat [Online]. Version 2017.1.2. Córdoba: Universidad Nacional de Córdoba. [Accessed: September 9, 2022]. Available at: <http://www.infostat.com.ar>
- Díaz Barrios, L. F., 2017. *Efecto de la incorporación de trehalosa mediante un tratamiento osmótico en las características fisicoquímicas y sensoriales de banana liofilizada* [Online]. Buenos Aires: Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. (Master Tesis). [Accessed: May 29, 2023]. Available at: https://bibliotecadigital.exactas.uba.ar/download/tesis/tesis_n6529_DiazBarrios.pdf
- Dueik, V.; Marzullo, C. and Bouchon, P., 2013. Effect of vacuum inclusion on the quality and the sensory attributes of carrot snacks. In: *Lwt*, 50(1), pp. 361–365. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2012.05.011>
- Dziki, D., 2020. Recent Trends in Pretreatment of Food. In: *Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, 8(12), pp. 2–18. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/pr8121661>
- Galmarini, Mara Virginia; van Baren, C.M.; Zamora, María Clara and Chirife, Jorge, 2009. *Trehalose as a drying aid of fruit products: influence on physical properties, sensory characteristics and volatile retention* [Online]. In: Filip, R., ed. *Multidisciplinary Approaches on Food Science and Nutrition for the XXI Century*. Kerala: Transworld Research Network. [Accessed: March 3, 2022]. Available at: <https://repositorio.uca.edu.ar/handle/123456789/14996>
- Galmarini, M. V.; Chirife, J.; Zamora, M. C. and Pérez, A., 2008. Determination and correlation of the water activity of unsaturated, supersaturated and saturated trehalose solutions. In: *Lwt*, 41(4), pp. 628–631. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2007.04.007>
- Gower, J. C., 1975. Generalized procrustes analysis. In: *Psychometrika*, 40(1), pp. 33–51. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02291478>
- Grajales-Agudelo, Lina M.; Cardona-Perdomo, William A. and Orrego-Alzate, C. E., 2005. Liofilización de carambola (*Averrhoa carambola* L.) osmodeshidratada. In: *Ingeniería y Competitividad*, 7(2), pp. 19–26. DOI: <https://doi.org/10.25100/iyv.7i2.2514>
- Iglesias, H.; Galmarini, M. V.; Barrios, L. F. D. and Chirife, J., 2017. Kinetics of water sorption and sugar crystallization in freeze-dried bananas previously immersed in concentrated sucrose and trehalose solution [Online]. In: *Anales de la Asociación Química Argentina*, 104(1). [Accessed: March 3, 2022]. Available at: <https://repositorio.uca.edu.ar/handle/123456789/5499>
- Kayacier, A. and Singh, R. K., 2003. Textural properties of baked tortilla chips. In: *Lwt*, 36(5), pp. 463–466. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0023-6438\(02\)00222-0](https://doi.org/10.1016/S0023-6438(02)00222-0)

- Komes, D.; Lovrić, T.; Ganić, K. K. and Gracin, L., 2003. Study of trehalose addition on aroma retention in dehydrated strawberry puree. In: *Food Technology and Biotechnology*, 41(2), pp. 111–119. <https://hrcak.srce.hr/111233>
- Komes, D.; Lovrić, T.; Ganić, K. K.; Kljusurić, J. G. and Banović, M., 2005. Trehalose improves flavour retention in dehydrated apricot puree. In: *International Journal of Food Science and Technology*, 40(4), pp. 425–435. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2005.00967.x>
- Komes, D.; Lovrić, T. and Kovačević Ganić, K., 2007. Aroma of dehydrated pear products. In: *Lwt*, 40(9), pp. 1578–1586. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2006.12.011>
- Konopacka, D.; Jesionkowska, K.; Klewicki, R. and Bonazzi, C., 2009. The effect of different osmotic agents on the sensory perception of osmo-treated dried fruit. In: *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 84(6), pp. 80–84. DOI: <https://doi.org/10.1080/14620316.2009.11512600>
- Mamede, M. E. de O. and Benassi, M. de T., 2016. Efficiency assessment of flash profiling and ranking descriptive analysis: A comparative study with star fruit-powdered flavored drink. In: *Food Science and Technology (Brazil)*, 36(2), pp. 195–203. DOI: <https://doi.org/10.1590/1678-457X.0003>
- Nieto, A.; Salvatori, D.; Castro, M. A. and Alzamora, S. M., 1998. Air drying behaviour of apples as affected by blanching and glucose impregnation. In: *Journal of Food Engineering*, 36(1–4), pp. 63–79. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0260-8774\(98\)00043-0](https://doi.org/10.1016/s0260-8774(98)00043-0)
- Nishida, C.; Uauy, R.; Kumanyika, S. and Shetty, P., 2004. The Joint WHO/FAO Expert consultation on diet, nutrition and the prevention of chronic diseases: process, product and policy implications. In: *Public Health Nutrition*, 7(1a), pp. 245–250. DOI: <https://doi.org/10.1079/phn2003592>
- Nowak, D. and Jakubczyk, E., 2020. The freeze-drying of foods — the characteristic of the process course and the effect of its parameters on. In: *Foods*, 9(1488), pp. 1–27. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/foods9101488>
- Pérez-González, E.; Severiano-Pérez, P.; Aviña-Jiménez, H. M. and Velázquez-Madrado, O. D. C., 2023. Geothermal food dehydrator system, operation and sensory analysis, and dehydrated pineapple quality. In: *Food Science and Nutrition*, May 2022, pp. 1–9. DOI: <https://doi.org/10.1002/fsn3.3249>
- Pravitha, M.; Manikantan, M. R.; Ajesh Kumar, V.; Beegum, S. and Pandiselvam, R., 2021. Optimization of process parameters for the production of jaggery infused osmo-dehydrated coconut chips. In: *Lwt*, 146(March), 111441. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111441>
- Prosapio, V. and Norton, I., 2017. Influence of osmotic dehydration pre-treatment on oven drying and freeze-drying performance. In: *Lwt*, 80, pp. 401–408. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.03.012>
- Ramadan, N. S.; Wessjohann, L. A.; Mocan, A.; Vodnar, D. C.; ElSayed, N. H.; ElToumy, S. A.; Mohamed, D. A.; Aziz, Z. A.; Ehrlich, A. and Farag, M. A., 2020. Nutrient and sensory metabolites profiling of Averrhoa carambola L. (starfruit) in the context of its origin and ripening stage by GC/MS and chemometric analysis. In: *Molecules*, 25(10). DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules25102423>
- Roe, K. D. and Labuza, T. P., 2005. Glass transition and crystallization of amorphous trehalose-sucrose mixtures. In: *International Journal of Food Properties*, 8(3), pp. 559–574. DOI: <https://doi.org/10.1080/10942910500269824>

- Roos, Y. and Karel, M., 1991. Applying state diagrams to food processing and development. In: *Food Technology*, 45(12).
- Roser, B., 1991. Trehalose, a new approach to premium dried foods. In: *Trends in Food Science and Technology*, 2(C), pp. 166–169. DOI: [https://doi.org/10.1016/0924-2244\(91\)90671-5](https://doi.org/10.1016/0924-2244(91)90671-5)
- Sadler, M. J.; Gibson, S.; Whelan, K.; Ha, M. A.; Lovegrove, J. and Higgs, J., 2019. Dried fruit and public health—what does the evidence tell us? In: *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 70(6), pp. 675–687. DOI: <https://doi.org/10.1080/09637486.2019.1568398>
- Schlinkert, C.; Gillebaart, M.; Benjamins, J.; Poelman, M. and de Ridder, D., 2020. The snack that has it all: People's associations with ideal snacks. In: *Appetite*, 152(April), 104722. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.appet.2020.104722>
- Sette, P., Salvatori, D. and Schebor, C., 2016. Physical and mechanical properties of raspberries subjected to osmotic dehydration and further dehydration by air- and freeze-drying. In: *Food and Bioproducts Processing*, 100, pp. 156–171. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2016.06.018>
- Sharma, B. and Shantaram, M., 2013. Morphological and biochemical characteristics of avarrho fruits. In: *International Journal of Pharmaceutical, Chemical and Biological Sciences*, 3(3), pp. 924–928. <https://www.ijpcbs.com/articles/morphological-and-biochemical-characteristics-of-averrhoafruits.pdf>
- Shofian, N. M.; Hamid, A. A.; Osman, A.; Saari, N.; Anwar, F.; Dek, M. S. P. and Hairuddin, M. R., 2011. Effect of freeze-drying on the antioxidant compounds and antioxidant activity of selected tropical fruits. In: *International Journal of Molecular Sciences*, 12(7), pp. 4678–4692. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms12074678>
- Stable Micro Systems, 2018. *Texture Expert Exceed*. Version 6.1.18.0. Godalming: Stable Micro Systems.
- Suyatma, N. E.; Ulfah, K.; Prangdimurti, E. and Ishikawa, Y., 2015. Effect of blanching and pectin coating as pre-frying treatments to reduce acrylamide formation in banana chips. In: *International Food Research Journal*, 22(3), pp. 936–942. <https://www.proquest.com/openview/775a8327fdcd268dcae8d9ece6d9a158/1?cbl=816390&pq-origsite=gscholar&parentSessionId=MoJwpbbFtToOEEu27J%2BhRUjEwaDNsWuLwg3e4ygMyc%3D>
- Tan, S.; Wang, Z.; Xiang, Y.; Deng, T.; Zhao, X.; Shi, S.; Zheng, Q.; Gao, X. and Li, W., 2020. The effects of drying methods on chemical profiles and antioxidant activities of two cultivars of Psidium guajava fruits. In: *Lwt*, 118(September 2019), 108723. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108723>
- Tarea, S.; Cuvelier, G. and Sieffermann, J. M., 2007. Sensory evaluation of the texture of 49 commercial apple and pear purees. In: *Journal of Food Quality*, 30(6), pp. 1121–1131. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1745-4557.2007.00174.x>
- Varela, P.; Salvador, A.; Gámbaro, A. and Fisman, S., 2008. Texture concepts for consumers: A better understanding of crispy-crunchy sensory perception. In: *European Food Research and Technology*, 226(5), pp. 1081–1090. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00217-007-0635-7>
- Wong, R.; Kim, S.; Chung, S. J. and Cho, M. S., 2020. Texture preferences of Chinese, Korean and US consumers: A case study with apple and pear dried fruits. In: *Foods*, 9(3). DOI: <https://doi.org/10.3390/foods9030377>

Propiedades fisicoquímicas de cerveza artesanal a partir de malta de cebada y malta de quinua con zarzamora deshidratada

Physicochemical properties of craft beer from barley malt and quinoa malt with dehydrated blackberry

Propriedades físico-químicas de cerveja artesanal elaborada com malte de cevada e malte de quinua com amora desidratada

ID ANA CRISTINA DE LA ROSA AGUILAR (1)

ID JUAN JOSÉ FIGUEROA-GONZÁLEZ (2)

ID FRANCISCO JAVIER CRUZ GUILLÉN (1)

ID ARELI LEYVA MALDONADO (1)

ID MARTHA ÁVILA ONTIVEROS (1)

(1) Departamento de Ingeniería en Industrias Alimentarias (IIA), Tecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico Superior Zacatecas Norte (ITSZN). Río Grande, Zacatecas, México.

(2) Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Zacatecas. Calera de Víctor Rosales, Zacatecas, México.

RECIBIDO: 14/8/2024 → APROBADO: 1/4/2025 ✉ figueroa.juan@inifap.gob.mx

RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue desarrollar cerveza artesanal de malta de cebada y malta de quinua con fruta deshidratada y evaluar las propiedades fisicoquímicas. Se realizaron diez tratamientos (malta de cebada-malta de quinua) de cerveza; en los cuales se analizaron el color, las antocianinas, el pH, la acidez titulable total (ATT), la acidez volátil, el alcohol y la densidad. En color, se obtuvieron resultados de L^* (luminosidad) de 25.26 a 39.84, a^* (rojo-verde) de 1.85 a 7.11 y para b^* (azul-amarillo) de 9.38 a 15.76. El contenido de antocianinas fue de 8.81 a 17.14 mg de cianidina 3-glucósido/L. El pH fue estadísticamente igual ($p \leq 0.05$) en todos los tratamientos. El contenido de alcohol alcanzó hasta 7.13 % v/v. La cerveza artesanal es aceptable debido a que la adición de la malta de quinua y zarzamora deshidratada no afectaron la calidad en antocianinas, acidez titulable total, pH, contenido alcohólico y acidez volátil de la cerveza artesanal.

Palabras clave: antocianinas, bebida alcohólica, contenido de alcohol, malta.

ABSTRACT

This work aimed to develop a malt-barley and malta-quinoa craft beer with dehydrated fruit and evaluate the physicochemical properties. Ten treatments (barley-quinoa) of beer were carried out and analyzed; the different treatments were analyzed for color, anthocyanins, pH, total titratable acidity (ATT), volatile acidity, alcohol and density. In color, results were obtained for L^* (luminosity) from 25.26 to 39.84, a^* (red-green) from 1.85 to 7.11 and b^* (blue-yellow) from 9.38 to 15.76. The anthocyanin content was 8.81 to 17.14 mg of cyanidin 3-glucoside/L. The pH was statistically the same ($p \leq 0.05$) in all treatments. The alcohol content reached up to 7.13 % v/v. The craft beer is acceptable because adding quinoa malt and dehydrated blackberry did not affect the quality of anthocyanins, total titratable acidity, pH, alcohol content and volatile acidity of the craft beer.

Keywords: anthocyanins, alcoholic beverage, alcohol content, malt.

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi desenvolver uma cerveja artesanal de malte de cevada e malte de quinoa com frutas desidratadas e avaliar as propriedades físico-químicas. Foram realizados e analisados dez tratamentos (cevada-quinoa) de cerveja; os diferentes tratamentos foram analisados quanto à cor, antocianinas, pH, acidez total titulável (ATT), acidez volátil, álcool e densidade. Na cor, foram obtidos resultados para L^* (luminosidade) de 25.26 a 39.84, a^* (vermelho-verde) de 1.85 a 7.11 e para b^* (azul-amarelo) de 9.38 a 15.76. O teor de antocianinas foi de 8.81 a 17.14 mg de cianidina 3-glicosídeo/L. O pH foi estatisticamente igual ($p \leq 0.05$) em todos os tratamentos. O teor alcoólico atingiu até 7.13 % v/v. A cerveja artesanal é aceitável porque a adição de malte de quinoa e amora desidratada não afetou a qualidade em antocianinas, acidez total titulável, pH, teor alcoólico e acidez volátil da cerveja artesanal.

Palavras-chave: antocianinas, bebida alcoólica, teor alcoólico, malte.

INTRODUCCIÓN

La quinua (*Chenopodium quinoa* Willd) es un pseudocereal y una de las plantas más antiguas cultivadas en el continente americano, con evidencias arqueológicas que datan de 5000 a 3000 a.C. (Schmidt et al., 2021). La quinua tiene un alto perfil nutricional, con un 10-18 % de proteínas y un 4.1-8.8 % de grasas. Es ideal para pacientes celíacos porque no contiene gluten. La planta entera puede utilizarse como alimento tanto para humanos como para el ganado (Afzal et al., 2022). Por otro lado, la producción de maltas con propiedades de procesamiento y sabor mejoradas podría impulsar el desarrollo de una amplia gama de productos a base de malta en la industria de alimentos y bebidas, y ampliar las aplicaciones de estos pseudocereales. Se dispone de datos limitados sobre el malteado de quinua (Almaguer et al., 2024); además, en los últimos años de estudio, la cerveza a base de quinua se ha caracterizado por poseer compuestos aromáticos exclusivos, pureza en sabor, aroma, textura y el amargor típico, todos ellos satisfactorios

para los consumidores. A pesar de ser un alimento libre de gluten, la quinua también aporta un alto contenido de proteínas, lo que se traduce en tiempos de filtración largos y se asocia a problemas de fermentación durante la elaboración de la cerveza (López-Rodríguez et al., 2024).

Las zarzamoras se consumen normalmente frescas o procesadas en jugo. Se consideran una excelente fuente de antioxidantes y pueden incluirse en la lista de frutas con los beneficios nutricionales más importantes (Halim et al., 2022). La cerveza artesanal se compone básicamente de cuatro ingredientes principales: agua, malta, lúpulo y levadura (Ambra et al., 2021; Cunha et al., 2023). Posteriormente a la fermentación, se forma alcohol y CO₂ (Cunha et al., 2023). La malta y el lúpulo contienen naturalmente compuestos fenólicos; sin embargo, durante la producción de cerveza, estas moléculas sufren modificaciones químicas y se forman nuevas moléculas que influyen tanto en el rendimiento como en las características finales de una cerveza. El aroma, los sabores, el gusto, la astringencia, el cuerpo y la plenitud son el resultado de la actividad metabólica de los microorganismos sobre las materias primas, y aquí se resumen las evidencias científicas que sugieren que todos ellos están influenciados por el contenido de fenoles (Ambra et al., 2021).

Por lo tanto, sería interesante añadir las frutas y otros adjuntos no malteados siempre durante las etapas frías de la producción de cerveza (fermentación o maduración) para enriquecer la bebida con compuestos de interés (Cunha et al., 2023). La cerveza es la bebida milenaria más consumida en el mundo. En 2021 su producción alcanzó los 1.860 millones de hectolitros, siendo China, Estados Unidos y Brasil los principales países fabricantes (PaucaMenacho, 2022).

La popularidad de la cerveza artesanal suscita un interés creciente en varios países y ofrece alternativas a la producción de cerveza convencional. En Europa, América del Sur y América del Norte, la cerveza artesanal es muy conocida; de hecho, se trata de uno de los segmentos en crecimiento en el sector de las bebidas. Este aumento está asociado con la "generación millennial" (personas de entre 21 y 30 años), que se percibe interesada en explorar nuevos sabores de cerveza y dispuesta a pagar precios más altos. Los bebedores de cerveza artesanal están particularmente interesados en probar sabores diferentes a los habituales y conocidos productos comerciales (Einfalt, 2021).

Por otro lado, múltiples estudios de investigación epidemiológica reportan que un consumo moderado de cerveza disminuye la mortalidad cardiovascular debido a cambios en el perfil lipídico y aumenta la capacidad antioxidante. Además, el consumo regular y moderado de cerveza se asocia con un menor riesgo de enfermedad de Alzheimer, diabetes y osteoporosis. En consumidores moderados de cerveza, se ha encontrado una disminución del 20 al 25 % en la tasa de mortalidad por enfermedad coronaria. Todos estos beneficios se atribuyen a los nutrientes de las materias primas y a los creados durante el propio proceso de elaboración de la cerveza (Cadenas et al., 2021).

Tradicionalmente, la cerveza se prepara a partir de la fermentación de cereales malteados (generalmente cebada), lúpulo, levadura y agua, dando como resultado una bebida alcohólica con un sabor amargo característico. Sin embargo, la fórmula puede variar según la región, adaptándose a las preferencias y necesidades del consumidor. Las cervezas presentan valores de pH de 2 a 5, el contenido de alcohol (% v/v) es de 2 a 20 %, la acidez total presenta un máximo valor de 10 g de ácido láctico/L y la acidez volátil debe

de estar por debajo de 1.2, de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana (Estados Unidos Mexicanos. Secretaría de Economía. Dirección General de Normas, 2017). Hoy en día la industria busca materias primas que produzcan bebidas con sabores únicos, al mismo tiempo que los consumidores buscan opciones de alimentos más saludables y nutritivos (PaucaMenacho, 2022). Bajo este contexto el objetivo de este trabajo fue desarrollar cerveza artesanal de malta de cebada y malta de quinua con fruta deshidratada y evaluar las propiedades fisicoquímicas.

MATERIALES Y MÉTODOS

El desarrollo de la investigación se realizó en el laboratorio de alimentos del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Campo Experimental Zacatecas (22° 54' N, 102° 39' O), Calera de Víctor Rosales, Zacatecas, México, con una altitud de 2 197 msnm, donde se evaluaron 10 diferentes tratamientos de cerveza artesanal con diferentes mezclas de malta de cebada-malta de quinua saborizada con o sin polvo deshidratado de zarzamora (Tabla 1).

TABLA 1. Tratamientos de cerveza artesanal con malta de cebada y malta de quinua saborizada con o sin polvo deshidratado de zarzamora.

Tratamiento de cerveza artesanal	Malta de cebada (%)	Malta de quinua (%)	Con o sin zarzamora
T1	100	0	con
T2	100	0	sin
T3	90	10	con
T4	90	10	sin
T5	80	20	con
T6	80	20	sin
T7	70	30	con
T8	70	30	sin
T9	30	70	con
T10	30	70	sin

Obtención de la malta de quinua

Los granos de quinua se adquirieron en el mercado local. Se limpiaron de impurezas (paja) y se lavaron con agua destilada en tres ocasiones; el agua de deshecho se eliminó con apoyo de un colador. Después, se realizó la hidratación de los granos en una relación de 1:1.5 (quinua: agua) y se dejaron reposar dentro de la estufa de secado (Fisher Scientific, Modelo 655G, U.S.A.) por 44 h a 30 °C. Posteriormente, los granos de quinua se colocaron

en bandejas de acero inoxidable para dejarlos germinar a 22-23 °C por 26 h. Los granos de quinua se llevaron al secador durante 53 h a 50 °C hasta alcanzar una humedad de 5 a 7 % y así proceder con el quebrado del grano. En tanto, la malta de cebada (Canada Malting Superior Pale Ale), importada y distribuida por BEERMEX, fue adquirida en línea para el desarrollo del proyecto.

Preparación de la cerveza artesanal

La preparación de la cerveza artesanal se realizó de acuerdo con el protocolo de Deželak et al. (2014). El agua (4 L) se calentó (90 °C) para agregar las diferentes mezclas de las maltas en una proporción de 0.65 g de malta/2.5 L agua. La mezcla formada se calentó a 67 °C por 60 min para formar el mosto. Posteriormente, el mosto se filtró y se dejó en maceración a 80 °C por 90 min. Durante el tiempo de la maceración, se agregó en dos partes el lúpulo (1 g/L); la primera adición del lúpulo fue a los 40 min y la segunda adición fue a los 65 min. Después con un baño de agua fría se bajó la temperatura a 23 °C. Se agregó la bentonita (4 g diluidos en 300 mL del mosto) y también se activó la levadura. Se vertió con mucho cuidado la cerveza en recipientes de vidrio (ocupando la mitad del recipiente), a los cuales se les acopló una trampa de aire rústica. Por otro lado, la fruta deshidratada fue previamente triturada en grandes trozos con ayuda del mortero y se adicionó 20 g/L a la cerveza. Transcurridos 8 días de fermentación se realizó el trasiego y se procedió al envasado. Previamente al envasado, se preparó una solución de sacarosa (4 g/L) que se agregó a la botella de cerveza antes de sellarla.

Propiedades fisicoquímicas en la cerveza

Color. Se colocó una muestra de cerveza en una caja Petri, se midió con el colorímetro en cinco puntos distintos y se reportaron los valores de L , a^* y b^* .

Antocianinas totales. La cuantificación de antocianinas totales se realizó según el método desarrollado por Abdel-Aal y Hucl (1999). En un tubo Falcon se pesaron 50 mg de cerveza y se agregaron 24 mL de etanol acidificado. La muestra se agitó en un vórtex a 8000 rpm/30 min. Se determinó el pH y de ser necesario se ajustó el pH a 1 con HCl 4.0 N. La muestra se centrifugó a 5000 rpm/15 min. En matraces aforados de 50 mL se recuperó el sobrenadante y se aforó con etanol acidificado. Se agitó vigorosamente y se leyó en el espectrofotómetro a una absorbancia de 535 nm. El contenido de antocianinas totales se reportó como mg de cianidina 3-glucósido/L de muestra.

Acidez titulable total (ATT). La cerveza (60 mL) se desgasificó por 5 min. Se agregaron 3 gotas de azul de bromotimol y se tituló con NaOH 0.1 N y el proceso terminó hasta que viró a un color azul verde. Los datos se reportaron como acidez total (g de ácido láctico/L).

Acidez volátil (AV). Se midieron 10 mL de cerveza desgasificada, 250 mL de agua destilada y 0.30 mg de ácido cítrico. La muestra se destiló hasta recolectar 100 mL del destilado. Al destilado se le agregaron tres gotas de fenoltaleína y se tituló con NaOH

0.1 N hasta obtener un vire rosa pálido. Se anotaron los mL de NaOH gastados y la acidez volátil se reportó como g de miliequivalentes de ácido láctico/L.

Contenido de alcohol. En un matraz aforado se midieron 250 mL de cerveza (20 °C) y se vertieron en un matraz bola de 1000 mL. El matraz aforado se lavó tres veces con 50 mL de agua destilada y en cada lavado, la porción se agregó al matraz de destilación. Después, la cerveza se neutralizó con 10 mL de óxido de calcio y una gota de antiespumante. La muestra se colocó en el destilador y el proceso terminó cuando se recuperaron 200 mL. La muestra se dejó enfriar a 20 °C, se aforó con agua destilada (20 °C) y se vertió en una probeta de 250 mL. Se colocó el alcoholímetro, se midió y se reportaron los datos como contenido de alcohol en % v/v.

Análisis estadístico

Se realizó un diseño completamente al azar. Todos los análisis se realizaron por triplicado, y los resultados se expresaron como media ± desviación estándar. Los resultados de los análisis fueron sometidos a un Análisis de Varianza y se realizó la prueba de medias de Tukey con un nivel de significancia del $p \leq 0.05$ (SAS Institute, 2023).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Color

En la Figura 1 se presentan las diferentes cervezas artesanales de malta de cebada-malta de quinua. Los tratamientos T1, T3, T5, T7 y T9 presentaron colores más rojizos debido a la presencia de zarzamora. Las muestras T2, T4, T6, T8 y T10 presentaron colores ámbar debido a que no contienen fruta.

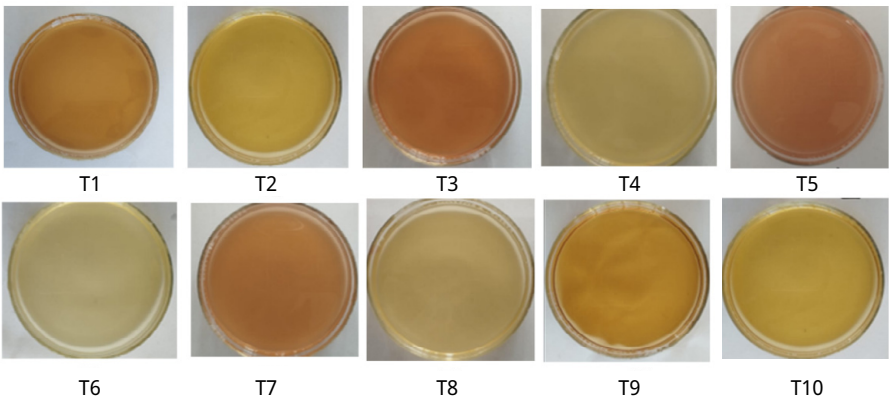


FIGURA 1. Colorimetría en las diferentes cervezas artesanales de malta de cebada-malta de quinua con o sin zarzamora.

En la Tabla 2 se aprecia la colorimetría de los diferentes tratamientos de cerveza artesanal. Los valores de L^* fueron mayores en T1 con respecto a T3, T5, T7 y T9, tratamientos que tienen zarzamora. Sin embargo, los valores de luminosidad disminuyen cuando no se agrega zarzamora a la cerveza; el T2 presentó menores valores de L^* con respecto a T4, T6, T8 y T10. Por lo tanto, T6 y T8 fueron estadísticamente diferentes ($p \leq 0.05$) a los otros tratamientos, mientras que el T3 presentó el valor más bajo de luminosidad. Los valores de a^* en T1 presentan un color rojizo, el cual se adopta en mayor proporción en T3 y T5. Este color disminuye en T7 y T9, que contienen entre 20 y 10 % de malta de quinua con zarzamora, respectivamente. Además, los valores de a^* en T2 disminuyen conforme disminuye la concentración de malta de cebada. El parámetro b^* presentó valores positivos en los diferentes tratamientos. El T2, T3 y T4 fueron estadísticamente iguales ($p \leq 0.05$) con valores mayores al T7, T8 y T10. Asimismo, los valores de b^* incrementan en T3 y T5 con respecto al T1, es decir, tornan un color azulado, el cual disminuye conforme se reduce la cantidad de malta de quinua en T7 y T9. La cerveza de malta de cebada-malta de quinua que no contiene zarzamora disminuye significativamente ($p \leq 0.05$) en los diferentes tratamientos con respecto a T2.

TABLA 2. Colorimetría en las diferentes cervezas artesanales de malta de cebada-malta de quinua con o sin zarzamora.

Tratamiento	L^*	a^*	b^*
T1	33.6 ± 1.1bc	6.1 ± 0.0b	14.5 ± 0.5ab
T2	28.3 ± 1.5cd	7.1 ± 0.2a	14.8 ± 0.6ab
T3	33.3 ± 0.4bc	2.3 ± 0.1de	11.1 ± 0.3cde
T4	33.4 ± 1.2bc	2.6 ± 0.3d	11.6 ± 0.7cd
T5	38.5 ± 0.5a	1.9 ± 0.2de	9.3 ± 1.0e
T6	30.8 ± 1.0c	1.8 ± 0.2e	10.7 ± 0.5de
T7	39.8 ± 2.3a	3.9 ± 0.5c	12.7 ± 0.9bc
T8	28.9 ± 0.4c	6.0 ± 0.1b	15.1 ± 0.7a
T9	32.8 ± 2.4c	6.9 ± 0.2a	14.6 ± 0.7ab
T10	25.2 ± 1.6d	6.6 ± 0.3ab	15.7 ± 0.1a

Los valores promedio en las columnas con letras distintas son estadísticamente diferentes ($p \leq 0.05$) de la prueba de medias de Tukey.

Antocianinas totales

En la Figura 2 se observan los niveles de antocianinas presentes en los diferentes tratamientos de cerveza. El T1 presentó valores más altos de antocianinas con respecto al T3 (90 % de malta de cebada y 10 % de malta de quinua) y T5 (80 % de malta de cebada y 20 % de malta de quinua); pero el T1 disminuye los valores de antocianinas en T7 y T9,

es decir en cervezas que presentan mayor concentración de quinua, 30 y 70 % de quinua, respectivamente. La misma tendencia la presentó el T2 (17.1 mg de cianidina 3-glucósido/L de muestra), en relación con T4, T6, T8 y T10, cervezas sin adición de zarzamora. Los altos valores de antocianinas en T2 pueden ser resultado del color puro de la cerveza por su malta base y por los altos valores de *b** (Tabla 2). El contenido de antocianinas en las diferentes cervezas de malta de cebada-malta de quinua les aporta cierta funcionalidad, es decir, pueden ser caracterizadas como cervezas funcionales, principalmente en las elaboradas con 30 % de malta de cebada y 70 % de malta de quinua.

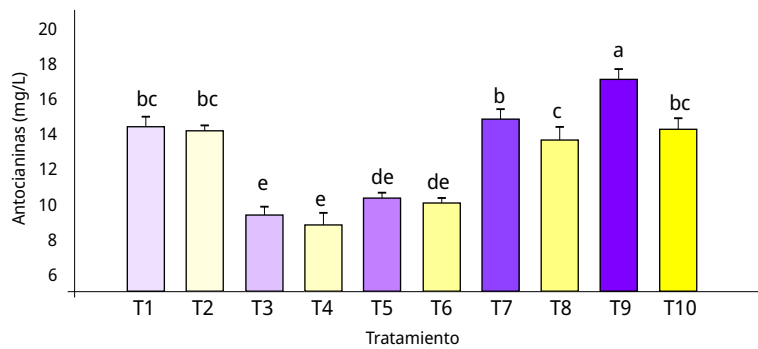


FIGURA 2. Antocianinas totales (mg de cianidina 3-glucósido/L de muestra) en los diferentes tratamientos de cerveza artesanal de malta de cebada-malta de quinua con o sin zarzamora. Letras minúsculas diferentes indican diferencia significativa ($p \leq 0.05$) en la prueba de medias de Tukey.

pH y acidez titulable total (ATT)

El pH en las cervezas que incluían zarzamora en la producción presentó diferencias significativas ($p \leq 0.05$). El T9 presentó los valores de pH más bajos, siendo estadísticamente diferente ($p \leq 0.05$) a T1, T3, T5 y T7 (Tabla 3). Asimismo, las cervezas de malta de cebada-malta de quinua que no contenían zarzamora también presentaron diferencias significativas ($p \leq 0.05$); siendo el T10 el que mostró los valores más bajos de pH con respecto a T2, T4, T6 y T8 (Tabla 3).

Por otro lado, en la ATT los tratamientos fueron significativamente diferentes ($p \leq 0.05$). El T1, T3, T4, T5, T6, T7 y T9 fueron estadísticamente iguales ($p \leq 0.05$); pero estadísticamente diferentes a T2, a T8 y T10. El valor de ATT aumenta cuando se utiliza malta de cebada y malta de quinua al 30 y 70 %, respectivamente; esto es en cervezas con zarzamora. En tanto, las cervezas T2 y T10 que no contenían zarzamora presentaron la misma tendencia que aquella que incluía zarzamora en la formulación. Además, las diferentes cervezas de malta de cebada-malta de quinua presentan valores de pH y ATT dentro del rango marcado por la Norma Oficial Mexicana (Estados Unidos Mexicanos. Secretaría de Economía. Dirección General de Normas, 2017).

TABLA 3. pH y acidez titulable total (ATT, expresado en g de ácido láctico/L) en las diferentes cervezas artesanales de malta de cebada-malta de quinua con o sin zarzamora.

Tratamiento	pH	Acidez titulable total (g ácido láctico/L)
T1	3.9 ± 0.06ab	0.15 ± 0.01cd
T2	4.2 ± 0.22a	0.22 ± 0.0b
T3	4.3 ± 0.16a	0.13 ± 0.00cd
T4	3.8 ± 0.16ab	0.11 ± 0.01d
T5	3.9 ± 0.17ab	0.10 ± 0.00d
T6	4.3 ± 0.23a	0.14 ± 0.02cd
T7	4.4 ± 0.22a	0.11 ± 0.01d
T8	3.7 ± 0.19bc	0.26 ± 0.01a
T9	3.3 ± 0.16c	0.11 ± 0.01d
T10	2.4 ± 0.09d	0.17 ± 0.01c

Los valores promedio en las columnas con letras distintas son estadísticamente diferentes ($p \leq 0.05$) de la prueba de medias de Tukey.

Acidez volátil (AV)

La AV presentó valores de 0.11 ± 0.001 a 0.47 ± 0.001 g de miliequivalentes de ácido láctico/L (Figura 3). Los diferentes tratamientos presentaron diferencias significativas ($p \leq 0.05$). En cervezas con sabor a zarzamora el T1 incrementó los valores de AV en T3 (malta de cebada-malta de quinua, 90-10 %) y en T9 (malta de cebada-malta de quinua, 70-30 %), pero disminuyó significativamente ($p \leq 0.05$) en T5 (malta de cebada-malta de quinua, 80-20 %) y T7 (malta de cebada-malta de quinua, 70-30 %). Las cervezas sin zarzamora presentaron valores altos de AV en T2 (malta de cebada, 100 %) y la AV disminuyó significativamente ($p \leq 0.05$) en T4 (malta de cebada-malta de quinua, 90-10 %). Además, los valores de AV incrementaron cuando la concentración de malta de cebada disminuyó y, a su vez, incrementó la concentración de malta de quinua en T6, T8 y T10. Los valores de AV en las diferentes cervezas de malta de cebada-malta de quinua permiten una mayor conservación y un mejor equilibrio de las bebidas.

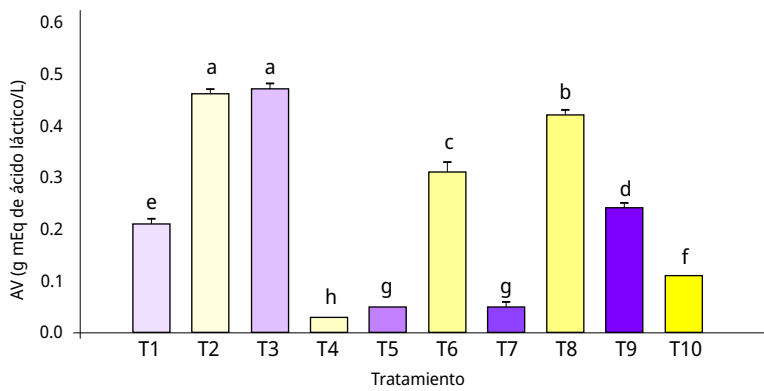


FIGURA 3. Acidez volátil (AV, g de miliequivalentes de ácido láctico/L) en los diferentes tratamientos de cerveza artesanal de malta de cebada-malta de quinua con o sin zarzamora. Letras minúsculas diferentes indican diferencia significativa ($p \leq 0.05$) en la prueba de medias de Tukey.

Alcohol

En la Figura 4 se pueden apreciar valores de 4.0 a 7.1 % v/v de alcohol en las diferentes cervezas artesanales. La cerveza con adición de zarzamora (T1) y la cerveza sin zarzamora (T4) fueron las que presentaron mayor contenido de alcohol. Es decir, las cervezas que presentaron mayor contenido de malta de cebada fueron las que presentaron el mayor contenido alcohólico y fueron estadísticamente iguales ($p \leq 0.05$) entre sí. Asimismo, las cervezas que presentaron menor contenido de alcohol fueron la T2 (con zarzamora), T3, T5 y T9; las cuales no contenían zarzamora añadida y fueron estadísticamente iguales ($p \leq 0.05$) al resto de los tratamientos. El contenido de alcohol puede aportar una mayor estabilidad en el almacenamiento y mayor maduración de aromas y sabores sensorialmente, aportando un mejor cuerpo a la cerveza.

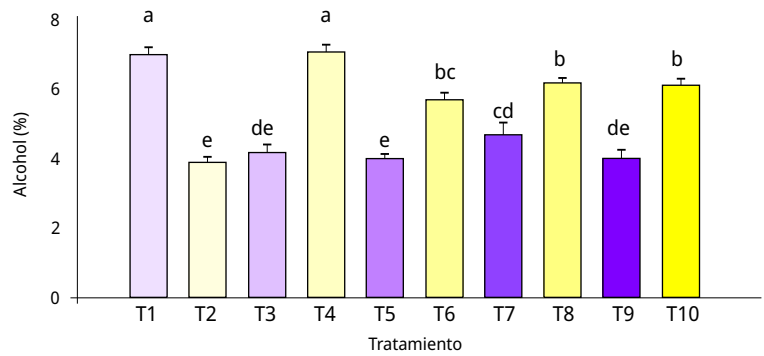


FIGURA 4. Contenido de alcohol (% v/v) en los diferentes tratamientos de cerveza artesanal de malta de cebada-malta de quinua con o sin zarzamora. Letras minúsculas diferentes indican diferencia significativa ($p \leq 0.05$) en la prueba de medias de Tukey.

CONCLUSIONES

Se mostraron cambios significativos en los parámetros de color debido al efecto de la adición de zarzamora deshidratada, proporcionando a la cerveza un tono más rojizo o ámbar (dependiendo de si presenta o no zarzamora). Asimismo, las diferentes concentraciones y mezclas de malta de cebada y malta de quinua son una alternativa para la producción de cerveza artesanal con un enfoque funcional, por su contenido en antocianinas. La cerveza artesanal de malta de cebada-malta de quinua con polvo de zarzamora deshidratada presentó una excelente calidad fisicoquímica (pH, acidez titulable total, acidez volátil y contenido de alcohol) de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana; lo cual le permite tener un mejor y mayor cuerpo. Además, el proceso de la cerveza artesanal de malta de cebada-malta de quinua (70-30 y 30-70 %) puede ser una alternativa comercial por sus propiedades fisicoquímicas.

REFERENCIAS

- Abdel-Aal, E. S. M. y Hucl, P., 1999. A rapid method for quantifying total anthocyanins in blue aleurone and purple pericarp wheats. En: *American Association of Cereal Chemists, Inc.*, 76(3), pp. 350-354. DOI: <https://doi.org/10.1094/CHEM.1999.76.3.350>.
- Afzal, I.; Basra, S. M. A.; Rehman, H. U.; Iqbal, S. y Bazile, D., 2022. Trends and limits for quinoa production and promotion in Pakistan. En: *Plants*, 11(12), 1603. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants11121603>.
- Almaguer, C.; Kollmannsberger, H.; Gastl, M., y Becker, T., 2024. Influence of the malting conditions on the modification and variation in the physicochemical properties and volatile composition of barley (*Hordeum vulgare* L.), rye (*Secale cereale* L.), and quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) malts. En: *Food Research International*, 196, 114965. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.114965>.
- Ambra, R., Pastore, G., y Lucchetti, S. 2021. The role of bioactive phenolic compounds on the impact of beer on health. En: *Molecules*, 26(2), 486. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules26020486>.
- Cadenas, R.; Caballero, I.; Nimubona, D. y Blanco, C. A., 2021. Brewing with starchy adjuncts: Its influence on the sensory and nutritional properties of beer. En: *Foods*, 10(8), 1726. DOI: <https://doi.org/10.3390/foods10081726>.
- Cunha, A. C. D.; Lopes, N. D.; Barcia, M. T.; Sautter, C. K. y Augusto Ballus, C., 2023. Production and characterization of craft beers with different additions of native fruits and agro-industrial residues: a review. En: *Ciência Rural*, 53(9), e20220194. DOI: <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20220194>.
- Deželak, M.; Zarnkow, M.; Becker, T. y Košir, I. J., 2014. Processing of bottom-fermented gluten-free beer-like beverages based on buckwheat and quinoa malt with chemical and sensory characterization. En: *Journal of the Institute of Brewing*, 120(4), pp. 360-370. DOI: <https://doi.org/10.1002/jib.166>.
- Einfalt, D., 2021. Barley-sorghum craft beer production with *Saccharomyces cerevisiae*, *Torulaspora delbrueckii* and *Metschnikowia pulcherrima* yeast strains. En: *European*

- Food Research and Technology*, 247, pp. 385-393.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s00217-020-03632-7>.
- Estados Unidos Mexicanos. Secretaría de Economía. Dirección General de Normas, 2017. NOM-199-SCFI-2017: *Bebidas alcohólicas-denominación, especificaciones fisicoquímicas, información comercial y métodos de prueba*. México: Dirección General de Normas.
- Halim, M. A.; Kanan, K. A.; Nahar, T.; Rahman, M. J.; Ahmed, K. S.; Hossain, H. y Ahmed, M., 2022. Metabolic profiling of phenolics of the extracts from the various parts of blackberry plant (*Syzygium cumini* L.) and their antioxidant activities. En: *Lwt*, 167, 113813. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113813>.
- López-Rodríguez, W. E.; Ramírez-Gutiérrez, J. L.; Valdiviezo, M. D. M.; Muñoz-Agreda, J. E.; Paredes-Barrios, K. S.; Ponce-Ramírez, J. A. y Aguirre, E., 2024. Evaluation of *Chenopodium quinoa* (Willdenow) malting conditions and supplementation on the quality of a Red Ale craft beer of Pilsen base malt and Caramel malt. En: *Journal of Cereal Science*, 104085. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2024.104085>.
- Paucar-Menacho, L. M.; Salvador-Reyes, R.; Castillo-Martinez, W. E.; Símpalo-López, W. D.; Verona-Ruiz, A.; Lavado-Cruz, A. y López-Rodríguez, W., 2022. Use of Andean pseudocereals in beer production. En: *Scientia Agropecuaria*, 13(4), pp. 395-410. DOI: <http://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2022.036>.
- SAS Institute, 2023. SAS. Vers. 9.4. Cary: SAS Institute.
- Schmidt, D.; Verruma-Bernardi, M. R.; Forti, V. A. y Borges, M. T. M. R., 2021. Quinoa and amaranth as functional foods: A review. En: *Food Reviews International*, 39(4), pp. 2277-2296. DOI: <https://doi.org/10.1080/87559129.2021.1950175>.

Caracterización botánica de drogas vegetales comercializadas en Uruguay

Botanical characterization of herbal drugs marketed in Uruguay

Caracterização botânica de drogas vegetais comercializadas no Uruguai

 **GASTÓN MARTÍNEZ** (1)

 **PILAR PERNA** (1)

 **ROSSINA FIGLIOLO** (2)

 **PAULA RODRÍGUEZ** (1, 3)

 **CARMEN ROSSINI** (1, 4)

- (1) Laboratorio de Botánica, Departamento de Química Orgánica, Facultad de Química, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay.
- (2) Grupo de Análisis de Compuestos Traza (GACT), Departamento de Química del Litoral, CenUR Litoral Norte, Universidad de la República, Paysandú, Uruguay.
- (3) Laboratorio de Biotatálisis y Biotransformaciones, Departamento de Química Orgánica, Departamento de Biociencias, Facultad de Química, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay.
- (4) Laboratorio de Ecología Química, Departamento de Química Orgánica, Facultad de Química, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay.

RECIBIDO: 20/3/2025 → APROBADO: 26/5/2025 ✉ gastonmartinez@fq.edu.uy

RESUMEN

Las drogas vegetales son ampliamente utilizadas con fines medicinales, pero su calidad puede verse comprometida por adulteraciones y deficiencias en los procesos de control. En Uruguay, los análisis botánicos sobre estos productos siguen siendo escasos, a pesar de su creciente demanda. Este trabajo evaluó la calidad botánica de 42 muestras de drogas vegetales empleadas por empresas y laboratorios locales, previo a su comercialización. Las muestras fueron analizadas mediante caracterización organoléptica, análisis macroscópico y microscópico, conforme a los criterios establecidos en el Decreto 289/018 del Ministerio de Salud Pública de Uruguay. Se determinó que el 69 % de las muestras correspondió a materiales de calidad aceptable. Las principales causas de no conformidad fueron la presencia de órganos vegetales que no forman parte de la droga vegetal, la presencia de hongos, insectos o material inorgánico, y el uso de especies incorrectas. Además, se analizaron en detalle casos de adulteraciones entre especies

botánicamente relacionadas, particularmente en drogas de las familias Apiaceae, Malvaceae y Asteraceae, seleccionados por su recurrencia en muestras comerciales evaluadas en años anteriores. Los resultados destacan la necesidad de fortalecer los controles de calidad botánica en la comercialización de drogas vegetales en el país para garantizar su autenticidad, eficacia y seguridad.

Palabras clave: autenticación botánica, normativa sanitaria, control de adulteraciones, caracteres morfoanatómicos, análisis de drogas vegetales.

ABSTRACT

Herbal drugs are widely used for medicinal purposes, but their quality can be compromised by adulterations and deficiencies in control processes. In Uruguay, botanical analyses of these products remain scarce despite their growing demand. This study evaluated the botanical quality of 42 herbal drug samples used by local companies and laboratories prior to commercialization. The samples were analyzed through organoleptic characterization, macroscopic and microscopic examination, following the criteria established in Decree 289/018 of the Uruguayan Ministry of Public Health. It was determined that 69 % of the samples corresponded to materials of acceptable quality. The main causes of non-compliance were the presence of plant organs that are not part of the herbal drug, the presence of fungi, insects or inorganic material, and the use of incorrect species. In addition, cases of adulteration involving botanically related species were analyzed in detail, particularly in drugs from the families Apiaceae, Malvaceae and Asteraceae, selected for their recurrence in commercial samples evaluated in previous years. The results highlight the need to strengthen botanical quality controls in the marketing of herbal drugs in the country to ensure their authenticity, efficacy, and safety.

Keywords: botanical authentication, sanitary regulations, adulteration control, morpho-anatomical characters, analysis of herbal drugs.

RESUMO

As drogas vegetais são amplamente utilizadas com fins medicinais, mas sua qualidade pode ser comprometida por adulterações e deficiências nos processos de controle. No Uruguai, as análises botânicas desses produtos ainda são escassas, apesar da crescente demanda. Este trabalho avaliou a qualidade botânica de 42 amostras de drogas vegetais utilizadas por empresas e laboratórios locais antes de sua comercialização. As amostras foram analisadas por meio de caracterização organoléptica, análise macroscópica e microscópica, conforme os critérios estabelecidos no Decreto 289/018 do Ministério da Saúde Pública do Uruguai. Determinou-se que 69 % das amostras correspondiam a materiais de qualidade aceitável. As principais causas de não conformidade foram a presença de órgãos vegetais que não fazem parte da droga vegetal, a presença de fungos, insetos ou material inorgânico, e o uso de espécies incorretas. Além disso, foram analisados em detalhe casos de adulterações entre espécies botânicas relacionadas, particularmente em drogas das famílias Apiaceae, Malvaceae e Asteraceae, selecionadas por sua recorrência em amostras comerciais

avaliadas em anos anteriores. Os resultados destacam a necessidade de fortalecer os controles de qualidade botânica na comercialização de drogas vegetais no país para garantir sua autenticidade, eficácia e segurança.

Palavras-chave: autenticação botânica, regulamentação sanitária, controle de adulterações, caracteres morfoanatômicos, análise de drogas vegetais.

INTRODUCCIÓN

El uso de plantas medicinales ha sido una práctica ancestral en diversas culturas, constituyendo la base de la medicina tradicional (Petrovska, 2012). La medicina tradicional es entendida como el conjunto de saberes y prácticas sanitarias transmitido por las comunidades, centrado en el uso de recursos naturales para el cuidado de la salud (Organización Mundial de la Salud, 2002). En Uruguay es más frecuente, sin embargo, el uso del término “medicina popular” debido a que la identidad cultural del país se construyó a partir de la fusión de distintas tradiciones, sin una referencia única a un sistema médico ancestral. En este contexto, el empleo de plantas medicinales representa la forma más extendida de estas prácticas (Tabakián, 2017).

A lo largo de la historia, la relevancia que se le ha dado a las plantas en el tratamiento de dolencias ha fluctuado, pero en las últimas décadas se observó un incremento en su consumo a nivel global, impulsado por la revalorización de la medicina natural (Cañigüeral et al., 2003). No obstante, este crecimiento ha estado acompañado de deficiencias en los mecanismos de regulación y control, lo que plantea desafíos para garantizar la calidad y seguridad de las drogas vegetales (Cuassolo et al., 2010). A pesar de estas limitaciones, las plantas medicinales continúan desempeñando un papel fundamental en la medicina popular, especialmente en el tratamiento de dolencias de manejo doméstico, con una mayor preponderancia en áreas rurales (Cuassolo et al., 2010; Tabakian, 2017).

En nuestro país, entre las principales plantas medicinales comercializadas se destacan la marcela (*Achyrocline saturejoides* (Lam.) DC., Asteraceae), la carqueja (*Baccharis trimera* (Less.) DC., Asteraceae), el cedrón (*Aloysia citrodora* Paláu, Verbenaceae) y la menta (*Mentha × piperita* L., Lamiaceae). Estas especies se utilizan principalmente para tratar afecciones digestivas, respiratorias, inflamatorias y del sistema nervioso, y se encuentran comúnmente en herboristerías, ferias y mercados, formando parte del acervo de la medicina tradicional del país (Tabakián, 2019).

La ciencia contemporánea ha incorporado muchos principios activos de origen vegetal en la medicina moderna (Petrovska, 2012). En este contexto, la Organización Mundial de la Salud (OMS) ha reconocido la necesidad de integrar los conocimientos y recursos de la medicina tradicional en los sistemas de salud pública (Organización Mundial de la Salud, 2002). Sin embargo, para alcanzar este objetivo es esencial contar con profesionales capacitados en el cultivo, recolección, procesamiento y control de plantas medicinales con el fin de asegurar la calidad de los productos fitoterapéuticos (Jiménez, 1992).

El registro de los conocimientos populares sobre el uso de las plantas (etnobotánica) y la determinación de identidad y de pureza de los materiales vegetales (botánica aplicada) son herramientas claves para garantizar la calidad y seguridad de las drogas vegetales

disponibles para la población (Pochettino et al., 2008). Se considera que una droga vegetal es de mala calidad botánica cuando presenta un elevado porcentaje de materia extraña (adulterantes), es decir, elementos que no forman parte de la droga vegetal definida, como fragmentos de otras especies, estructuras vegetales no autorizadas, insectos, tierra o materiales sintéticos (Organización Mundial de la Salud, 2011).

Se ha demostrado que tanto en Uruguay como en otros países de la región muchas de las plantas medicinales comercializadas incumplen con las normativas de salud, registrándose una alta proporción de muestras con este tipo de adulteraciones (Acosta et al., 2017; Cuassolo et al., 2010; Figliolo et al., 2023; Madrigal-de la Selva et al., 2019; Pochettino et al., 2008). A pesar de la importancia de realizar controles sistemáticos, en Uruguay son escasos los estudios que han evaluado la calidad botánica de las drogas vegetales comercializadas (Figliolo et al., 2023).

En Uruguay, el Decreto N.º 403/016 regula desde el año 2016 el registro y la comercialización de hierbas medicinales y drogas vegetales (Uruguay, 2016). En su Anexo II, este decreto establece que los análisis de calidad deben basarse en monografías y fuentes reconocidas internacionalmente, entre las que se incluyen la Farmacopea Europea, la Farmacopea Argentina, la Farmacopea Brasileña, así como otras referencias técnicas como las monografías de la OMS. Según el Ministerio de Salud Pública de Uruguay (MSP), el contenido de materia extraña en una droga vegetal no debe superar el 2 % masa/masa (Uruguay, 2018). Esta materia extraña se clasifica en tres categorías: (a) partes de la misma planta no especificadas en la monografía de referencia o que superan los límites establecidos; (b) elementos vegetales ajenos a la especie definida como droga vegetal; y (c) impurezas de origen mineral o contaminantes no relacionados (Organización Mundial de la Salud, 2011). Entre las adulteraciones más frecuentes reportadas se encuentran fragmentos de otras plantas (como hojas de Poaceae), estructuras vegetales no constitutivas de la droga, insectos, tierra, plástico y moho (Acosta et al., 2017; Cuassolo et al., 2010; Figliolo et al., 2023; Madrigal-de la Selva et al., 2019; Turano y Cambi, 2009).

El Laboratorio de Botánica de la Facultad de Química de la Universidad de la República (Labot, Udelar) realiza de manera rutinaria la identificación botánica y evaluación de la calidad de drogas vegetales, a solicitud de diversas empresas. Las muestras analizadas corresponden, en su mayoría, a fragmentos de plantas utilizadas para infusiones, las cuales pueden incluir diferentes órganos y estructuras tales como tallos, raíces, hojas, flores, inflorescencias, frutos y semillas. Entre los diferentes tipos de adulteraciones, aquellas que involucran especies del mismo género o familia que la declarada en la droga vegetal, resultan particularmente difíciles de detectar debido a la similitud morfoanatómica entre los taxones implicados (Figliolo et al., 2023; Molinelli et al., 2014). En la experiencia del Labot (Udelar) este tipo de adulteraciones ha sido frecuentemente observado en los últimos diez años, especialmente en ciertas familias como Apiaceae, Malvaceae y Asteraceae.

Por ese motivo, para este trabajo se seleccionaron algunos casos representativos, que se analizaron en detalle con el objetivo de caracterizar los elementos diagnósticos necesarios para su correcta identificación, lo cual podría contribuir a mejorar los criterios de control de calidad en el país. Así, este estudio tiene como objetivo principal determinar la calidad botánica de las drogas vegetales utilizadas por empresas y laboratorios

de Uruguay durante 2023, enfocándose particularmente en las adulteraciones más frecuentes encontradas en estos productos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Muestras analizadas

Las muestras procedieron de seis empresas en el ramo de alimentos y medicamentos con domicilio en Montevideo, Uruguay. Fueron entregadas como materia prima o como material ya envasado pronto para el consumo. Para su análisis, se siguió la metodología sugerida en el Decreto 289/018 del MSP (Uruguay, 2018). Se realizó el cuarteo de las muestras para proceder con el análisis organoléptico, macroscópico y microscópico. Todos los materiales fueron pesados en su totalidad utilizando una balanza digital RADWAG modelo WTC 200, con una sensibilidad de 0,001 g. Posteriormente, los elementos extraños separados fueron pesados con la misma balanza, registrándose su masa en gramos.

Caracterización organoléptica y macroscópica

En el caso de muestras simples (es decir, aquellas correspondientes a una única especie vegetal), el análisis se inició con la caracterización organoléptica de los fragmentos, evaluando atributos como el color, la consistencia y el olor (Organización Mundial de la Salud, 2011). A continuación, se procedió a la separación de fragmentos que por sus caracteres morfoanatómicos podrían corresponder a la droga vegetal, utilizando una lupa estereoscópica (Bausch & Lomb, 10× a 30×). Paralelamente, se aislaron aquellos fragmentos que presentaban características no compatibles con la droga, tales como estructuras vegetales ajenas, insectos, hongos, plásticos u otros contaminantes visibles, los cuales fueron considerados posibles adulterantes.

Para las muestras complejas (mezclas que contenían más de una especie vegetal), se realizó la separación de los distintos fragmentos utilizando también una lupa estereoscópica (Bausch & Lomb, 10× a 30×), con el fin de analizarlos individualmente. Los materiales vegetales fueron diferenciados en función de atributos morfológicos como forma, color, tamaño, pilosidad y brillo, entre otros. Los fragmentos considerados como posibles adulterantes fueron igualmente aislados. El análisis se realizó sobre las muestras tal como fueron entregadas, y los elementos considerados adulterantes se registraron para la muestra comercial, sin asociarlos necesariamente a una de las especies declaradas para la mezcla.

Análisis microscópico

Para la observación de caracteres superficiales (tricomas, estomas, papilas) se realizaron diafanizados, utilizando lactofenol como agente aclarante. La solución de lactofenol se preparó siguiendo el procedimiento de D'Ambrogio de Argüeso (1986). Para la observación de la anatomía interna de estructuras vegetales (tejidos conductores,

estructuras secretoras internas, idioblastos) se realizaron cortes transversales y paradermales a mano alzada. Las secciones vegetales se colocaron en portaobjetos, utilizando lactofenol o agua como medio de montaje, y se cubrieron con cubreobjetos. Todos los preparados se observaron en microscopio óptico (Nikon, modelo Eclipse Si RS trinocular, aumentos x4, 10, 40 y 60), acoplado a un kit de polarización simple y a una cámara digital en color para microscopía (AmScope, modelo MU-853B). Las micrografías obtenidas fueron procesadas utilizando el software AmScope, proporcionado por el mismo fabricante.

La identificación se realizó utilizando monografías de referencia (por ejemplo, Cañigueral et al., 1998), patrones aportados por las empresas solicitantes del análisis y materiales de referencia disponibles en el Labot (catálogo de muestras previamente identificadas por investigadores del laboratorio).

Asignación de la calidad de las muestras y registro

Para determinar la calidad botánica de las muestras, se tomó como referencia el Decreto 289/018 del MSP, que establece que el porcentaje de elementos extraños no debe ser superior al 2 % de la masa muestreada, salvo indicación contraria (Organización Mundial de la Salud, 2011). En este estudio, se consideró que una muestra era de calidad aceptable cuando el contenido de elementos extraños era igual o inferior al 2 % en masa. Las muestras con un contenido superior fueron clasificadas como no aceptables. No se establecieron subcategorías adicionales de calidad.

Se elaboró el Registro de Asesoramientos, en el cual se documentó cada muestra analizada registrando: número de muestra, empresa solicitante, origen de la muestra y resultado del análisis, indicando estado de la muestra, calidad y presencia de adulterantes en los casos en que correspondiera. Además, para aquellas muestras que el resultado del análisis no fue aceptable, se analizaron las causas, estableciéndose 6 categorías para contabilizarlas: 1) adulteración con la misma especie, 2) adulteración con otra especie, 3) adulteración con la misma especie y adulteración con otra especie simultáneamente, 4) presencia de insectos, hongos, gramíneas o material inorgánico, 5) adulteración con la misma especie y presencia de insectos, hongos, gramíneas o material inorgánico simultáneamente, y 6) especie incorrecta. La organización y el procesamiento de estos datos se llevaron a cabo mediante planillas electrónicas.

Adulteraciones con otras especies con caracteres morfoanatómicos similares

Los casos donde se detectaron adulteraciones con otras especies que presentaban caracteres morfoanatómicos similares a los de la especie declarada en la droga vegetal fueron objeto de un análisis más detallado. Este tipo de adulteración suele ocurrir cuando el adulterante comparte unidades de clasificación (como familia o género) con la especie declarada, lo cual dificulta su diferenciación, especialmente en materiales fragmentados. Se seleccionaron para este trabajo aquellas adulteraciones que, según la experiencia acumulada en el laboratorio durante los últimos diez años, se presentan con mayor frecuencia en muestras comerciales. En particular, se analizaron adulteraciones

entre las siguientes especies: 1) anís (*Pimpinella anisum* L., Apiaceae) e hinojo (*Foeniculum vulgare* Mill., Apiaceae); 2) especies de tilos (*Tilia* sp., Malvaceae); 3) manzanilla (*Matricaria chamomilla* L., Asteraceae) y marcela (*Achyrocline satureioides* (Lam.) DC., Asteraceae).

Las muestras de hojas de *Tilia cordata* Mill. (Malvaceae), utilizadas para mostrar las diferencias anatómicas con las otras especies de *Tilia*, se obtuvieron del catálogo de patrones del Labot. En particular se eligió a *Tilia cordata* como patrón por ser una de las especies aceptadas por la Farmacopea Europea.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Frecuencia de análisis de drogas vegetales

Durante el año 2023 se recibieron 42 solicitudes de análisis de drogas vegetales, correspondientes a 41 muestras simples y una mezcla compuesta por 8 especies distintas. Del total de drogas vegetales analizadas, las hojas de menta (*Mentha × piperita* L., Lamiaceae) fueron las más frecuentes, con 8 muestras recibidas (18 %), seguidas por los capítulos florales de manzanilla (*Matricaria chamomilla* L., Asteraceae), con 7 muestras (16 %), y las hojas de té (*Camellia sinensis* (L.) Kuntze, Teaceae), con cuatro muestras (9 %) (Figura 1). El restante 57 % de los materiales analizados correspondió a 17 especies, de las cuales se recibieron tres muestras en cuatro especies, dos muestras en cuatro especies y una muestra en nueve especies.

En el caso del té, se analizaron conjuntamente hojas sometidas a distintos procesos de oxidación y estacionamiento, correspondientes a té verde, té negro y té rojo. La única muestra considerada de calidad no aceptable, correspondiente a té negro, presentó una elevada proporción de tallos. Tanto el té negro como el té rojo se someten a procesos de oxidación más prolongados que el té verde (Valenzuela, 2004), lo que podría explicar una mayor proporción de tallos en estos tipos. Durante el procesamiento, la oxidación avanzada tiende a reducir el volumen del material vegetal asociado a las partes más blandas de las hojas, lo que resulta en una representación relativamente mayor de estructuras más resistentes, como los tallos.

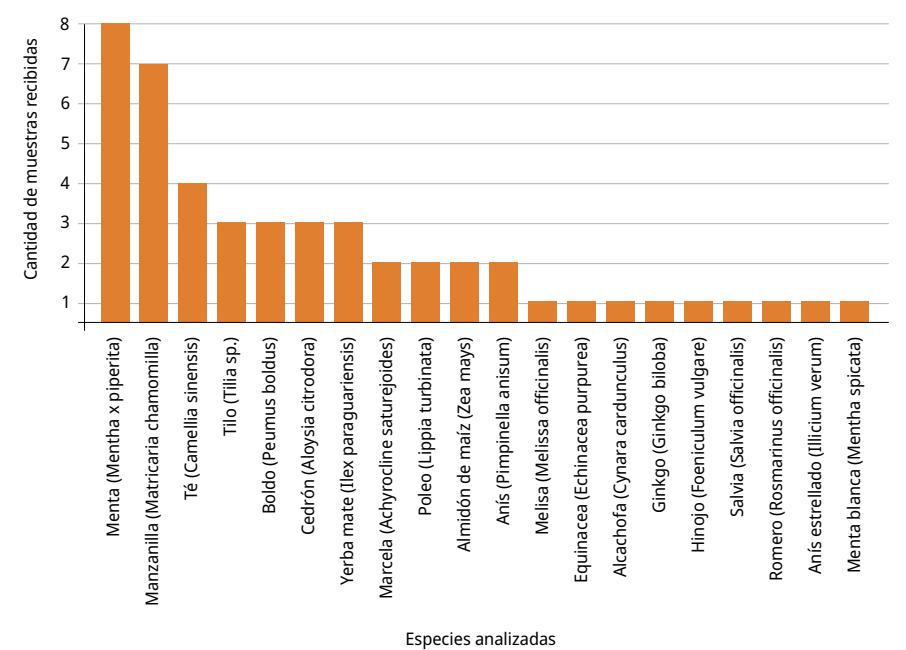


FIGURA 1. Frecuencia de análisis de drogas vegetales en 2023: cantidad de muestras analizadas en función de la especie a la que corresponden.

Calidad de las muestras

Se determinó que la mayor proporción de muestras de calidad aceptable fueron de las siguientes drogas vegetales: hojas de boldo (*Peumus boldus* Molina, Monimiaceae), hojas de cedrón (*Aloysia citrodora* Paláu, Verbenaceae) y hojas de yerba mate (*Ilex paraguariensis* A. St.-Hil., Aquifoliaceae). En los tres casos, la totalidad de las muestras analizadas (n = 3 para cada especie) presentaron un contenido de elementos extraños igual o inferior al 2 % en masa, por lo cual fueron clasificadas como de calidad aceptable.

Para las siguientes drogas vegetales: inflorescencias de tilo (*Tilia* sp., Malvaceae, n = 3) y capítulos florales de marcela (*Achyrocline saturejoides* (Lam.) DC., Asteraceae, n = 2), ninguna de las muestras recibidas fue de calidad aceptable.

En el caso del tilo, ninguna de las especies identificadas en las muestras coincidió con las especies reconocidas como medicinales en las farmacopeas. Según la Farmacopea Europea, las especies de tilo medicinales son: *Tilia cordata* Mill., *Tilia platyphyllos* Scop., *Tilia x vulgaris* Hayne y sus híbridos interespecíficos (Agencia Europea de Medicamentos, 2012). Esta adulteración podría estar relacionada con las dificultades que enfrentan algunas empresas locales para acceder o importar material vegetal perteneciente a las especies reconocidas como medicinales, recurriendo en su lugar a especies ornamentales disponibles en el mercado regional.

La identificación botánica de las muestras de *Tilia* se basó en el análisis de fragmentos de hojas nomófilas presentes entre las inflorescencias, utilizando claves dicotómicas específicas para el género (Parodi et al., 1959). Si bien las hojas nomófilas se consideran un adulterante en la droga vegetal del tilo, su presencia en las muestras es frecuente y sus caracteres anatómicos resultan útiles para la diferenciación de especies dentro

del género. En uno de los casos, la especie identificada fue *Tilia tomentosa* Moench, coincidiendo con la especie declarada por la empresa solicitante del análisis (aunque no es reconocida como medicinal en farmacopeas). En los dos casos restantes, las empresas declararon únicamente “tilo” sin especificar la especie. Los análisis permitieron identificar una mezcla de *Tilia tomentosa* y *Tilia × viridis* (Bayer) Simonk. notosubsp. *moltkei* (Dippel) Xifreda, híbrido ornamental comúnmente cultivado en espacios públicos de Argentina, país desde donde se importaron todas las muestras. Esta última entidad, antiguamente conocida como *Tilia moltkei* “Späth ex Schneider”, fue identificada en base a caracteres anatómicos de las hojas nomófilas y a la terminología taxonómica actualizada (Xifreda, 1998; Argentina, s.d.).

En el caso de la marcela (*Achyrocline saturejoides*), la principal causa por la que las muestras no fueron consideradas de calidad aceptable fue la presencia de una alta proporción de tallos, partes que no corresponden a la droga vegetal definida para esta especie. Esta situación podría explicarse por la ausencia de un proceso de separación manual de los capítulos florales respecto a otras partes aéreas de la planta antes de la molienda, posiblemente asociado al mayor costo operativo de dicha práctica.

En el caso de otras drogas vegetales, como las hojas de menta (*Mentha × piperita*) y los capítulos florales de manzanilla (*Matricaria chamomilla*), también se registraron tres muestras de calidad no aceptable para cada una. Sin embargo, estas representan únicamente el 38 % del total de muestras analizadas de menta y el 43 % en el caso de la manzanilla.

De las 42 muestras analizadas, el 69 % fueron clasificadas como de calidad aceptable. La causa más frecuente de no conformidad fue la adulteración con estructuras vegetales de la misma especie que no forman parte de la droga vegetal, como tallos u hojas nomófilas (Figura 2). Este tipo de adulteración se registró en el 60 % de las muestras no aceptables, pudiendo estar presente de forma exclusiva o junto con otros tipos de adulterantes. En orden decreciente, las causas más frecuentes de adulteración fueron: (1) estructuras vegetales de la misma especie no pertenecientes a la droga vegetal definida, (2) esta misma adulteración combinada con la presencia de insectos, hongos, gramíneas o material inorgánico, y (3) el uso de especies incorrectas. Esta distribución se presenta en la Figura 2, donde se grafican las categorías de causas de mala calidad de las muestras según su proporción relativa.

La alta frecuencia de la primera categoría podría explicarse por las dificultades logísticas en el manejo poscosecha de las plantas recolectadas, que muchas veces impiden separar eficientemente los órganos deseados, y por el interés en reducir los costos asociados al procesamiento. Además, debe considerarse que la mayoría de las drogas vegetales se comercializan fragmentadas, lo cual dificulta la detección visual de partes no constitutivas de la droga cuando se encuentran en proporciones reducidas, aunque superiores al umbral del 2 %. Este hallazgo coincide con lo reportado por Figliolo et al. (2023), quienes identificaron este tipo de adulteración como el principal problema de calidad botánica. Por su parte, otros estudios han señalado que las adulteraciones más comunes en plantas medicinales incluyen la presencia de materiales inorgánicos, insectos, y estructuras pertenecientes a especies vegetales diferentes (Acosta et al., 2017; Cuassolo et al., 2010; Madrigal-de la Selva et al., 2019; Turano y Cambi, 2009).

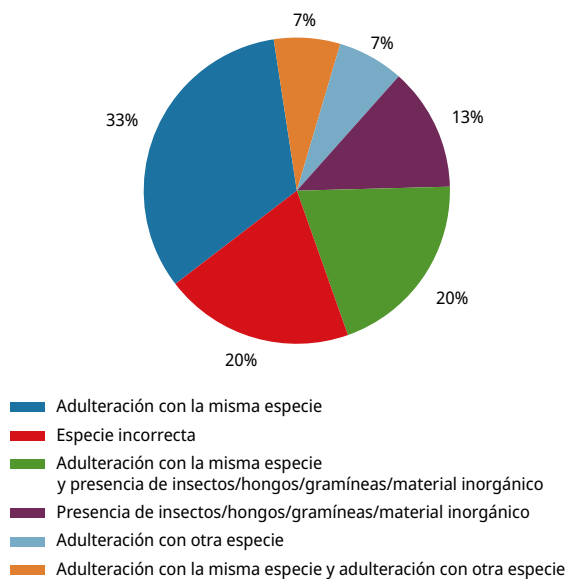


FIGURA 2. Causas de muestras no aceptables.

Casos de adulteración con otra especie de caracteres morfoanatómicos similares

Anís e hinojo

Tanto para el hinojo (*Foeniculum vulgare* Mill., Apiaceae) como para el anís (*Pimpinella anisum* L., Apiaceae), la droga vegetal corresponde a los frutos, los cuales son esquizocarpos formados por dos mericarpos (Cañigual et al., 1998). Los esquizocarpos del hinojo son de una longitud aproximada de 3,0 a 12 mm, con un color que va desde verde amarillento hasta amarillo-parduzco. Carecen de pubescencia y presentan costillas prominentes (Cañigual et al., 1998). En el caso del anís, los esquizocarpos miden aproximadamente 2,5 a 3,0 mm de largo, tienen una forma piriforme invertida y un color que varía de gris verdoso a pardo-grisáceo. Son finamente pubescentes, ligeramente comprimidos lateralmente y presentan finas costillas (Cañigual et al., 1998). Al comparar ambas especies, los frutos enteros pueden diferenciarse macroscópicamente por su forma, tamaño y color.

Para la identificación botánica de los frutos fragmentados de hinojo y anís, se observaron diferencias en la anatomía del epicarpo y del mesocarpo, particularmente en la disposición y el tamaño de las vitas y costillas. En las secciones transversales de los frutos de hinojo se observaron dos mericarpos, cada uno con un epicarpo compuesto por una epidermis externa glabra, y un mesocarpo que presentaba cinco costillas prominentes y seis vitas de gran tamaño (Figura 3A), en concordancia con las descripciones de Bercu y Broască (2012) y Kljuykov et al. (2021). En las secciones transversales de los frutos de anís (Figuras 3B y 3C), también se identificaron dos mericarpos, con un epicarpo que presentaba una epidermis externa provista de numerosas papilas y pelos no glandulares, cortos y unicelulares. El mesocarpo contenía

múltiples vitas y costillas de menor tamaño que el hinojo, tal como fue descrito por Bercu y Broască (2012) y Kljuykov et al. (2021).

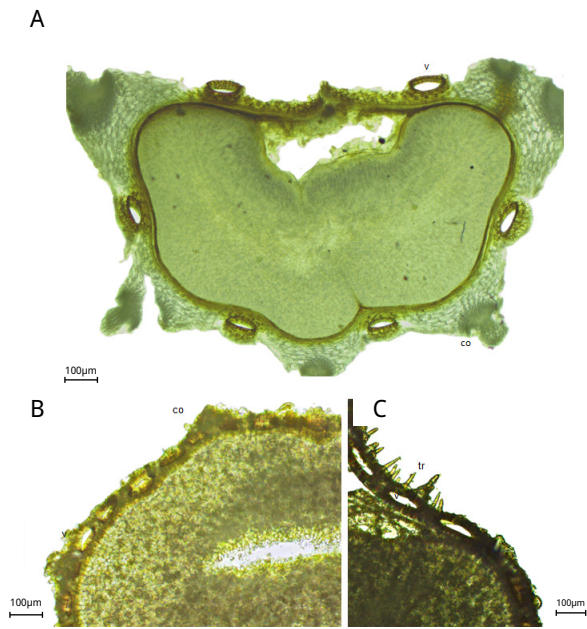


FIGURA 3. A) Corte transversal de uno de los mericarpos del fruto de *Foeniculum vulgare*. Se observan seis vitas grandes y elípticas entre las costillas. B) Corte transversal de uno de los mericarpos del fruto de *Pimpinella anisum*. Se observan numerosas vitas en la parte dorsal del mesocarpo. C) Detalle de los tricomas no glandulares en el epicarpo de *Pimpinella anisum*; co: costilla, tr: tricomas de recubrimiento, v: vita.

Tilo

Se determinó que ninguna de las muestras de tilo analizadas correspondía con las especies de *Tilia* reconocidas por las farmacopeas. El análisis de los caracteres superficiales de las hojas de *Tilia* permite diferenciar entre las distintas especies del género (Parodi et al., 1959; Ramírez-Díaz et al., 2024; Strelnikov y Gürdal, 2024). Las hojas nomófilas no son parte de la droga vegetal, pero aportan información valiosa en la determinación de la especie. En una de las muestras la especie identificada fue *Tilia tomentosa*, mientras que en los dos casos restantes se determinó que las muestras eran una mezcla de *Tilia tomentosa* y *Tilia x viridis* notosubsp. *moltkei*. Ninguna de estas especies es reconocida como medicinal por las monografías de referencia para especies medicinales de *Tilia* (Agencia Europea de Medicamentos, 2012; Cañigueral et al., 1998). En particular, para *Tilia tomentosa* hay recomendaciones de no utilizar sus inflorescencias en medicina humana (Parodi et al., 1959), y sin embargo es una especie muy usada de forma popular como planta medicinal (Mitrović et al., 2023; Paniagua-Zambrana et al., 2024; Strelnikov y Gürdal, 2024).

En el envés de las hojas nomófilas de *Tilia tomentosa* se observaron tricomas estrellados pluricelulares de varias ramas en una alta densidad, dispersos por toda

la epidermis (Figura 4A). Para *Tilia* × *viridis* notosubsp. *moltkei* también se registraron tricomas estrellados en el envés de las hojas nomófilas; sin embargo, su distribución se encontró restringida a las regiones de la epidermis que se ubican sobre las nervaduras (Figura 4B y 4C). Las imágenes correspondientes a estas tres muestras fueron tomadas a partir del material analizado en este estudio. En el caso de *Tilia cordata*, no se observaron tricomas estrellados en el envés de las hojas nomófilas (Figura 4D); esta microfotografía se obtuvo a partir de una muestra patrón, previamente identificada y conservada como material de referencia en el laboratorio.

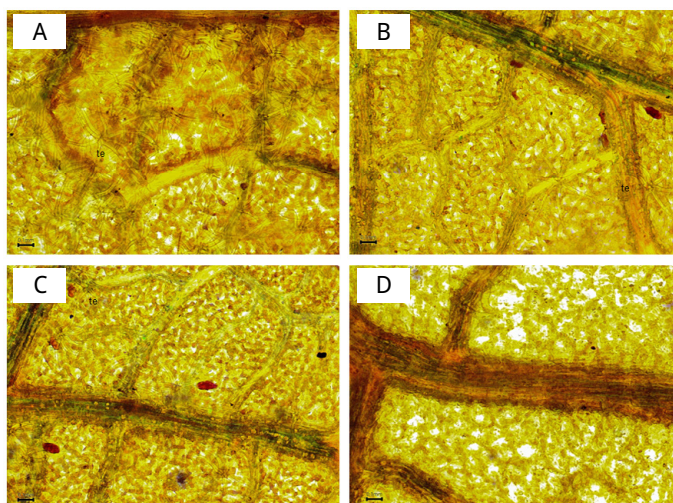


FIGURA 4. Micrografías del envés de las hojas nomófilas de: A) *Tilia tomentosa*, B) y C) Para *Tilia* × *viridis* notosubsp. *moltkei*, D) *Tilia cordata*. te: tricoma estrellado.

Marcela y manzanilla

En muestras de marcela (*Achyrocline saturejoides*) se encontraron fragmentos de inflorescencias correspondientes a manzanilla (*Matricaria chamomilla*), evidenciando una adulteración. Esta se determinó mediante el análisis comparativo de las características morfoanatómicas de las estructuras florales de ambas especies. En la marcela se observaron filarias (brácteas presentes en los capítulos florales) lanceoladas, de entre 2,0 y 5,5 mm de longitud, ápice obtuso, margen entero, y base densamente cubierta por numerosos tricomas de recubrimiento flageliformes, además de escasos tricomas glandulares pluricelulares biseriados (Figura 5A y Figura 6), coincidiendo con la descripción de Gattuso et al. (2008) y de Giangualani (1976). En contraste, la manzanilla presentó filarias oblongas, de entre 1,5 y 3,0 mm de longitud, con la zona central engrosada, ápice obtuso, margen entero y la base desprovista de tricomas de recubrimiento (Figura 5B), en concordancia con lo reportado por Amat (1982). Asimismo, se detectaron en las muestras de marcela flores tubulosas hermafroditas, de color amarillo y limbo campanulado, características de *M. chamomilla* (Figura 7).

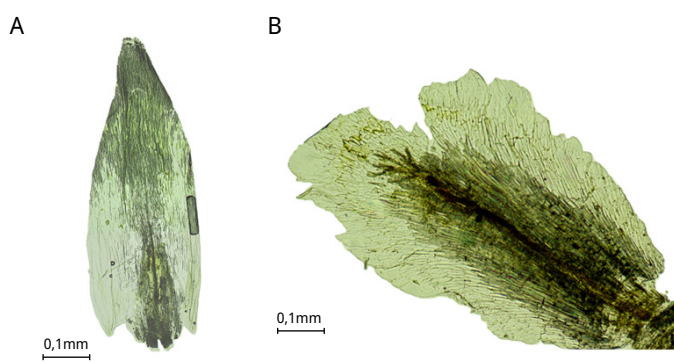


FIGURA 5. A) Filaria de *Achyrocline saturejoides*; B) Filaria de *Matricaria chamomilla*.

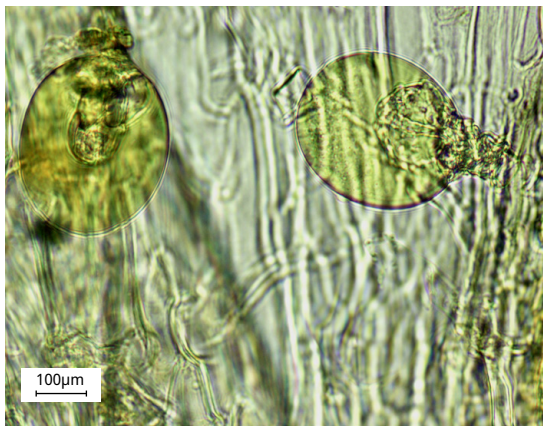


FIGURA 6. Tricomas glandulares pluricelulares biseriados de *Achyrocline saturejoides*.



FIGURA 7. Flor tubulosa de *Matricaria chamomilla*.

CONCLUSIONES

Este estudio permitió recopilar y analizar información sobre las drogas vegetales registradas en Uruguay ante el MSP. Los resultados revelan que un porcentaje considerable de las muestras analizadas (31 %) no cumple con los criterios de calidad botánica establecidos en las normas de referencia, lo que evidencia la necesidad de revisar y actualizar la normativa vigente.

Se destaca la relevancia de evaluar la calidad de las drogas vegetales comercializadas en el país, dado que este tipo de análisis es esencial no solo para asegurar el cumplimiento regulatorio, sino también para proteger la salud pública, garantizar la eficacia terapéutica de los productos y fomentar prácticas sostenibles en la industria farmacéutica. La presencia de adulteraciones compromete la calidad y la efectividad de los tratamientos, y puede exponer a los consumidores a sustancias no identificadas o potencialmente peligrosas.

En este contexto, se entiende que resulta necesario fortalecer los mecanismos de control de calidad y regulación, con el fin de asegurar la autenticidad, seguridad y eficacia de las drogas vegetales disponibles en el mercado.

REFERENCIAS

- Acosta, M.E.; Ladio, A.H. y Vignale, N.D., 2017. Plantas medicinales comercializadas en la ciudad de San Salvador de Jujuy (Argentina) y su calidad botánica. En: *Boletín Latinoamericano y del Caribe de Plantas Medicinales y Aromáticas*, 16(1), pp. 34-52.
- Agencia Europea de Medicamentos, 2012. Assessment report on *Tilia cordata* Miller, *Tilia platyphyllos* Scop., *Tilia x vulgaris* Heyne or their mixtures, flos [En línea]. Ámsterdam: Agencia Europea de Medicamentos. [Consulta: 10 de febrero de 2025]. Disponible en: https://www.ema.europa.eu/en/documents/herbal-report/final-assessment-report-tilia-cordata-miller-tilia-platyphyllos-scop-tilia-x-vulgaris-heyne-their_en.pdf
- Amat, A.G., 1982. Morfología y anatomía comparadas de *Chamaemelum nobile* (L.) All., *Chamomilla recutita* L. Rausch. y especies adulterantes. En: *Acta Farmaceutica Bonaerense*, 1(2), pp. 81-94.
- Argentina. Gobierno de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires, s.d. *Tilo* [En Línea]. Buenos Aires: Gobierno de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires. [Consulta: 10 de febrero de 2025]. Disponible en: <https://buenosaires.gob.ar/espaciopublicoehigieneurbana/gestion-comunal/arbopedia/tilo>.
- Bercu, R. y Broască, L., 2012. Comparative histoanatomical aspects of the fruit of some apiaceae lindl. fruit used for therapeutic purposes. En: *Annals of the Romanian Society for Cell Biology*, 7(1), pp. 267-271.
- Cañigueral, S.; Dellacassa, E. y Bandoni, A.L., 2003. Plantas Medicinales y Fitoterapia: indicadores de dependencia o factores de desarrollo. En: *Acta Farmacéutica Bonaerense*, 22(3), pp. 265-279.
- Cañigueral, S.; Vila, R. y Wichtl, M., 1998. *Plantas medicinales y drogas vegetales: para infusión y tisana: un manual de base científica para farmacéuticos y médicos*. Milán: OEMF International. ISBN: 88-7076-216-5.

- Cuassolo, F.; Ladio, A. y Ezcurra, C., 2010. Aspectos de la comercialización y control de calidad de las plantas medicinales más vendidas en una comunidad urbana del NO de la Patagonia Argentina. En: *Boletín Latinoamericano y del Caribe de Plantas Medicinales y Aromáticas*, 9(3), pp. 165–176.
- D'Ambrogio de Argüeso, A., 1986. *Manual de técnicas en histología vegetal*. Hemisferio Sur: Buenos Aires, Argentina.
- Figliolo, R.; Besil, N.; Luz-Graña, C.D.; Martínez, G.; Porley, G.; Borghini, I.M.; Cesio, V. y Heinzen, H., 2023. Control de calidad preliminar de hierbas in natura comercializadas en Uruguay. Casos de estudio: manzanilla, marcela y tilo. En: *INNOTEC* (26 jul-dic), e643. DOI: <https://doi.org/10.26461/26.05>
- Gattuso, M.; Cortadi, A.; Rodríguez, M.V.; Mc Cargo, J.; Retta, D.; Bandoni, A.; Ferraro, G. y Gattuso, S., 2008. Caracteres florales en la identificación de *Achyrocline satureioides*, *Achyrocline flaccida* y *Gnaphalium gaudichaudianum* (Asteraceae-Inuleae). En: *Boletín Latinoamericano y del Caribe de Plantas Medicinales y Aromáticas*, 7(5), pp. 247-256.
- Giangualani, R. N., 1976. Las especies argentinas del género *Achyrocline* (Compositae). En: *Darwiniana*, 20(3-4), pp. 549–576.
- Jiménez, A., 1992. *El libro verde; guía de recursos terapéuticos vegetales*. Lima: Instituto Nacional de Medicina Tradicional.
- Kljuykov, E.V.; Zakharova, E.A.; Ostroumova, T.A. y Tilney, P.M., 2021. Most important carpological anatomical characters in the taxonomy of Apiaceae. En: *Botanical Journal of the Linnean Society*, 195(3), pp. 532-544.
DOI: <https://doi.org/10.1093/botlinnean/boaa082>
- Madrigal-de la Selva, M.; Mata-Monge, A.; González-Suarez, S. y Alfaro-Mora, R., 2019. Adulterantes presentes en plantas medicinales de mercados municipales en Costa Rica. En: *Revista Colombiana de Ciencias Químico-Farmacéuticas*, 48(2), pp. 385–395.
- Mitrović, M.; Kostić, O.; Miletić, Z.; Marković, M.; Radulović, N.; Sekulić, D.; Jarić, S. y Pavlović, P., 2023. Bioaccumulation of potentially toxic elements in *tilia tomentosa* moench trees from urban parks and potential health risks from using leaves and flowers for medicinal purposes. En: *Forests*, 14(11), pp. 2204 - 2222.
DOI: <https://doi.org/10.3390/f14112204>
- Molinelli, M.L.; Perissé, P.; Fuentes, E. y Planchuelo, A.M., 2014. Calidad botánica de drogas crudas comercializadas como "canchalagua" en Córdoba, Argentina. En: *Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica*, 49(2), pp. 293-316.
- Organización Mundial de la Salud, 2002. *Estrategia de la OMS sobre medicina tradicional 2002-2005* (WHO/EDM/TRM/2002.1) [En Línea]. Ginebra: OMS. [Consulta: 07 de mayo de 2025]. Disponible en: <https://iris.who.int/handle/10665/67314>
- Organización Mundial de la Salud, 2011. *Quality control methods for herbal materials*. Ginebra: OMS.
- Paniagua-Zambrana, N.Y.; Bussmann, R.W. y Kikvidze, Z., 2024. *Tilia cordata* Mill. *Tilia platyphyllos* Scop. *Tilia tomentosa* Moench Malvaceae. En: Bussmann, R.W.; Paniagua-Zambrana, N.Y. y Kikvidze, Z., eds. *Ethnobotany of the mountain regions of Eastern Europe: Carpathians*. Cham: Springer Nature. pp. 1–15.
ISBN: 978-3-030-98744-2. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-98744-2_285-1

- Parodi, L.R.; Burkart, A.E.; Dimitri, M.J.; Costa, C.A.; La Porte, J.; Correa, M.N.; Soriano, A.; Agrasar, R.J.; Barret, W.H. y Bellón, C.A., 1959. *Enciclopedia argentina de agricultura y jardinería*, 1(2). Buenos Aires: Editorial ACME.
- Petrovska, B.B., 2012. Historical review of medicinal plants' usage. En: *Pharmacognosy Reviews*, 6(11), pp. 1-5. DOI: <https://dx.doi.org/10.4103/0973-7847.95849>
- Pochettino, M.L.; Arenas, P.; Sánchez, D. y Correa, R., 2008. Conocimiento botánico tradicional, circulación comercial y consumo de plantas medicinales en un área urbana de Argentina. En: *Boletín Latinoamericano y del Caribe de Plantas Medicinales y Aromáticas*, 7(3), pp. 141-148.
- Ramírez-Díaz, M.; Gutiérrez, J. y Terrazas, T., 2024. Leaf architecture and anatomy of eight species of *Tilia* (Malvaceae). En: *Acta Botánica Mexicana*, 131, e2332. DOI: <https://doi.org/10.21829/abm131.2024.2332>
- Strelnikov, B.G. y Gürdal, B., 2024. Anatomy and micromorphology of *Tilia* species from Turkey and its taxonomic implication. En: *Microscopy Research and Technique*, 87(11), pp. 2625–2635. DOI: <https://doi.org/10.1002/jemt.24634>
- Tabakián, G., 2017. Etnomedicina y Etnobotánica en el departamento de Tacuarembó, Uruguay. En: *Revista Uruguaya de Antropología y Etnografía*, 2(2), pp. 61–72. DOI: <https://doi.org/10.29112/2.2.4>
- Tabakian, G., 2019. Estudio comparativo de plantas medicinales vinculadas a tradiciones indígenas y europeas en Uruguay. En: *Bonplandia*, 28(2), pp. 135-158.
- Turano, F.A. y Cambi, V.N., 2009. Control de calidad de mezclas de hierbas medicinales que se comercializan como adelgazantes y/o reductoras en Bahía Blanca, Argentina. En: *Latin American Journal of Pharmacy*, 28(1), pp. 10–18.
- Uruguay. Decreto 403/016, de 19 de diciembre de 2016. *Diario Oficial* [En línea], 29 de diciembre de 2016. [Consulta: 10 de febrero de 2025]. Disponible en: <https://www.impo.com.uy/bases/decretos-originales/403-2016>
- Uruguay. Decreto 289/018, de 10 de septiembre de 2018. *Diario Oficial* [En línea], 19 de septiembre de 2018. [Consulta: 10 de febrero de 2025]. Disponible en: <https://www.impo.com.uy/bases/decretos/289-2018>
- Valenzuela, B., 2004. El consumo de té y la salud: características y propiedades benéficas de esta bebida milenaria. En: *Revista Chilena de Nutrición*, 31(2), pp. 72-82.
- Xifreda, Cecilia C., 1998. Publicación válida, tipificación y jerarquía notosubespecífica para *Tilia Xmoltei* (Tiliaceae). En: *Darwiniana*, 35(1-4), pp. 147-150.

Inventario de cesio-137 y plomo-210 en suelos de referencia del centro-oeste de Uruguay: base para estudios de erosión y vigilancia radiológica

Inventory of cesium-137 and lead-210 in reference soils from the center-west of Uruguay: baseline for erosion studies and radiological monitoring

Inventário de césio-137 e chumbo-210 em solos de referência do centro-oeste do Uruguai: base para estudos de erosão e monitoramento radiológico

 **MARCOS TASSANO** (1)

 **PABLO CABRAL** (1)

 **MIREL CABRERA** (1)

(1) Laboratorio de Radioquímica, Centro de Investigaciones Nucleares, Facultad de Ciencias, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay.

RECIBIDO: 19/5/2025 → APROBADO: 16/6/2025 ✉ marcos.tassano@fcien.edu.uy

RESUMEN

Este trabajo caracteriza los niveles de inventario, concentración y distribución vertical de ^{137}Cs y $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ en suelos de referencia en Uruguay para establecer una línea base que soporte futuras investigaciones sobre erosión y vigilancia radiológica. Se estudiaron siete sitios distribuidos desde el sur (Colonia) hasta el norte (Rivera), cubriendo un gradiente climático representativo. Los inventarios de ^{137}Cs resultaron homogéneos espacialmente (357,8 a 365,4 $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}$), mostrando una alta concordancia con registros históricos de deposición atmosférica en Buenos Aires, lo que valida estos datos como referencia regional. Por el contrario, los inventarios de $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ (3973 a 8428 $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}$ en los primeros 15 cm) presentaron una fuerte correlación positiva con la precipitación media anual ($R^2 = 0,92$, $p = 0,01$). Se concluye que los inventarios de ^{137}Cs pueden considerarse estables y adecuados como referencia general para estudios de erosión, mientras que para $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$, debido a su sensibilidad ambiental, es necesario determinar referencias locales específicas. Estos resultados aportan una línea base fundamental para evaluar cambios futuros en la contaminación radiológica regional derivada de eventos nucleares potenciales.

Palabras clave: vigilancia radiológica, fallout, referencia ambiental, datación sedimentaria, radionucleidos atmosféricos.

ABSTRACT

This study characterizes inventory levels, concentration, and vertical distribution of ^{137}Cs and $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ in reference soils across Uruguay, establishing a baseline for future erosion and radiological monitoring studies. Seven sites were analyzed along a climatic gradient from south (Colonia) to north (Rivera). The ^{137}Cs inventories were spatially homogeneous ($357.8 - 365.4 \text{ Bq.m}^{-2}$) and closely matched historical atmospheric deposition records from Buenos Aires, validating these as regional references. Conversely, $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ inventories ($3973 - 8428 \text{ Bq.m}^{-2}$ in the upper 15 cm) strongly correlated with mean annual precipitation ($R^2 = 0.92$, $p = 0.01$). Results indicate ^{137}Cs inventories are stable and suitable as a general reference for erosion studies, whereas local-specific references are necessary for $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ due to its environmental sensitivity. These findings provide a crucial baseline for assessing future radiological contamination from potential nuclear events in the region.

Keywords: radiological monitoring, fallout, atmospheric radionuclides, environmental baseline, sediment dating.

RESUMO

Este estudo caracteriza níveis de inventário, concentração e distribuição vertical de ^{137}Cs e $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ em solos de referência no Uruguai, estabelecendo uma linha de base para estudos futuros sobre erosão e monitoramento radiológico. Foram analisados sete locais distribuídos ao longo de um gradiente climático desde o sul (Colônia) até o norte (Rivera). Os inventários de ^{137}Cs mostraram-se homogêneos espacialmente ($357,8 - 365,4 \text{ Bq. m}^{-2}$), com alta concordância com registros históricos de deposição atmosférica em Buenos Aires, validando-os como referência regional. Por outro lado, os inventários de $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ ($3973 - 8428 \text{ Bq.m}^{-2}$ nos primeiros 15 cm) apresentaram forte correlação positiva com a precipitação média anual ($R^2 = 0,92$, $p = 0,01$). Conclui-se que os inventários de ^{137}Cs são estáveis e adequados como referência geral em estudos de erosão, enquanto para o $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ são necessárias referências locais específicas devido à sua sensibilidade ambiental. Estes resultados fornecem uma linha de base essencial para avaliar futuras contaminações radiológicas decorrentes de eventos nucleares potenciais.

Palavras-chave: monitoramento radiológico, fallout, radionuclídeos atmosféricos, linha de base ambiental, datação de sedimentos.

INTRODUCCIÓN

Los radionucleidos de deposición atmosférica incorporados al suelo principalmente mediante procesos de precipitación, como el cesio-137 (^{137}Cs , $T_{1/2} = 30$ años) y el plomo-210 (^{210}Pb , $T_{1/2} = 22.3$ años), han sido ampliamente utilizados en estudios de procesos geomorfológicos y ambientales, como la erosión del suelo y la datación de sedimentos (Cabrera et al., 2023; Chaboche et al., 2022). Su presencia en suelos y sedimentos responde a diferentes fuentes y mecanismos de transporte. Mientras que el ^{210}Pb es un radionucleido natural que ingresa de forma continua al suelo desde la atmósfera, el ^{137}Cs es un producto

de fisión liberado principalmente durante los ensayos nucleares atmosféricos realizados entre 1945 y 1980 a nivel global (Chaboche et al., 2022), así como en accidentes nucleares como los de Chernóbil (1986) y Fukushima (2011) (Imanaka et al., 2015).

Más del 90% de la energía liberada por las pruebas nucleares atmosféricas (440 megatones) se concentró en el hemisferio norte, debido principalmente a los ensayos realizados por Estados Unidos en las Islas Marshall hasta 1958, y por la ex Unión Soviética entre 1961 y 1962 en Novaya Zemlya y Semipalatinsk (UNSCEAR, 2008). La firma del Tratado de Prohibición Parcial de Ensayos Nucleares, en 1963, redujo significativamente las emisiones globales de radionucleidos artificiales al poner fin a las pruebas atmosféricas de Estados Unidos, la URSS y el Reino Unido. Francia, por su parte, inició sus pruebas en el desierto del Sahara (1960–1966), trasladándolas posteriormente al Centro de Experimentación del Pacífico (C.E.P.) en la Polinesia Francesa, donde realizó 41 detonaciones atmosféricas entre 1966 y 1974. China también llevó a cabo pruebas en Lop Nor hasta 1980 (Chaboche et al., 2022).

La dispersión de los residuos radiactivos depende del tipo de prueba, su potencia, y de la altitud y latitud de la detonación. Las partículas depositadas en la troposfera suelen tener tiempos de residencia de días y se transportan a lo largo de las trayectorias del viento dentro de su banda latitudinal (Bennett, 2002), mientras que la deposición estratosférica, principal responsable de la lluvia radioactiva global (fallout) de radionucleidos de vida larga, puede tardar entre 3 y 24 meses en alcanzar la superficie terrestre (UNSCEAR, 2000a, 2000b).

Además del ^{137}Cs , se han empleado los isótopos de plutonio, como ^{239}Pu ($T_{1/2} = 24110$ años) y ^{240}Pu ($T_{1/2} = 6561$ años), para discriminar el origen de los residuos radiactivos. Las proporciones isotópicas de $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ varían según la fuente: por ejemplo, valores entre 0.19 y 0.34 se asociaron a pruebas estadounidenses en el Pacífico, mientras que proporciones de 0.16 a 0.19 reflejan la influencia de pruebas soviéticas (Koide et al., 1985). Accidentes nucleares, como los de Chernóbil y Fukushima, suelen presentar relaciones mayores a 0.33 (Igarashi et al., 2019). En contraste, las pruebas francesas en Moruroa y Fangataufa muestran relaciones mucho más bajas, entre 0.03 y 0.07, características de dispositivos de bajo rendimiento (Hrnecek et al., 2005).

Dado que muchas de las pruebas en la Polinesia Francesa se realizaron durante el invierno austral, cuando los vientos predominantes en latitudes medias circulan de oeste a este (Cai et al., 2020), una proporción significativa del fallout troposférico se depositó sobre Sudamérica en días o semanas posteriores a las explosiones. Esta hipótesis se ve respaldada por documentos y mapas desclasificados del Ministerio de Defensa francés (Disclose et al., 2021), así como por datos de la CNEA y la Autoridad Reguladora Nuclear de Argentina sobre mediciones de fallout en aire y suelo en Buenos Aires entre 1959 y 1993 (Figura 1) (Argentina. Presidencia de la Nación. Secretaría General. Autoridad Regulatoria Nuclear, 1994; Beninson et al., 1972; Beninson et al., 1974).

En Uruguay, esta influencia quedó registrada en los sedimentos del embalse de Rincón del Bonete, donde la relación promedio $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ fue de 0.09, indicando que aproximadamente un 60% del fallout radiactivo proviene de pruebas francesas en la Polinesia (Chaboche et al., 2022).

El ^{210}Pb , por otro lado, se origina a partir de la desintegración del ^{222}Rn en la atmósfera, gas radiactivo que forma parte de la cadena de decaimiento del ^{238}U presente en suelos y

rocas. Su deposición sobre la superficie terrestre está condicionada por factores como la geología local, el régimen de precipitaciones y la ubicación geográfica (Zhang et al., 2021). En suelos y sedimentos, el ^{210}Pb se presenta en dos fracciones: una fracción soportada, en equilibrio con sus radionúclidos predecesores *in situ*, y una fracción no soportada o en exceso ($^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$), que proviene exclusivamente de la deposición atmosférica. Este último disminuye exponencialmente con la profundidad, lo que permite su uso como herramienta de datación de sedimentos recientes y como trazador del suelo superficial.

En Uruguay, diversos estudios han documentado la datación y dinámica de sedimentación en cuerpos de agua mediante $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ y ^{137}Cs (Marrero et al., 2014; Hordedaña, 2016; Azcune et al., 2020). Recientemente, Cardoso-Silva et al. (2024) reconstruyeron 90 años de impactos antrópicos en el embalse Ingeniero Maggiolo, mientras que Foucher et al. (2023) y Chaboche et al. (2022) resaltaron el valor de los isótopos de plutonio como nuevos marcadores temporales en Uruguay y la región.

En suelos, la presencia de ^{137}Cs en Uruguay ha sido documentada por el Plan de Vigilancia Radiológica Ambiental del MIEM, por el Centro de Investigaciones Nucleares de la Universidad de la República y por el Laboratorio GDMEA, CURE, Universidad de la República (Odino et al., 2017; Cabrera et al., 2023; Noguera et al., 2022). Los niveles reportados en suelos superficiales oscilaron entre 1 y 4 Bq.kg^{-1} calibrados al 2010. Se ha observado que su distribución está influenciada por el uso del suelo y las tasas de erosión: los suelos degradados presentan menores concentraciones debido a la pérdida de partículas finas, mientras que los sitios de acumulación muestran mayores contenidos (Cabrera et al., 2023). En áreas con bajo disturbio antrópico y pendientes nulas, las concentraciones de ^{137}Cs en los primeros centímetros del suelo pueden utilizarse como referencia para evaluar procesos erosivos, manteniéndose estables en el tiempo salvo por la desintegración radioactiva o nuevos ingresos atmosféricos.

Este estudio tiene como finalidad caracterizar los niveles de inventario, concentración y distribución vertical de ^{137}Cs y $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ en suelos de referencia de Uruguay, con el objetivo de establecer una línea base que sirva de soporte para futuras investigaciones sobre procesos de erosión del suelo y vigilancia radiológica.

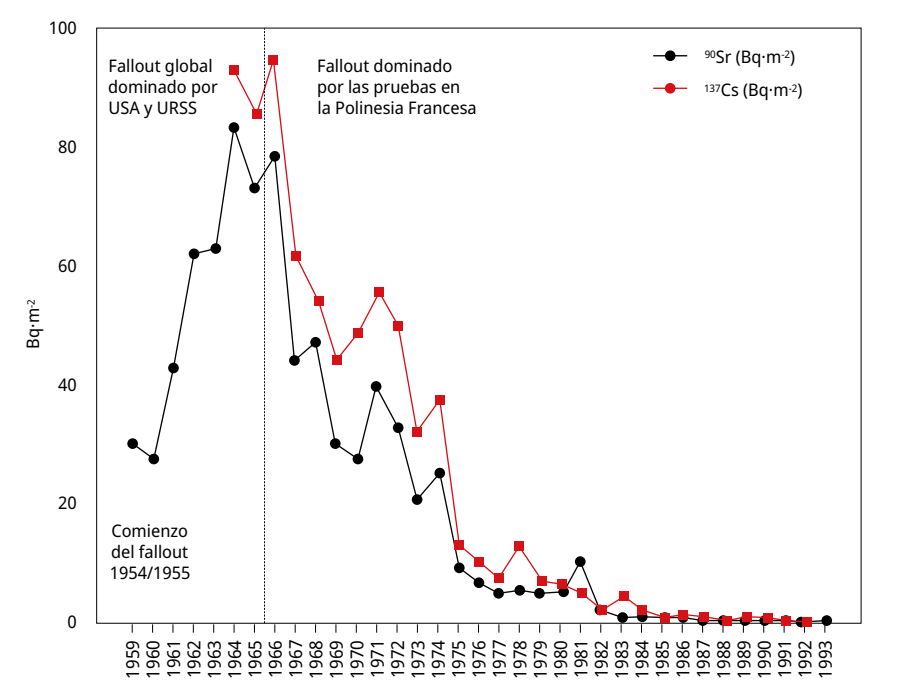


FIGURA 1. Deposición anual en base a documentos en Buenos Aires medidos a partir de 1959 para ^{90}Sr , y a partir de 1964 para ^{137}Cs , sin corrección por decaimiento.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitios referencia y muestreo

Se relevaron siete sitios considerados como referencia a lo largo de un transecto que se extiende desde el sur del país (Colonia) hasta el norte (Rivera), con una distancia promedio de 85 km entre sitios, abarcando un total de 425 km en línea recta. El muestreo fue planificado estratégicamente para seguir el gradiente de precipitaciones medias anuales (Tabla 1). Adicionalmente, se generaron curvas de nivel de precipitación media anual mediante interpolación por kriging, utilizando datos del período 1980–2009 provenientes de 50 estaciones meteorológicas distribuidas en todo el territorio nacional (Castaño et al., 2011) (Figura 4).

TABLA 1. Identificación, coordenadas, características del suelo según Soil Taxonomy (USA), fecha de muestreo y precipitaciones medias anuales en cada sitio.

Identificación	Latitud	Longitud	Unidad	Tipo de suelo	Fecha de muestreo	Precipitación media (mm.año ⁻¹)	Estación meteorológica (distancia kms)
Rivera	-31.01	-55.59	Rivera	Hapludalfs, Hapludults	2018-11-25	1605	Rivera (12)
Tacuarembó 2	-31.6	-55.85	Tres Cerros	Hapludalf, Hapludults	2018-11-25	1427	Tacuarembó (17)
Tacuarembó 1	-32.28	-56.24	Curtina	Hapludolls, Argiudolls, Haper	2018-11-25	1355	Achar (15)
Baygorria	-32.883	-56.758	Itapebi - Tres Árboles	Argiudolls y Hapluderts	2019-06-10	1322	Paso de los Toros (23)
El Perdido	-33.66	-57.19	San Gabriel - Guaycurú	Hapludolls, Argiudolls, Eutrudepts	2024-05-23	1232	Palmitas (40)
La Estanzuela	-34.34	-57.69	Ecilda Paullier - Las Brujas	Argiudolls y Hapluderts	2020-03-03	1119	La Estanzuela (1)
Nueva Helvecia	-34.33	-57.21	Ecilda Paullier - Las Brujas	Argiudolls y Hapluderts	2019-06-03	1100	

Las precipitaciones anuales fueron obtenidas en base a la estación meteorológica más cercana.

Los sitios de referencia fueron seleccionados siguiendo los siguientes criterios para asegurar condiciones representativas de mínima perturbación: (1) ausencia de pendiente; (2) localización fuera de zonas potenciales de acumulación de sedimentos; (3) ausencia de árboles o construcciones en un radio mínimo de 20 metros; (4) ausencia de laboreo reciente u otras alteraciones visibles del suelo; y (5) verificación de estabilidad histórica mediante fotografías aéreas de baja altitud tomadas en 1966, correspondientes al vuelo fotogramétrico nacional realizado entre 1966 y 1967, a una escala de 1:40.000 y altitud de vuelo de 6000 metros (Uruguay. Presidencia de la República. Infraestructura de Datos Espaciales, 2025).

Las muestras identificadas como “La Estanzuela” y “Baygorria” fueron recolectadas en el marco de los proyectos ANII FMV_1_2019_1_156244 y Fondo Conjunto Uruguay-México (AMEXCID/AUCI), respectivamente, cuyas publicaciones previas se encuentran disponibles (Quincke et al., 2024; Cabrera et al., 2023). Las muestras restantes fueron recolectadas específicamente para este estudio. En cada sitio de referencia, se extrajeron seis núcleos de suelo de hasta 40 cm de profundidad utilizando un muestreador Eijkelkamp de 5 cm de diámetro, dentro de un área de 10 × 10 m. Cada núcleo fue seccionado en intervalos de 5 cm, y las fracciones correspondientes a cada profundidad fueron posteriormente homogeneizadas. En el caso del sitio ‘Nueva Helvecia’, la muestra consistió en una única muestra compuesta que abarcó todo el perfil de 0 a 40 cm.

Procesamiento y medición

Las muestras, combinadas por incrementos de 5 cm o en el perfil completo según correspondiera a cada sitio de referencia, fueron secadas a 40 °C durante 48 horas, tamizadas con una malla de 2 mm y posteriormente homogenizadas. Para la medición de radionucleidos, las muestras secas y tamizadas fueron envasadas en contenedores tipo Marinelli de plástico (250 mL), selladas herméticamente y almacenadas durante al menos 28 días para permitir el establecimiento del equilibrio secular entre el ^{226}Ra y sus productos de decaimiento (^{222}Rn , ^{214}Pb , ^{214}Bi).

Transcurrido este período, se procedió a la medición espectrométrica de los siguientes radionucleidos mediante sus energías características de emisión gamma:

- ^{226}Ra a través de ^{214}Pb (295.2 y 351.9 keV) y ^{214}Bi (609.3 keV);
- ^{137}Cs a través de $^{137\text{m}}\text{Ba}$ (661.7 keV);
- ^{210}Pb a través de 46.5 keV.

Todas las mediciones fueron realizadas en el Laboratorio de Radioquímica del Centro de Investigaciones Nucleares, Facultad de Ciencias, Universidad de la República (Montevideo, Uruguay), utilizando detector HPGe (High Purity Germanium) Canberra, con una eficiencia de 20% a 1332 keV. El detector está instalado en el subsuelo y cuenta con blindaje compuesto por 10 cm de plomo antiguo, con revestimientos internos de cadmio (5 mm) y cobre (1 mm). El estándar utilizado fue IAEA 447. La autoabsorción de fotópico de ^{210}Pb fue corregida por el método Appleby et al. (1992).

La concentración mínima detectable (MDC) (International Atomic Energy Agency - IAEA, 1989) fue de 0.04 Bq.kg⁻¹ para ^{137}Cs y de 5 Bq.kg⁻¹ para ^{210}Pb . Con tiempos de conteo de 48 horas por muestra, se alcanzó una precisión analítica entre 5 % y 10 % para ^{137}Cs , y entre 7 % y 18 % para ^{210}Pb , con un nivel de confianza del 95 %. Todas las actividades fueron corregidas por decaimiento hasta el 1 de enero de 2020. Para calcular el $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ se resta la actividad del ^{226}Ra a la actividad total del ^{210}Pb .

Documentos históricos

Para la recopilación de datos históricos de fallout radioactivo, se utilizó como referencia la Ciudad de Buenos Aires, al ser el punto más cercano con registros sistemáticos de deposición de radionucleidos atmosféricos durante los años de interés. Para ello, se recurrió a informes de la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) y la Autoridad Reguladora Nuclear (ARN) de Argentina (Beninson et al., 1965; Argentina. Presidencia de la Nación. Secretaría General. Autoridad Reguladora Nuclear, 1994). Adicionalmente, se consultaron documentos recientemente desclasificados por el gobierno francés sobre las pruebas nucleares realizadas en la Polinesia Francesa.

Para estimar la cantidad de ^{137}Cs acumulada por fallout anterior a 1964, se utilizaron los valores acumulados de ^{90}Sr reportados para 1963 en Buenos Aires, y se aplicó la relación $^{137}\text{Cs}/^{90}\text{Sr}$, derivada tanto de fuentes bibliográficas como de reportes técnicos de la época, también se calcula en base a los datos de 1964 y 1965 tomados de ARN (Argentina. Presidencia de la Nación. Secretaría General. Autoridad Reguladora Nuclear, 1994). Esta

metodología permite una aproximación indirecta de la deposición histórica de ^{137}Cs en ausencia de datos específicos medidos *in situ* previos a 1964.

Tratamiento de datos y estadística

A partir de las concentraciones de actividad calibradas para cada radionucleido en Bq.kg^{-1} , se calculó el inventario (Bq.m^{-2}) considerando la densidad aparente (de las muestras secas y fraccionadas a <2 mm) y el espesor de cada incremento de profundidad. Los inventarios por incremento fueron posteriormente sumados para obtener el inventario total correspondiente a cada sitio de muestreo.

Para los análisis estadísticos y la visualización de los datos, se emplearon distintos paquetes del entorno Spyder v. 4.1.5 (Raybaut, 2009), un IDE orientado al análisis científico en Python v. 3.8.5 (Python Software Foundation, 2022; Hunter, 2007; McKinney, 2010; Harris et al., 2020; Virtanen et al., 2020). Asimismo, se utilizó un software de código abierto QGIS (QGIS Association, 2022) para el tratamiento de datos espaciales y la generación de mapas temáticos.

Los inventarios obtenidos fueron georreferenciados sobre un mapa base de Uruguay, junto con las curvas de nivel de precipitaciones medias anuales generadas mediante interpolación por kriging. Esta interpolación se realizó a partir de registros del período 1980–2009 correspondientes a 50 estaciones meteorológicas distribuidas a lo largo del territorio nacional (Castaño et al., 2011).

RESULTADOS

Concentración en profundidad

La Figura 2 muestra los perfiles de concentración (Bq.kg^{-1}) en función de la profundidad para los radionucleidos ^{137}Cs y $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$. En el caso del ^{137}Cs , se observa una mayor concentración en los primeros 10 cm del perfil del suelo, con valores máximos generalmente localizados entre los 5 y 10 cm de profundidad (rango: 1.0 a 4.5 Bq.kg^{-1}). A partir de esa profundidad, las concentraciones disminuyen progresivamente hasta los 25–30 cm en la mayoría de los sitios, con excepción de 'Tacuarembó 2' y 'Rivera', donde se detecta actividad hasta los 35–40 cm.

Para el $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$, se identifica un patrón típico de disminución exponencial con la profundidad, con máximos concentrados en la capa superficial de 0–5 cm, donde los valores oscilan entre 50 y 160 Bq.kg^{-1} . En todos los casos analizados, la concentración disminuye notablemente hasta los 15 cm de profundidad.

La densidad aparente del suelo (fracción <2 mm) presenta valores más bajos en la superficie, con un aumento progresivo hasta los 10 – 15 cm de profundidad, donde tiende a estabilizarse. Este comportamiento se ve alterado en los sitios 'Baygorria' y 'Tacuarembó 1', donde la presencia de elementos gruesos (>2 mm), no considerados como suelo según los criterios pedológicos estándar, disminuye la masa efectiva del suelo muestreado y, en consecuencia, afecta los valores reportados de densidad aparente.

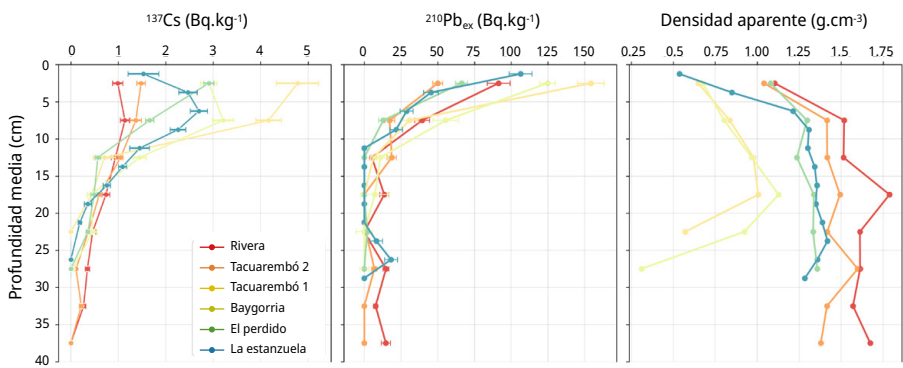


FIGURA 2. Concentraciones de radioactividad en profundidad de ^{137}Cs y $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ en conjunto con la densidad aparente del suelo (fracción <2 mm) en los sitios de estudio.

La Tabla 2 presenta los resultados de inventario (Bq.m⁻²) para cada sitio de muestreo. Para el cálculo del promedio, el desvío estándar y el coeficiente de variación, se excluyó la muestra correspondiente a “Nueva Helvecia”, con el fin de evitar un sesgo geográfico hacia el sur del país. En un segundo análisis, también se excluyó el sitio “Tacuarembó 2”, debido a evidencia de procesos de erosión del suelo, reflejados en un inventario de ^{137}Cs significativamente inferior al promedio. Esta anomalía fue corroborada mediante la prueba de Dixon ($p > 0.05$, *).

En el caso de $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$, se consideró únicamente el inventario correspondiente a los primeros 15 cm de profundidad, ya que este espesor representa, en promedio, el límite inferior de la distribución exponencial de este radionucleido en todos los perfiles analizados (ver Figura 2) (International Atomic Energy Agency - IAEA, 2014).

TABLA 2. Inventarios totales en cada punto de muestreo en conjunto con las precipitaciones medias anuales y estadística básica.

Identificación	Precipitación media (mm.año ⁻¹)	¹³⁷ Cs Bq.m ⁻² (2020)	²¹⁰ Pb _{ex} Bq.m ⁻² (15 cm)	Comentarios
Rivera	1605	365.0	8427.8	
Tacuarembó 2	1427	319.3*	5149.7	Erosión
Tacuarembó 1	1355	386.5	6586.6	
Baygorria	1322	352.0	6671.5	
El Perdido	1232	356.6	4413.0	
La Estanzuela	1119	367.1	3973.3	
Nueva Helvecia	1100	364.6	ND	
	Promedio	357.8	5870	Excluyendo
	desvío estándar	22.3	1670	Nueva Helvecia
	Coef. de variación (%)	6.2	28	
	Promedio	365.4	6014	Excluyendo
	desvío estándar	13.3	1824	Nueva Helvecia
	Coef. de variación (%)	3.6	30	y Tacuarembó 2

* test de Dixon p > 0.05.

Documentos históricos

Según el Informe N.º 149 de la CNEA (Beninson et al., 1965), la actividad acumulada de ⁹⁰Sr por fallout en Buenos Aires en 1963 fue de 11.5 mCi.km⁻², equivalente a aproximadamente 425.5 Bq.m⁻². Para estimar la deposición asociada de ¹³⁷Cs, se utilizaron las relaciones ¹³⁷Cs/⁹⁰Sr correspondientes a los años inmediatamente posteriores, 1964 y 1965, que no presentan influencia de las pruebas nucleares francesas en la Polinesia (iniciadas en 1966, ver Figura 1). Estas relaciones resultaron en 1.1 y 1.2 respectivamente, obteniéndose un valor promedio de 1.15. Aplicando este factor, y corrigiendo por decaimiento al año 2020, se estimó una deposición de ¹³⁷Cs de 132.3 Bq.m⁻² para 1963 (Tabla 3).

Complementariamente, se utilizó un segundo valor de referencia reportado por UNSCEAR (UNSCEAR, 1964), el cual indica una acumulación de ⁹⁰Sr de 8.9 mCi.km⁻² (equivalente a 329.3 Bq.m⁻²) en Buenos Aires en 1963. Considerando una relación ¹³⁷Cs/⁹⁰Sr de 1.5, también proporcionada por UNSCEAR (2000a), se estimó una deposición de ¹³⁷Cs de 133.2 Bq.m⁻², corregida al año 2020 (Tabla 3).

Asimismo, se tomó en cuenta el valor reportado por Beninson et al. (1964) para Buenos Aires en el periodo 1959–1963, que indica una relación de 1.8 ± 0.4 (Beninson et al., 1964), también incluido en los cálculos presentados en la Tabla 3.

TABLA 3. Valores acumulados de ⁹⁰Sr en el año 1963 según distintas fuentes documentales. Se incluye la relación ¹³⁷Cs/⁹⁰Sr empleada para convertir dichos valores a inventarios de ¹³⁷Cs, así como el inventario total estimado de ¹³⁷Cs (Bq.m⁻²), corregido por decaimiento al año 2020. En negrita, se destacan los valores más próximos al promedio obtenido con los sitios de muestreo del presente estudio.

Acumulado de ⁹⁰ Sr en 1963 (Bq.m ⁻²)	¹³⁷ Cs/ ⁹⁰ Sr Antes de 1966	Acumulado de ¹³⁷ Cs en 1963 (Bq.m ⁻² corr. 2020)	Inventario ¹³⁷ Cs (Bq.m ⁻² corr. 2020)
425.5 (Beninson et al., 1965)	1.15 (promedio 1964, 1965)	132.3	361.4
	1.5 (UNSCEAR 1964)	172.4	401.5
	1.8 (Beninson 1964)	207.0	436.1
329.3 (UNSCEAR 1964)	1.15 (promedio 1964, 1965)	102.3	331.4
	1.5 (UNSCEAR 1964)	133.5	362.6
	1.8 (Beninson 1964)	160.2	389.3

De los seis valores de inventario de ¹³⁷Cs estimados a partir de documentación histórica, los más cercanos al valor promedio obtenido en el presente estudio para Uruguay (365.4 Bq.m⁻²; ver Tabla 2) fueron: 361.4 Bq.m⁻², calculado a partir del informe ARN (Argentina. Presidencia de la Nación. Secretaría General. Autoridad Regulatoria Nuclear, 1994) y el Informe N.º 149 de la CNEA (Beninson et al., 1965) (ver Figura 3), y 363.6 Bq.m⁻², derivado del informe ARN (Argentina. Presidencia de la Nación. Secretaría General. Autoridad Regulatoria Nuclear, 1994) y los datos de UNSCEAR (1964). Ambos valores muestran una alta concordancia con el promedio observado en campo. Cabe señalar que los años posteriores a 1993 no se consideran relevantes en términos de aporte significativo de fallout radioactivo en esta región del mundo, al momento de la publicación del presente trabajo.

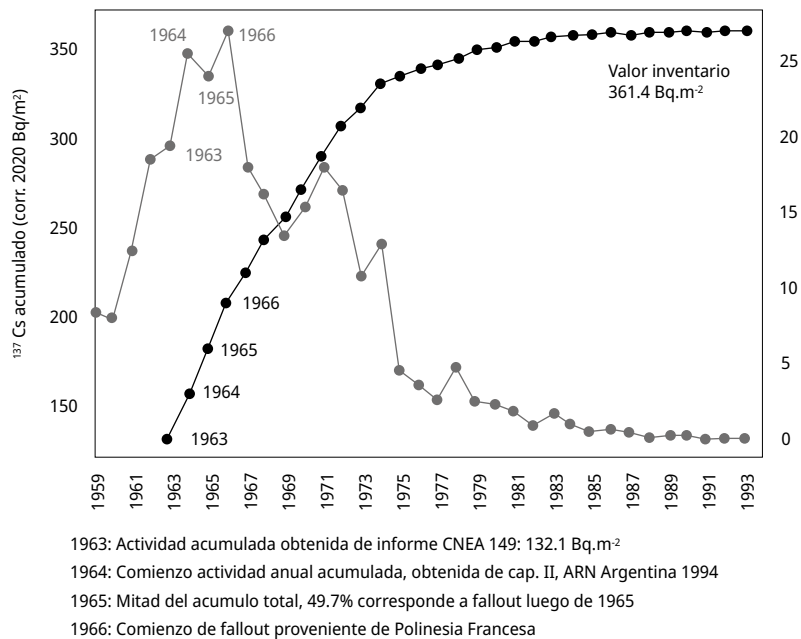


FIGURA 3. Acumulación y fallout anual de ¹³⁷Cs en base a documentos históricos en Buenos Aires, corregido por decaimiento al 2020.

Distribución espacial y relación con precipitaciones

Los inventarios de ¹³⁷Cs muestran una notable homogeneidad a nivel territorial, incluso considerando el valor estimado para el sitio “CNEA Ezeiza” en Argentina (95 km en línea recta al punto “La estanzuela”), calculado a partir de mediciones anuales y del inventario acumulado de ⁹⁰Sr en 1963 (ver Tabla 3 y Figura 3). No se observa una relación clara entre las precipitaciones medias anuales y los inventarios de ¹³⁷Cs.

En contraste, los inventarios de ²¹⁰Pb_{ex} presentan una tendencia creciente hacia el norte del país, en concordancia con el gradiente espacial de precipitaciones. Esta tendencia se refleja en una fuerte correlación lineal positiva entre precipitación media anual e inventario de ²¹⁰Pb_{ex}, con un coeficiente de determinación R²= 0.92, lo que sugiere una fuerte relación entre inventario de ²¹⁰Pb_{ex} y las condiciones climáticas locales (p = 0.01) (ver Figuras 4 y 5).

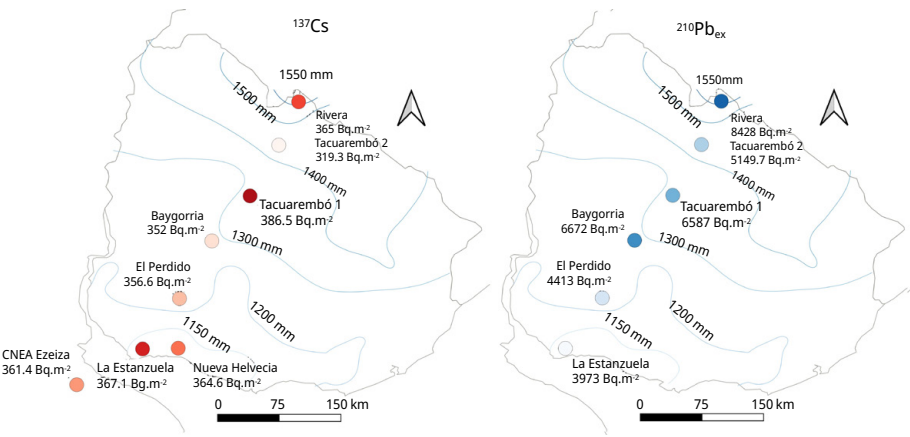


FIGURA 4. Inventarios de ^{137}Cs y $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ (Bq.m⁻²) corregido al año 2020, en conjunto con el gradiente de precipitaciones promedio en Uruguay. El inventario “CNEA Ezeiza” para ^{137}Cs , corresponde al inventario calculado en base a documentos (Tabla 3).

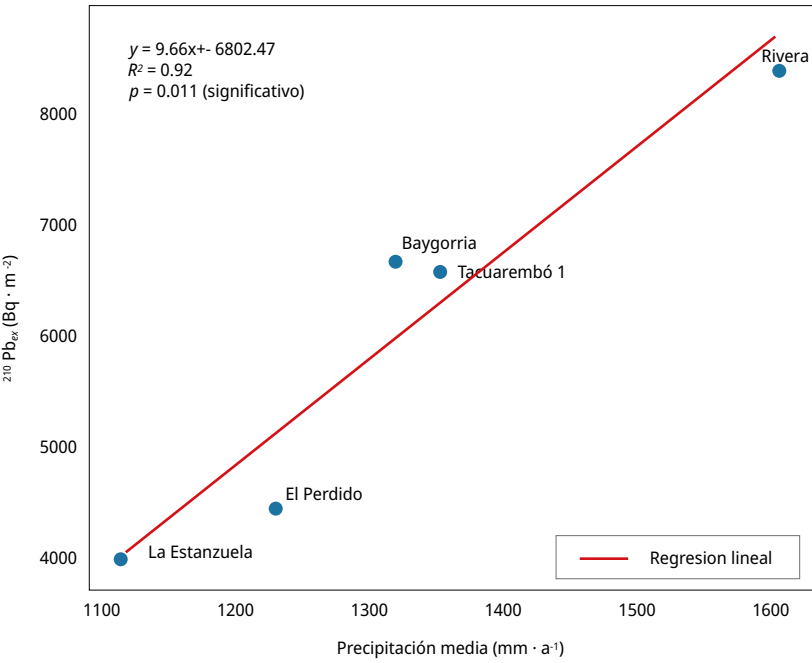


FIGURA 5. Gráfico de dispersión entre $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ (Bq.m⁻²) y precipitaciones medias anuales, en conjunto con regresión lineal, ecuación de la recta y R². Se excluye el sitio “Tacuarembó 2” por presentar signos de erosión según ^{137}Cs .

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los inventarios de ^{137}Cs determinados en suelos de referencia de Uruguay muestran una estrecha concordancia con los valores históricos reconstruidos para Buenos Aires a

partir de registros de fallout atmosférico (Argentina. Presidencia de la Nación. Secretaría General. Autoridad Regulatoria Nuclear, 1994; Beninson et al., 1965; UNSCEAR, 1964). El valor promedio observado en este estudio (365.4 Bq.m^{-2} , corregido a 2020) coincide en gran medida con los estimados documentales obtenidos mediante la relación $^{137}\text{Cs}/^{90}\text{Sr}$, lo cual refuerza la validez de utilizar datos de Buenos Aires como proxy para en Uruguay. Si bien la relación $^{137}\text{Cs}/^{90}\text{Sr}$ reportada puede ser tan variable como 1.8 para el periodo 1959-1963 según Beninson et al. (1964), 1.5 según UNSCEAR, (1964), y 1.15 según este trabajo y datos de ARN (Argentina. Presidencia de la Nación. Secretaría General. Autoridad Regulatoria Nuclear, 1994); los valores 1.15 y 1.5 parecen ser los más adecuados al compararlos con el inventario medido en los sitios de muestreo, según se tomen los datos de acumulo de ^{90}Sr en 1963 de CNEA Informe N.º 149 (Beninson et al., 1965) o (UNSCEAR, 1964) respectivamente.

Si bien el enfoque de utilizar datos históricos medidos en Buenos Aires no es novedoso (Ribeiro Guevara y Arribére, 2002), en dicho trabajo estos datos fueron empleados de manera relativa para datar perfiles sedimentarios en lagos de la Patagonia argentina, pero no se utilizaron con el objetivo de estimar el valor del inventario de ^{137}Cs en suelos.

La ausencia de incrementos entre 1986-1993 en los registros históricos de Buenos Aires, sumado a la inexistencia de aumentos de inventario detectables en muestras de suelo en este trabajo, permite descartar una contribución significativa de los eventos de Chernóbil, Fukushima o de otra clase. Este resultado es consistente con la bibliografía que documenta una mínima influencia del fallout de ambos accidentes en el hemisferio sur (UNSCEAR, 2000a, 2000b; Muramatsu et al., 2000, Ribeiro Guevara y Arribére, 2002; Dicen et al. 2025), así como con las proporciones isotópicas características de plutonio observadas en sedimentos de la región (Chaboche et al., 2022).

Además del pico principal de ^{137}Cs que abarca los años 1964 a 1966 (centrado en 1965), siendo 1964 asociado al fallout estratosférico global posterior a los ensayos de alta altitud de EE.UU. y la URSS, y 1966 asociado al fallout troposférico provenientes de los ensayos atómicos a nivel de suelo en la polinesia francesa (Disclose et al., 2021), se propone un segundo pico de menor intensidad y más "ancho" centrado en 1971, el cual está vinculado a las pruebas termonucleares de alta altitud francesas en el Pacífico en el periodo 1970-1974 (Beninson et al., 1974; Disclose et al., 2021). Este segundo pulso ha sido identificado en perfiles sedimentarios de lagos del sur de Argentina (Ribeiro Guevara y Arribére, 2002), por lo que futuras investigaciones de datación de sedimentos en Uruguay podrían confirmar su existencia y, por ende, utilizarlo como segundo pico de datación. La posibilidad de detectar este evento dependerá de la tasa de acumulación y de la resolución de muestreo del núcleo de sedimentos.

También, a partir de la acumulación de ^{137}Cs de la Figura 3 se pudo calcular el porcentaje correspondiente al fallout a partir de 1966, el cual resultó en 49.7%. Este porcentaje, corresponde predominantemente al fallout de las pruebas en la Polinesia Francesa. Esta proporción se ve respaldada por el análisis de isótopos de plutonio, que arrojó un valor de $51.3 \pm 5.1\%$ en muestras de suelo de referencia recolectadas en 1970-1971 en Buenos Aires (Chaboche et al., 2022), y de $62.2 \pm 12.2\%$ en sedimentos recolectados en 2020 en el embalse de Rincón del Bonete, Uruguay (Chaboche et al., 2022).

El valor de inventario observado en “suelos de referencia” y su baja heterogeneidad espacial en Uruguay pueden ser considerados como una línea base confiable para la vigilancia radiológica ante potenciales escenarios futuros que impliquen liberación de radionucleidos, tales como la reanudación de ensayos nucleares atmosféricos, conflictos bélicos o accidentes nucleares de escala nacional o regional. Aunque la probabilidad de estos eventos es baja, su posibilidad no puede descartarse completamente.

Un caso particular que merece atención es el de las centrales nucleares Atucha I y II, ubicadas sobre la margen del río Paraná en territorio argentino. En la región del Río de la Plata, los vientos predominantes provienen desde el noreste y el este; sin embargo, eventos meteorológicos como la “sudestada” o el “pampero” pueden generar vientos persistentes del sudeste. Bajo dichas condiciones, sería posible el transporte de contaminantes atmosféricos hacia territorio uruguayo en caso de un accidente severo en dichas instalaciones. De forma similar, la central nuclear de Angra dos Reis, ubicada en el litoral atlántico de Brasil, también representa una fuente potencial de emisión cuya influencia regional no puede descartarse bajo condiciones meteorológicas particulares.

A escala continental sudamericana, Chaboche et al. (2021) encontraron una alta relación entre latitud y precipitaciones, con los valores inventario de ^{137}Cs . En cuanto a la distribución espacial de ^{137}Cs en los sitios analizados en Uruguay, no se observó correlación con las precipitaciones medias anuales o con zonas específicas, lo cual es coherente con la escala geográfica analizada en el contexto de Sudamérica (Chaboche et al., 2021). El valor promedio de inventario determinado en este estudio puede emplearse como referencia en estudios de erosión donde no sea posible identificar sitios imperturbados, dado el bajo coeficiente de variación observado (3.6 %).

Por el contrario, los inventarios de $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ mostraron una correlación positiva y significativa ($p = 0.01$) con el gradiente de precipitaciones medias anuales ($R^2 = 0.92$), en concordancia con su mecanismo de deposición predominantemente asociado a eventos de precipitación local (Zhang et al., 2021). La alta sensibilidad del inventario de $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ frente a variables ambientales como la precipitación impide establecer un valor único y representativo para todo el país. En consecuencia, se recomienda determinar el inventario de referencia a partir de muestras colectadas específicamente en la zona de estudio, a fin de asegurar la validez y precisión de las estimaciones en aplicaciones como la cuantificación de tasas de erosión.

A futuro, con un mayor número de sitios de referencia evaluados en Uruguay, sería posible desarrollar modelos predictivos basados en precipitaciones u otras covariables ambientales que permitan estimar inventarios de referencia de $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ en cualquier punto del país. Esto resultaría particularmente valioso considerando la creciente dificultad para identificar sitios imperturbados, condición esencial para la aplicación precisa de trazadores radiactivos en estudios de erosión de suelos.

En conjunto, los resultados presentados consolidan una línea base representativa de la deposición histórica de radionucleidos de fallout en suelos no perturbados del Uruguay, con implicancias relevantes para estudios de erosión, dinámica de partículas finas, datación de sedimentos y vigilancia radiológica ambiental.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado en parte por el Fondo María Viñas (proyecto FMV_1_2023_1_176577, ANII, Uruguay), y se enmarca también dentro del proyecto CELESTE Lab-ClimatAmSud, financiado por la Agencia Nacional de Investigación e Innovación (ANII, Uruguay). Asimismo, se reconoce la colaboración científica del consorcio AVATAR en la determinación de radionucleidos de fallout en el hemisferio sur.

REFERENCIAS

- Appleby, P. G.; Richardson, N. y Nolan, P. J., 1992. Self-absorption corrections for well-type germanium detectors. En: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 71(2), pp. 228-233.
DOI: [https://doi.org/10.1016/0168-583X\(92\)95328-O](https://doi.org/10.1016/0168-583X(92)95328-O)
- Argentina. Presidencia de la Nación. Secretaría General. Autoridad Regulatoria Nuclear, 1994. *Informe anual 1994*. Cap. 2. Buenos Aires: Autoridad Regulatoria Nuclear. [Consulta: 21 de marzo de 2025]. Disponible en: <https://www.argentina.gob.ar/arn/informe-anual-1994>
- Azcune, G.; Pérez Parada, A. y Fornaro, L., 2020. Implementación de la datación mediante ^{210}Pb - ^{137}Cs en Uruguay para el reconocimiento de la variabilidad climático-ambiental del Holoceno superior: Caso de estudio: Laguna de las Nutrias - Rocha - Uruguay. En: *INNOTEC*, (20), pp. 89–105. DOI: <https://doi.org/10.26461/20.04>
- Beninson, D.; Van der Elst, E. y Ramos, E., 1964. *Informe CNEA N.º 133*. Buenos Aires: Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) Argentina.
- Beninson, D. ; Ramos, E. y Touzet, R., 1965. *Radioestroncio y estroncio estable en los huesos y dietas de los niños*. *CNEA Informe N.º 149* [En línea]. Buenos Aires: Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA). [Consulta: 29 de abril de 2025].
Disponible en: <https://nuclea.cnea.gob.ar/server/api/core/bitstreams/4d1c90cf-b148-4d89-a22e-b7c5786cbd3d/content>
- Beninson, D.; Menossi, C. A.; Migliori de Beninson, Ambreta., 1972. *"Fallout" radiactivo debido a las explosiones en el Pacífico Sur en el período 1966–1970*. *Informe CNEA-321*. Buenos Aires: Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA), Argentina. Disponible en: <https://nuclea.cnea.gob.ar/server/api/core/bitstreams/4869dd37-2c06-4472-afb3-1fab7629dfc6/content>
- Beninson, D.; Menossi, C. A.; Migliori de Beninson, Ambreta., 1974. *"Fallout" radiactivo debido a las explosiones en el Pacífico Sur en el período 1971–1972*. *Informe CNEA-376*. Buenos Aires: Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA), Argentina. Disponible en: <https://nuclea.cnea.gob.ar/server/api/core/bitstreams/92a80838-cf04-4ce5-b47c-cfc3efec0bb4/content>
- Bennett, B. G., 2002. Worldwide dispersion and deposition of radionuclides produced in atmospheric tests: fallout from atmospheric nuclear tests: impact on science and society. En: *Health Phys.*, 82, pp. 644–655. DOI: <https://doi.org/10.1097/00004032-200205000-00011>
- Cabrera, M.; Sanabria, R.; González, J.; Cabral, P.; Tejeda, S.; Zarazua, G.; Melgar-Paniagua, E. y Tassano, M., 2023. Using ^{137}Cs and ^{210}Pb to assess soil redistribution at

- different temporal scales along with lithogenic radionuclides to evaluate contrasted watersheds in the Uruguayan Pampa grassland. En: *Geoderma*, 435, 116502.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116502>.
- Cai, W.; McPhaden, M. J.; Grimm, A. M.; Rodrigues, R. R.; Taschetto, A. S.; Garreaud, R. D.; Dewitte, B.; Poveda, G.; Ham, Y.-G.; Santoso, A.; Ng, B.; Anderson, W.; Wang, G.; Geng, T.; Jo, H.-S.; Marengo, J. A.; Alves, L. M.; Osman, M.; Li, S.; Wu, L.; Karamperidou, C.; Takahashi, K. y Vera, C., 2020. Climate impacts of the El Niño–Southern Oscillation on South America. En: *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(4), pp. 215–231.
DOI: <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0040-3>
- Cardoso-Silva, S.; Mi Kim, B. S.; Ferreira, P. A. L.; Benedetti, B.; Goyenola, G.; Iglesias, C.; Figueira, R. C. L.; López-Rodríguez, A.; Moschini-Carlos, V.; Mello, F. T.; Meerhoff, M. y Pompêo, M., 2024. Reconstructing 90 years of anthropogenic activities in a subtropical reservoir: a chemometric and paleolimnological perspective. En: *Environmental Science and Pollution Research*, 31, pp. 55756–55773. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-024-34718-4>
- Castañó, J. P.; Giménez, A.; Ceroni, M.; Furest, J.; Aunchayna, R. y Bidegain, M., 2011. *Caracterización agroclimática del Uruguay 1980–2009* [En línea]. Montevideo: INIA. (Serie Técnica N° 193). [Consulta: 29 de abril de 2025]. Disponible en: <https://ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/2538/1/18429021211104157.pdf>
- Chaboche, P. A.; Saby, N. P. A.; Laceby, J. P.; Minella, J. P. G.; Tiecher, T.; Ramon, R.; Tassano, M.; Cabral, P.; Cabrera, M.; Bezerra da Silva, Y. J. A.; Lefevre, I. y Evrard, O., 2021. Mapping the spatial distribution of global ¹³⁷Cs fallout in soils of South America as a baseline for Earth Science studies. En: *Earth-Science Reviews*, 214, 103542.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103542>
- Chaboche, P. A.; Pointurier, F.; Sabatier, P.; Foucher, A.; Tiecher, T.; Minella, J. P. G. Tassano, M.; Hubert, A.; Morera, S.; Guédron, S.; Ardois, C.; Boulet, B.; Cossonnet, C.; Cabral, P.; Cabrera, M.; Chalar, G. y Evrard, O., 2022. ²⁴⁰Pu/²³⁹Pu signatures allow refining the chronology of radionuclide fallout in South America. En: *Science of The Total Environment*, 843, 156943. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156943>
- Dicen, G.; Guillevic, F.; Gupta, S.; Chaboche, P.-A.; Meusburger, K.; Sabatier, P.; Evrard, O. y Alewell, C., 2025. Distribution and sources of fallout ¹³⁷Cs and ²³⁹⁺²⁴⁰Pu in equatorial and Southern Hemisphere reference soils. En: *Earth System Science Data*, 17, pp. 1529–1549. DOI: <https://doi.org/10.5194/essd-17-1529-2025>
- Disclose; Science and Global Security y Interpret, 2021. *Moruroa Files, 2021* [En línea]. s.n.: s.l. [Consulta: 2 de mayo de 2025]. Disponible en: <https://moruroa-files.org/en/about>
- Foucher, A.; Tassano, M.; Chaboche, P. A.; Chalar, G.; Cabrera, M.; Gonzalez, J.; Cabral, P.; Simon, A. C.; Agelou, M.; Ramon, R.; Tiecher, T. y Evrard, O., 2023. Inexorable land degradation due to agriculture expansion in South American Pampa. En: *Nature Sustainability*, 6, pp. 662–670. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41893-023-01074-z>
- Harris, C. R.; Millman, K. J.; van der Walt, S. J.; Gommers, R.; Virtanen, P.; Cournapeau, D.; Wieser, E.; Taylor, J.; Berg, S.; Smith, N. J.; Kern, R.; Picus, M.; Hoyer, S.; van Kerkwijk, M. H.; Brett, M.; Haldane, A.; del Río, J. F.; Wiebe, M.; Peterson, P.; Gérard-Marchant, P.; Sheppard, K.; Reddy, T.; Weckesser, W.; Abbasi, H.; Gohlke, C. y Oliphant, T. E., 2020. Array programming with NumPy. En: *Nature*, 585(7825), pp. 357–362.
DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2649-2>

- Hordedaña, J., 2016. Estudio paleolimnológico de un lago recientemente urbanizado: lago del Parque Rivera, Montevideo, Uruguay. Montevideo: Universidad de la República, Facultad de Ciencias. (Tesis de grado)
- Hrnecek, E.; Steier, P. y Wallner, A., 2005. Determination of plutonium in environmental samples by AMS and alpha spectrometry. En: *Appl. Radiat. Isot.*, 63, pp. 633–638. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2005.05.012> Get rights and content
- Hunter, J.D., 2007. Matplotlib: A 2D graphics environment. En: *Computing in Science & Engineering*, 9(3), pp. 90–95. DOI: <https://doi.org/10.1109/MCSE.2007.55>
- International Atomic Energy Agency - IAEA, 1989. *Measurement of radionuclides in food and the environment: a guidebook*. Viena: IAEA. (Technical Reports Series, No. 295)
- International Atomic Energy Agency - IAEA, 2014. *Guidelines for using fallout radionuclides to assess soil erosion and effectiveness of soil conservation strategies*. Vienna: IAEA. (IAEA-TECDOC-1741). [Consulta: 16 mayo 2025]. Disponible en: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE-1741_web.pdf
- Igarashi, J.; Zheng, J.; Zhang, Z.; Ninomiya, K.; Satou, Y.; Fukuda, M.; Ni, Y.; Aono, T. y Shinohara, A., 2019. First determination of Pu isotopes (^{239}Pu , ^{240}Pu and ^{241}Pu) in radioactive particles derived from Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident. En: *Sci Rep*, 9, 11807. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-48210-4>
- Imanaka, T.; Hayashi, G. y Endo S., 2015. Comparison of the accident process, radioactivity release and ground contamination between Chernobyl and Fukushima-1. En: *J Radiat Res.*, 56 Suppl 1(Suppl 1), pp. 56-61. DOI: <https://doi.org/10.1093/jrr/rrv074>
- Koide, M.; Bertine, K. K.; Chow, T. J. y Goldberg, E. D., 1985. The $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ ratio, a potential geochronometer. En: *Earth Planet. Sci. Lett.*, 72, pp. 1–8.
- Marrero, A.; Tudurí, A.; Pérez, L.; Cuña, C.; Muniz, P.; Lopes Figueira, R.C.; de Mahiques, M.M.; Ferreira, P. A. L.; Pittauerová, D.; Hanebuth, T. y García-Rodríguez, F., 2014. Cambios históricos en el aporte terrígeno de la cuenca del Río de la Plata sobre la plataforma interna Uruguay. En: *Latin American Journal of Sedimentology and Basin Analysis*, 21(2), pp. 95–110.
- McKinney, W., 2010. Data structures for statistical computing in Python. En: van der Walt, S. y Millman, J., eds. *Proceedings of the 9th Python in Science Conference*. Austin: SciPy. pp. 51–56.
- Muramatsu, Y.; Uchida, S.; Ohmomo, Y.; Watanabe, K. y Tagami, K. 2000. Concentrations of ^{239}Pu and ^{240}Pu and their isotopic ratios in soils from the Chernobyl zone. En: *Environmental Science & Technology*, 34(14), pp. 2913–2917.
- Noguera, A.; Azcune, G.; Bentos Pereira, H. et al., 2022. Radionuclide distribution in the Barra de Valizas—Aguas Dulces Region, Uruguay. En: *Environ Earth Sci*, 81(195). DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-022-10318-8>
- Odino Moure, M. del R.; Reina, E.; Piuma, L. y Gabrielli, A., 2017. *Environmental radioactivity monitoring plan in Uruguay* [En línea]. Vienna: International Atomic Energy Agency (IAEA). [Consulta 5 de junio de 2025]. Disponible en: <https://inis.iaea.org/records/k53gh-93y12>
- Python Software Foundation, 2022. *Python Language Reference*. [En línea]. Vers. 2.7. Wilmington: Python Software Foundation. [Consulta: 30 de marzo de 2025]. Disponible en: <http://www.python.org>.
- QGIS Association, 2022. *QGIS Geographic Information System* [En línea]. Vers. 3.28.9. s.l.: QGIS Association. [Consulta: 30 de marzo de 2025]. Disponible en: <http://www.qgis.org>

- Quincke, A.; Tassano, M.; González, J. M.; Grahmann, K.; Pérez-Bidegain, M.; Ciganda, V.; Evrard, O.; Barolin, E. y Cabrera, M., 2024. Erosión del suelo: nuevos métodos de estudio en el “viejo” experimento de rotaciones de La Estanzuela [En línea]. En: *Revista INIA Uruguay*, (77), pp. 47–50. [Consulta: 29 de abril de 2025]. Disponible en: <https://www.inia.uy/erosion-del-suelonuevos-metodos-de-estudio-en-el-viejo-experimento-de-rotaciones-de-la-estanzuela>
- Raybaut, P., 2009. *Spyder-documentation*. s.n.: s.l. [Consulta: 30 de marzo de 2025]. Disponible en: <https://docs.spyder-ide.org/current/index.html>
- Ribeiro Guevara, S. y Arribére, M., 2002. 137Cs dating of lake cores from the Nahuel Huapi National Park, Patagonia, Argentina: Historical records and profile measurements. En: *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 252, pp. 37–45. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1015275418412>
- UNSCEAR, 1964. *Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation: Report to the General Assembly, with Scientific Annexes*. New York: United Nations. Disponible en: <https://www.unscear.org/unscear/en/publications/1964.html>
- UNSCEAR, 2000a. *Sources and effects of ionizing radiation: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation 2000 report to the General Assembly, with scientific annexes* [En línea]. Vol. I: Sources. New York: United Nations. [Consulta: 29 de abril de 2025]. Disponible en: https://www.unscear.org/unscear/en/publications/2000_1.html
- UNSCEAR, 2000b. *Sources and effects of ionizing radiation: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation 2000 report to the General Assembly, with scientific annexes* [En línea]. Vol. II: Effects. New York: United Nations. [Consulta: 29 de abril de 2025]. Disponible en: https://www.unscear.org/unscear/en/publications/2000_2.html
- UNSCEAR, 2008. *Sources and effects of ionizing radiation: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation 2008 report to the General Assembly with scientific annexes* [En línea]. Vol. I. New York: United Nations. [Consulta: 29 de abril de 2025]. Disponible en: https://www.unscear.org/unscear/en/publications/2008_1.html
- Uruguay. Presidencia de la República. Infraestructura de Datos Espaciales, 2025. *Infraestructura de datos espaciales del Uruguay*. Montevideo: IDE. [Consulta: 29 de abril de 2025]. Disponible en: <https://www.ide.uy>
- Virtanen, P.; Gommers, R.; Oliphant, T. E.; Haberland, M.; Reddy, T.; Cournapeau, D.; Burovski, E.; Peterson, P.; Weckesser, W.; Bright, J.; van der Walt, S. J.; Brett, M.; Wilson, J.; Millman, J. K.; Mayorov, N.; Nelson, A. R. J.; Jones, E.; Kern, R.; Larson, E.; Carey, C. J.; Polat, I.; Feng, Y.; Moore, E. W.; VanderPlas, J.; Laxalde, D.; Perktold, J.; Cimrman, R.; Henriksen, I.; Quintero, E. A.; Harris, C. R.; Archibald, A. M.; Ribeiro, A. H.; Pedregosa, F. y van Mulbregt, P., 2020. SciPy 1.0: Fundamental algorithms for scientific computing in Python. En: *Nature Methods*, 17(3), pp. 261–272.
- Zhang, F.; Wang, J.; Baskaran, M.; Zhong, Q.; Wang, Y.; Paatero, J. y Du, J., 2021. A global dataset of atmospheric ^7Be and ^{210}Pb measurements: annual air concentration and depositional flux. En: *Earth System Science Data Discussions*, 13(6), pp. 2963–2994. DOI: <https://doi.org/10.5194/essd-2021-35>

Validación de una metodología para estimar el biovolumen de fitoplancton en un embalse subtropical

Validation of a methodology to estimate the biovolume of phytoplankton in a subtropical reservoir

Validação de metodologia para estimativa do biovolume de fitoplâncton em reservatório subtropical

 **MARIANA VIDAL** (1)

 **FACUNDO BORDET** (1)

 **SOLEDAD ANDRADE** (1)

(1) Área de Gestión Ambiental, Comisión Técnica Mixta de Salto Grande, Concordia, Entre Ríos, Argentina.

RECIBIDO: 18/12/2024 → APROBADO: 14/2/2025 ✉ bordetf@saltogrande.org

RESUMEN

Se presenta la validación de una metodología para la estimación del biovolumen a nivel de organización celular y filamentosos del fitoplancton en el embalse de Salto Grande. La relevancia de este trabajo radicó en su capacidad para generar datos confiables en el ámbito de la ecología, que respaldan decisiones críticas en la gestión ambiental, a la vez que se alinean con las normativas internacionales y locales sobre el monitoreo de la calidad del agua. Se realizó un esfuerzo por integrar el aseguramiento de la calidad metodológica y la investigación ecológica y sanitaria, coincidiendo con criterios establecidos en normativas como la European Commission (2000) y la Norma UNE 14996:2007 (Asociación Española de Normalización y Certificación, 2007), las cuales contribuyen a una adecuada gestión de los recursos hídricos. El objetivo principal de este estudio radicó en la valoración precisa de los riesgos ecológicos y sanitarios relacionados con los organismos formadores de floraciones identificados en el embalse que impactan en el uso de las áreas recreativas. Los resultados indican que el método analítico validado presenta un alto grado de reproducibilidad y precisión, ambos con valores menores al 10 %, características esenciales para cualquier técnica que aspire a ser utilizada en el monitoreo ambiental.

Palabras clave: monitoreo de rutina, normativa, indicador ecológico, cianobacterias.

ABSTRACT

This work presents the validation of a methodology for estimating the biovolume at the cellular and filamentous organization level of phytoplankton in the Salto Grande reservoir. The relevance of this study lies in its ability to generate reliable data in the field of ecology, supporting critical decisions in environmental management, while aligning with international and local regulations on water quality monitoring. An effort was made to integrate methodological quality assurance with ecological and health research, coinciding with criteria established by regulations such as the European Commission (2000) and the UNE 14996:2007 standard (Asociación Española de Normalización y Certificación, 2007), which contribute to the proper management of water resources. The main objective of this study was to accurately assess the ecological and health risks associated with bloom-forming organisms identified in the reservoir that impact the use of recreational areas. The results indicate that the validated analytical method presents a high degree of reproducibility and precision, both with values less than 10 %, essential characteristics for any technique aspiring to be used in environmental monitoring.

Keywords: routine monitoring, regulations, ecological indicator, cyanobacteria.

RESUMO

Apresenta-se a validação da metodologia para a estimativa do biovolume a nível de organização celular e filamentosa de fitoplâncton no reservatório de Salto Grande. A relevância deste trabalho reside na sua capacidade de gerar dados confiáveis no âmbito da ecologia, que apoiam decisões críticas na gestão ambiental, ao mesmo tempo em que se alinham com as normativas internacionais e locais sobre o monitoramento da qualidade da água. Foi realizado um esforço para integrar a garantia da qualidade metodológica e a pesquisa ecológica e sanitária, coincidindo com critérios estabelecidos por normativas como a European Commission (2000) e a Norma UNE 14996:2007 (Asociación Española de Normalización y Certificación, 2007), as quais contribuem para uma adequada gestão dos recursos hídricos. O objetivo principal deste estudo foi a avaliação precisa dos riscos ecológicos e sanitários relacionados aos organismos formadores de florações identificados no reservatório, que impactam o uso das áreas recreativas. Os resultados indicam que o método analítico validado apresenta alto grau de reprodutibilidade e precisão, ambos com valores inferiores a 10 %, características essenciais para qualquer técnica que aspire a ser utilizada no monitoramento ambiental.

Palavras-chave: monitoramento de rotina, normativa, indicador ecológico, cianobactérias.

INTRODUCCIÓN

La validación de métodos analíticos es un proceso crucial para asegurar que un sistema de medición en un laboratorio cumpla con los requisitos establecidos para su uso previsto. Según la Norma ISO 17025:2017 (International Organization for Standardization, 2017a), apartado 3, incisos 3.8 y 3.9, la validación implica la "aportación de evidencia objetiva de

que un ítem dado satisface los requisitos especificados, cuando los requisitos especificados son adecuados para su uso previsto". Este proceso no se limita al método en sí, sino que abarca la capacidad del sistema analítico completo del laboratorio para reproducir un proceso de medición de manera consistente, siguiendo un protocolo de ensayo detallado. Es, en esencia, la confirmación de la aptitud de un método antes de autorizar su uso en el laboratorio, como se menciona en las Directrices para la Acreditación de Laboratorios Ambientales (Red de Laboratorios Ambientales del Uruguay et al., 2009).

En el ámbito de la ecología, la importancia de contar con datos confiables y verificables es cada vez más reconocida, especialmente en el contexto de la actualización de criterios guía y legislación internacional, los cuales establecen niveles de alerta asociados a una gestión del riesgo ante floraciones de cianobacterias, factores claves para una adecuada vigilancia sanitaria en áreas recreativas y en el monitoreo de la calidad del agua para consumo (European Commission, 2000; Chorus y Welker, 2021; Argentina - Uruguay. Comisión Administradora del Río Uruguay, 2019). Es por esta razón que los datos ecológicos obtenidos a partir de programas de monitoreo de la calidad del agua en diversos cuerpos de agua deben ser precisos y estar respaldados por metodologías validadas.

En este sentido, se realizó una búsqueda de normas nacionales e internacionales enfocadas en lineamientos sobre el aseguramiento de la calidad, específicamente de las evaluaciones biológicas y ecológicas. Si bien existen en la región normativas que establecen criterios de calidad de agua, estas no especifican directrices para la validación de metodologías en la determinación de la estimación del biovolumen del fitoplancton. Al respecto, los principios de aseguramiento de la calidad recogidos en la Norma UNE 14996:2007 (Asociación Española de Normalización y Certificación, 2007) son aplicables a todas las organizaciones que producen datos de tipo ecológicos y a todos los trabajos de campo y de laboratorio. La norma proporciona directrices detalladas para el diseño de estudios, muestreo, análisis, validación de resultados, manejo de la incertidumbre y la interpretación de informes. Estas directrices aseguran que las evaluaciones sean precisas, reproducibles y representativas del estado del medio ambiente acuático. Por esta razón la aplicación de la Norma UNE-EN 14996:2007 (Asociación Española de Normalización y Certificación, 2007) en Argentina y Uruguay es novedosa, ya que introduce un enfoque específico y detallado, mejorando significativamente la precisión y consistencia de los monitoreos ambientales en la región, dado que proporciona una guía clara y estructurada para llevar a cabo estas evaluaciones.

El fitoplancton es un indicador clave de la calidad del agua y es uno de los elementos más utilizados para evaluar el estado ecológico de las aguas superficiales (European Commission, 2000). En la actualidad, las autoridades encargadas del monitoreo rutinario de sistemas acuáticos a nivel mundial emplean diversos parámetros del fitoplancton, como la composición, abundancia, biomasa y recurrencia de floraciones, para evaluar la calidad del agua (Ren et al., 2017). Sin embargo, las técnicas convencionales para estimar la biomasa, como la medición de la concentración de clorofila a o el recuento de células mediante el método Uthermöl (Edler y Elbrächter, 2010; Chorus y Welker, 2021), presentan limitaciones significativas. Estas técnicas no capturan la diversidad de tamaños celulares y niveles de organización presentes en las comunidades naturales de fitoplancton, lo que puede llevar a estimaciones erróneas de la biomasa.

La técnica de biovolumen ha emergido como una de las metodologías más adecuadas y ampliamente utilizadas en estudios de ecología acuática (Hillebrand et al., 2015; Saccà, 2017; Aguilera et al., 2023; Bonilla y O'Farrell, 2023), especialmente para evaluar riesgos asociados a algas y cianobacterias que pueden contener metabolitos nocivos o tóxicos. Esta técnica, que sigue las directrices de la Organización Mundial de la Salud y regulaciones como la UNE-EN 16695:2016 (Asociación Española de Normalización y Certificación, 2016), consiste en medir el volumen individual de cada célula o colonia de algas y convertirlo en biomasa mediante un factor específico para cada especie. El uso de formas geométricas estandarizadas y la aplicación de fórmulas adecuadas mejora la comparabilidad de los datos de fitoplancton y representa un avance significativo hacia la implementación de medidas de aseguramiento de la calidad en el análisis del fitoplancton.

En este trabajo se evaluó un método analítico validado para estimar el biovolumen de fitoplancton, a fin de valorar con precisión los riesgos ecológicos en el embalse de Salto Grande, con el objetivo específico de disponer de una mejor variable para identificar el riesgo asociado a la proliferación de cianobacterias de reconocida toxicidad e incorporar su uso en los monitoreos de rutina de la región. Según la Organización Mundial de la Salud (World Health Organization, 2020), las normativas para aguas recreativas establecen tres niveles de alerta basados en la concentración de clorofila *a*, el biovolumen de cianobacterias y los niveles de cianotoxinas. Comprender estos factores es clave para una adecuada gestión de los recursos acuáticos y para realizar análisis de riesgo, especialmente en situaciones donde se desarrollan grandes floraciones o acumulaciones de cianobacterias. Esto permite tomar decisiones informadas en el estudio de la biomasa del fitoplancton en el embalse de Salto Grande y contribuye a la gestión sostenible de estos ecosistemas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de Estudio

El presente trabajo se realizó en el embalse de Salto Grande, cuerpo de agua ubicado en el cauce principal del bajo río Uruguay (29°43' a 31°12'S; 57°06' a 57°55'W; Figura 1) en áreas próximas a la represa binacional de Salto Grande, a pocos kilómetros al norte de las ciudades de Concordia (Argentina) y Salto (Uruguay). Es un gran embalse tipo río subtropical, que se caracteriza por su forma alargada y su conexión directa con el cauce fluvial del río Uruguay, lo que influye en su dinámica hídrica y ecosistemas acuáticos asociados. Tiene una superficie de 750 km², con su eje mayor en dirección NS de 144 km de longitud, una profundidad media de 6,4 m y profundidad máxima de 35 m, y un tiempo medio de retención de 11,3 días (Chalar, 2006; O'Farrell et al., 2012; Bordet et al., 2017).

Los aportes del río Uruguay en este tramo presentan un período de aguas altas de abril a noviembre y una fase de aguas bajas en el verano, entre diciembre y marzo. El embalse es polimíctico, con estratificación en condiciones de descarga baja del río. Es considerado un sistema cálido tropical por su temperatura media anual mayor a 15 °C y su temperatura mínima superior a 10 °C (Salas y Martino, 1990) y vientos predominantes del NE y SO con promedios anuales de 7 y 14 kmh⁻¹ respectivamente. La descarga media

anual de agua es de unos 5.000 m³ s⁻¹, con registros mínimos y máximos de 434 y 29730 m³ s⁻¹ respectivamente (Bordet et al., 2017). Se presenta como un ambiente dendrítico con múltiples brazos, con dos subunidades diferenciadas. Una zona central que abarca el 70 % de la superficie total y cinco brazos laterales con características distintas. Es un cuerpo de agua eutrófico (O’Farrell et al., 2012; Bordet et al., 2017) y en cuanto al fitoplancton, las cianobacterias de identificada toxicidad dominan principalmente en los sitios brazos (arroyos laterales del embalse), representados por especies de *Microcystis* sp. y *Dolichospermum* sp. En el cauce principal, con un aporte significativo en la abundancia, se encuentran presentes especies de las clases diatomeas, algas verdes, dinoflagelados (Quirós y Luchini, 1983; De León y Charlar, 2003; Bordet et al., 2017). Este sistema tiene múltiples propósitos: producción de energía, agua potable y actividades recreativas, estas últimas afectadas recurrentemente por floraciones de cianobacterias.

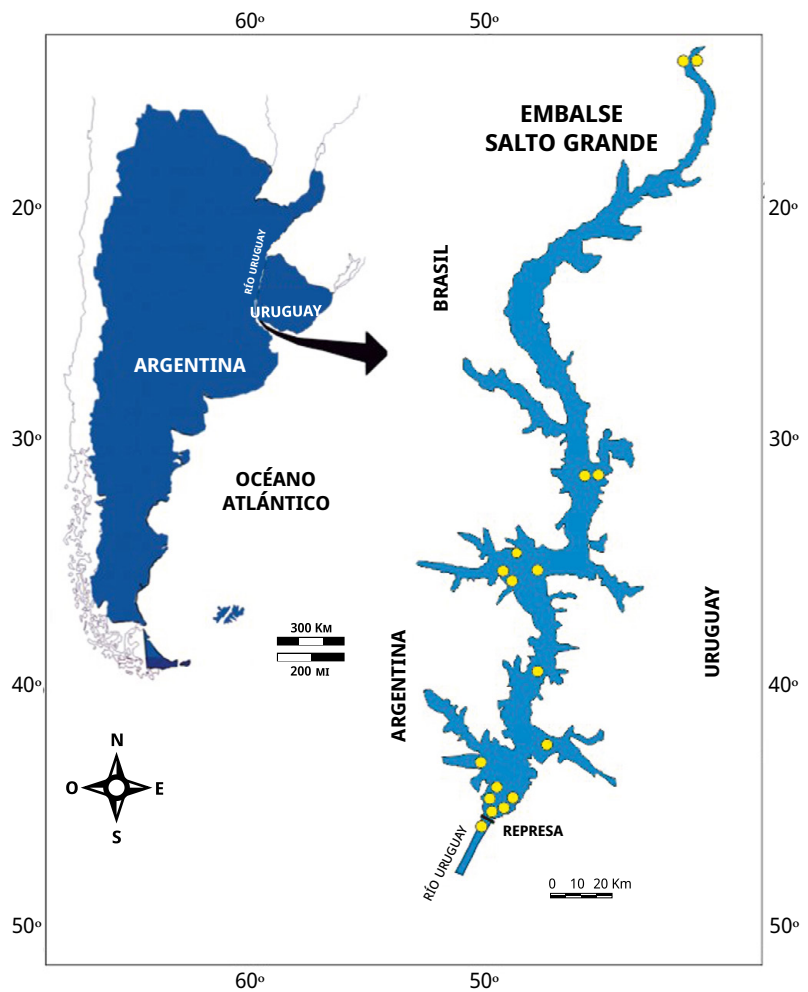


FIGURA 1. Mapa del Embalse Salto Grande y ubicación de los sitios de muestreo en el río Uruguay, aguas debajo de la presa.

Diseño de muestreo

Las muestras analizadas se obtuvieron del programa de monitoreo sobre la calidad ambiental del embalse que la Comisión Técnica Mixta de Salto Grande desarrolla desde el 2007 dentro de su Plan de Sustentabilidad Ambiental. Dicho programa tiene un enfoque ecológico y sanitario vinculado con las floraciones algales, con énfasis en cianobacterias en el embalse de Salto Grande.

Se procesaron 104 muestras de agua de superficie de acuerdo con las directrices de la Norma UNE 15204:2006 (Asociación Española de Normalización y Certificación, 2006) en su apartado 6; distribuidas en 17 sitios, comprendidos en sitios tipo litoral (playa) y canal (cauce principal y tributarios), en el eje NS y EO, desde la cabecera del embalse próximo a las ciudades de Monte Caseros (Argentina) y Bella Unión (Uruguay) y a unos 2000 m aguas abajo de la represa, en el río Uruguay (ver Figura 1). Las muestras se tomaron con una frecuencia semanal en época cálida (estival) y mensual en época fría (invernal), durante el periodo 2021-2023.

Para el registro de las condiciones en las que se realizó el estudio, se determinaron *in situ* variables fisicoquímicas mediante sonda multiparamétrica YSI DSPPro en los sitios de muestreo, con su correspondiente geolocalización. Los datos hidrológicos y meteorológicos fueron proporcionados por el Área de Hidrología de la Comisión Técnica Mixta de Salto Grande.

Equipos

Para el análisis de rutina del fitoplancton y las mediciones del volumen celular y filamentoso se empleó un microscopio óptico invertido Nikon Eclipse TS100. Los aumentos utilizados en la validación fueron: 40x, 100x, 400x, 600x; una cámara LANE optical technologies y el software Pixit Pro.A y Micrometric SE Premium 4, el cual se calibró mediante portaobjetos micrómetro de calibración y micrómetro ocular (Cabrera et al., 2008). Se emplearon cámaras de sedimentación de Utermöhl según la Norma 15204:2006 (Asociación Española de Normalización y Certificación, 2006) en su apartado 5 y, material *in vivo* fijado con Lugol, de los diferentes sitios del embalse.

Taxonomía, identificación y mediciones

Por el interés de vigilancia sanitaria ante la producción de cianotoxinas en el embalse de Salto Grande, la identificación para cianobacterias se realizó a nivel de especies, considerando la presencia, forma y tamaño de atributos morfológicos siguiendo a Komárek y Anagnostidis (1999; 2005) y Komárek (2013). La identificación taxonómica de *C. furcoides*, especie formadora de floraciones en el embalse, se llevó a cabo según las descripciones de Calado y Larsen (1997) y Popovský y Pfiester (1990). Para el resto de los individuos observados se llegó a nivel de género siguiendo el criterio de Bourrelly (1966, 1968, 1970); Parra y Bicudo (1995). Una submuestra de especímenes de las muestras y registro fotográfico fueron conservados y permanecen en el laboratorio de Química Ambiental (QA), para referencia de los analistas y como archivos para estudios posteriores.

Las estimaciones del biovolumen se realizaron a nivel celular, filamentoso y colonial, y para dichos cálculos se trabajó con 9 formas geométricas descritas por la Norma UNE-EN 16695:2016 (Asociación Española de Normalización y Certificación, 2016) en su Anexo A, de acuerdo con cada taxón (esfera, esferoide, cilindro, cilindro elíptico, prisma rómbico, esferoide alargado, huso, elipsoide y diámetro de la cintura para *Ceratium*) (Ver Tabla 1). Cuando una figura geométrica asignada no se ajustó al volumen efectivo, el resultado se multiplicó por un “factor de corrección” de la forma geométrica para estimar de modo preciso el volumen, en base a un listado de taxones establecidos con las formas geométricas, factor de corrección y factor de dimensión oculta (Napiórkowska-Krzebietke y Kobos, 2016; Asociación Española de Normalización y Certificación, 2016).

TABLA 1. Asignación según la taxa del nivel de organización, la forma geométrica y su fórmula correspondiente para el cálculo de medidas lineales requeridas y cálculo del volumen.

Taxón de fitoplancton	Nivel de organización	Forma geométrica	Fórmula
1- Cyanobacteria			
<i>Microcystis aeruginosa</i>	Célula	Esfera	$V = \pi/6 \cdot d^3$
<i>Microcystis wesenbergii</i>	Célula	Esfera	$V = \pi/6 \cdot d^3$
<i>Dolichospermum spiroides</i>	Célula	Esfera	$V = \pi/6 \cdot d^3$
<i>Dolichospermum circinale</i>	Célula	Esfera	$V = \pi/6 \cdot d^3$
<i>Dolichospermum planctonicum</i>	Célula	Esferoide	$V = \pi/6 \cdot d^2 \cdot h$
<i>Aphanocapsa</i> sp.	Célula	Esfera	$V = \pi/6 \cdot d^3$
<i>Merismopedia</i> sp.	Célula	Esfera	$V = \pi/6 \cdot d^3$
<i>Pseudanabaena</i> sp.	Célula	Cilindro	$V = \pi/4 \cdot d^2 \cdot h$
<i>Oscillatoriales</i> , no definida	Filamento	Cilindro	$V = \pi/4 \cdot d^2 \cdot h$
<i>Raphidiopsis</i> sp.	Filamento	Cilindro	$V = \pi/4 \cdot d^2 \cdot h$
2- Bacillariophyceae			
<i>Aulacoseira granulata</i>	Célula	Cilindro	$V = \pi/4 \cdot d^2 \cdot h$
<i>Aulacoseira granulata</i> var. <i>angustissima</i>	Célula	Cilindro	$V = \pi/4 \cdot d^2 \cdot h$
<i>Melosira</i> sp.	Célula	Cilindro	$V = \pi/4 \cdot d^2 \cdot h$
<i>Surirella</i> sp.	Célula	Cilindro elíptico ^{FO1}	$V = \pi /4 \cdot d_1 \cdot d_2 \cdot h$
<i>Synedra</i> sp.	Célula	Cilindro elíptico ^{FO2}	$V = \pi /4 \cdot d_1 \cdot d_2 \cdot h$
<i>Gyrosigma</i> sp.	Célula	Cilindro elíptico ^{FO3}	$V = \pi /4 \cdot d_1 \cdot d_2 \cdot h$
<i>Nitzschia</i> sp. (varias)	Célula	Prisma rómbico ^{FC, FO4}	$V = 1/2 \cdot d_1 \cdot d_2 \cdot h$

Taxón de fitoplancton	Nivel de organización	Forma geométrica	Fórmula
3- Chlorophyceae			
<i>Chlamydomonas</i> sp.	Célula	Esfera	$V = \pi/6 \cdot d^3$
<i>Pandoria</i> sp.	Célula	Esferoide alargado	$V = \pi/6 \cdot d^2 \cdot h$
<i>Eudorina</i> sp.	Célula	Esfera	$V = \pi/6 \cdot d^3$
<i>Cosmarium</i> sp.	Célula	Elipsoide ^{FO4}	$V = \pi/6 \cdot d_1 \cdot d^2 \cdot h$
<i>Closterium</i> sp.	Célula	Huso	$V = 2/15 \cdot \pi \cdot d^2 \cdot h$
<i>Scenedesmus</i> sp.	Célula	Esferoide	$V = \pi/6 \cdot d^2 \cdot h$
<i>Actinastrum</i> sp.	Célula	Huso	$V = 2/15 \cdot \pi \cdot d^2 \cdot h$
<i>Desmodesmus</i> sp.	Célula	Esferoide	$V = \pi/6 \cdot d^2 \cdot h$
<i>Spirogyra</i> sp.	Célula	Cilindro	$V = \pi/4 \cdot d^2 \cdot h$
4- Dinophyceae			
<i>Ceratium</i> sp.	Célula	Diámetro de la cintura	$V = x \cdot d^y$
<i>Peridinium</i> sp.	Célula	Esfera	$V = \pi/6 \cdot d^3$
5- Euglenophyceae			
<i>Euglena</i> sp.	Célula	Elipsoide ^{FO5}	$V = \pi/6 \cdot d_1 \cdot d_2 \cdot h$
6- Cryptophyceae			
<i>Cryptomonas</i> sp.	Célula	Elipsoide ^{FO5}	$V = \pi/6 \cdot d_1 \cdot d_2 \cdot h$
7- Chrysophyceae			
<i>Dinobryon</i> sp.	Célula	Esferoide	$V = \pi/6 \cdot d^2 \cdot h$

FC: factor de corrección de forma geométrica (por 1,15).

FO: factor de dimensión oculta ¹: h = 0,89 x d2; ²: h = 1,00 x d2; ³: h = 0,50 x d2; ⁴: d2 = 0,60 x d1; ⁵: d2 = 0,80 x d1.

Las dimensiones (diámetro y altura) requeridas de las formas geométricas relevantes se midieron para cada taxón identificado, en base a las medianas de las medidas. En aquellos organismos que se determinó esfera como forma geométrica, no se realizaron mediciones en estado de división celular. En base a la variabilidad de las muestras analizadas, en los organismos formadores de colonias se midieron varias células de una misma colonia y de varias colonias de diferentes muestras, siendo un promedio de 13 células por taxón en aquellos muestreos donde estuvieron presentes. En las filamentosas (*Raphidiopsis* spp. y *Oscillatoriales* spp.) se midió un promedio de 10 fragmentos de filamentos de una longitud fija (100µm) en cada muestreo. En *Dolichospermum* spp., se midieron en promedio 15 células por filamento y de varios filamentos de diferentes muestras según la Norma UNE-EN 16695:2016 (Asociación Española de Normalización y Certificación, 2016), en su apartado 6.4 y 6.3.

Características de funcionamiento del método

Se seleccionaron para la validación del método los siguientes parámetros de funcionamiento: límite de detección cuantitativo y óptico, repetibilidad (error estándar e intervalos de confianza), reproducibilidad e incertidumbre estándar de la medición.

En relación con el límite de detección cuantitativo y el límite de detección óptico, fueron calculados mediante los criterios establecidos en la Norma UNE-EN 15204:2006 (Asociación Española de Normalización y Certificación, 2006) en su apartado 7.3.2.3. El límite de detección se determinó mediante estadísticas de Poisson, calculándolo a partir del número de determinaciones con probabilidad de $P = 0,95$ ($-\ln 0,05$) para cada volumen de cámara de sedimentación. Siendo el valor más restrictivo alcanzado para la cámara de 25 ml, en donde se obtiene la mínima unidad de medida cuantificable igual a 1 cel-individuo/ml. A partir de este valor de 1 cel-individuo/ml y en función de cada forma geométrica se realizó el cálculo del biovolumen para las diferentes taxas estudiadas, ningún valor de biovolumen calculado por la mínima medida de cuantificación superó 1 mm³/L. A su vez se corrobora el valor de 1 mm³/L como menor valor de referencia establecido en la Organización Mundial de la Salud (Chorus y Welker, 2021), para los niveles de vigilancia sanitaria, por lo que el valor obtenido del 1 mm³/L como límite de cuantificación es apto para el uso normativo.

Para el estudio de repetibilidad se realizó el cálculo de error estándar y límites de confianza (con un intervalo de confianza de un 95 %) para cada taxa identificada, basados en la definición del grado de cercanía entre los resultados obtenidos en sus sucesivas mediciones realizadas en las mismas condiciones de medidas como lo establece la Norma UNE-EN 16695:2016 (Asociación Española de Normalización y Certificación, 2016) en su apartado 6.3.

La reproducibilidad se obtuvo mediante la precisión intermedia, concepto que refiere a la variabilidad observada en un conjunto de mediciones realizadas dentro de un mismo laboratorio, pero bajo condiciones ligeramente diferentes, como pueden ser distintos días, diferentes operadores, diferentes equipos o variaciones ambientales.

Desde una perspectiva metrológica y estadística, la precisión intermedia integra dos componentes clave: la repetibilidad (o repetitividad) y la reproducibilidad. La repetibilidad (S_r) se refiere a la variabilidad entre mediciones obtenidas por el mismo operador bajo condiciones constantes, mientras que la reproducibilidad (SR_w) refleja la variabilidad entre mediciones realizadas por diferentes operadores o en diferentes condiciones. La precisión intermedia se calculó a través de la siguiente ecuación:

$$S_i = \sqrt{(S_r^2 + SR_w^2)}$$

Donde:

S_i es la precisión intermedia.

S_r es la desviación estándar de la repetibilidad, calculada a partir de la variabilidad de las mediciones realizadas repetidamente por un solo operador en condiciones controladas.

SRw es la desviación estándar de la reproducibilidad, calculada a partir de la variabilidad de las mediciones realizadas por diferentes operadores o en condiciones variadas de equipos o tiempos.

Este parámetro es crucial para evaluar la confiabilidad de un método de medición en situaciones reales, ya que proporciona una estimación de la variabilidad que puede esperarse cuando se utiliza el mismo procedimiento en condiciones que no son completamente constantes. En este estudio, la precisión intermedia se evaluó a través de la realización de mediciones con dos analistas en distintas condiciones de medida, tales como diferentes tiempos, localizaciones, instrumentos y software, con un total de 36 mediciones por analista. La variabilidad observada en estos estudios permite inferir la robustez y confiabilidad del método de medición en condiciones reales y variadas (Magnusson et al., 2017).

El criterio de aceptación no se encuentra establecido en la Norma UNE-EN 16695:2016 (Asociación Española de Normalización y Certificación, 2016), no establece el criterio de aceptación para la reproducibilidad, por lo que en este trabajo nos basamos en Lund et al. (1958), que establece para un nivel de significancia del 95 % un valor inferior al 20 %.

La estimación de la incertidumbre estándar técnica de la medida en μm (micrómetro), se analizó utilizando la componente del límite de la reproducibilidad intralaboratorio según la definición expresada en la Norma ISO 3534-2:2006 (International Organization for Standardization, 2006) apartado 3.3.10 y 3.3.11, para dos taxa dominantes y de interés en el monitoreo de vigilancia sanitaria del embalse por su identificada toxicidad (*Microcystis aeruginosa* y *Dolichospermum* sp.). Por un lado, se realizó la prueba de análisis de varianza (ANOVA) para conocer el comportamiento de distribución de los datos obtenidos, como el de homocedasticidad, estableciendo como fuentes de variación los siguientes factores: analistas, periodo de tiempo, equipos, abundancia y sitios de estudios, como lo establece la Norma ISO 5725-3:2023 (International Organization for Standardization, 2023) en su apartado 6.2.2.

El límite de reproducibilidad intralaboratorio fue calculado de acuerdo a lo definido en la Norma 5725-6:1994 (International Organization for Standardization, 1994), apartado 4; de la siguiente forma: $R = t * \sqrt{2} * \sigma_R$, en donde t es el valor de Student de dos colas con v (grados de libertad) igual a 30 para los datos obtenidos para *Microcystis aeruginosa* y, $v = 52$ para *Dolichospermum* sp.; con un nivel de confianza del 95 % y la desviación estándar relativa medida bajo las condiciones de reproducibilidad (σ_R) para *Microcystis aeruginosa* y *Dolichospermum* sp. Por otro lado, la incertidumbre expandida U fue calculada como el múltiplo de la reproducibilidad por un factor de cobertura $K = 2$, con un nivel del 95 % de confianza de acuerdo a lo establecido en la Norma ISO 21748:2017 (International Organization for Standardization, 2017b), en su apartado 6.1 y 6.2.

RESULTADOS

Composición taxonómica

Una vez establecida la metodología, se presentan los resultados sobre los taxones de fitoplancton. Se determinaron 31 taxa de organismos fitoplanctónicos, identificados en

muestras del embalse de Salto Grande; de los cuales 10 pertenecen a Cyanobacteria, 7 a Bacillariophyceae, 9 a Chlorophyceae, 2 a Dinophyceae, 1 a Euglenophyceae, 1 a Cryptophyceae y 1 a Chrysophyceae.

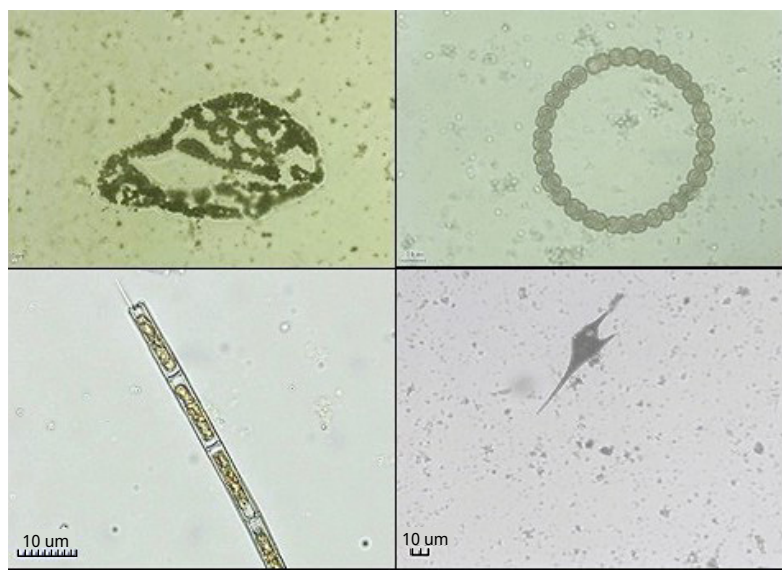


FIGURA 2. Imágenes de algunos organismos del fitoplancton formadores de floraciones en el embalse de Salto Grande. *Microcystis wesenbergii* (10x), *Dolichospermum circinale* (10x); *Aulacoseira granulata* (10x) y *Ceratium furcoides* (10x).

Parámetros de desempeño

Con respecto a los parámetros de desempeño, el límite de detección cuantitativo calculado fue de 1 mm³/L para todas las taxa y el límite óptico, de 2 µm.

El error estándar calculado para los 31 taxones medidos estuvo por debajo del valor del 10 %, en un 87 % (n: 27) y un 13 % (n: 4) igual o mayor a un error estándar de 15 %, con un máximo de 16,1 %. Estos resultados se encuentran asociados a la medición de la cantidad células/individuos, su variabilidad de tamaño, y su frecuencia en el ambiente. A su vez se calcularon los respectivos intervalos de confianza para los 31 taxones, con un nivel de probabilidad del 95 %, (p: 0,05) (Tabla 2).

TABLA 2. Resultados promedio de la estimación de la biomasa, expresados en unidades de volumen celular (μm^3) obtenidos para cada taxón, error estándar porcentual según la Norma ($\leq 10\%$), cantidad de células/individuos medidos (n) e intervalo de confianza.

Taxón de fitoplancton	d	h	Volumen promedio (μm^3)	σ_{rel} (%)	n	X_l	X_u
1- Cyanobacteria							
<i>Microcystis aeruginosa</i>	5,4		93,0	5,6	120,0	82,9	103,2
<i>Microcystis wesenbergii</i>	6,0		115,8	5,6	12,0	103,1	128,6
<i>Dolichospermum spiroides</i>	7,9		264,6	3,3	103,0	247,7	281,5
<i>Dolichospermum circinale</i>	9,4		494,5	5,4	109,0	442,1	547,0
<i>Dolichospermum planctonicum</i>	8,1	11,1	387,3	3,4	131,0	361,5	413,1
<i>Aphanocapsa</i> sp.	3,0		14,26	9,6	13,0	11,58	16,9
<i>Merismopedia</i> sp.	3,1		16,06	1,9	20,0	15,5	16,7
<i>Oscillatoriales</i> , no definida	6,0	100,0	3194,62 / 100 μm fil	10,2	40,0	2554,8	3834,5
<i>Pseudanabaena</i> sp.	1,7	2,4	5,50	5,4	30,0	4,9	6,1
<i>Raphidiopsis</i> sp.	3,0	100,0	759,71 / 100 μm fil	9,1	30,0	624,0	895,4
2- Bacillariophyceae							
<i>Aulacoseira granulata</i>	9,1	35,9	2503,1	5,4	61,0	2492,5	2766,8
<i>Aulacoseira granulata</i> var. <i>angustissima</i>	5,3	30,5	666,7	5,2	25,0	656,5	735,0
<i>Melosira</i> sp.	19,6	20,7	6515,7	5,4	53,0	6505,0	7206,9
<i>Surirella</i> sp.	d1: 116,46 d2: 45,93	40,9	186264,4	15,4	10,0	186234,2	242546,9
<i>Synedra</i> sp.	d1: 273,6 d2: 8,4	8,4	17383,3	10,0	26,0	17637,7	21993,2
<i>Gyrosigma</i> sp.	d1: 102,5 d2: 14,3	14,3	16476,4	6,48	9,0	16463,73	18570,4
<i>Nitzschia</i> sp. (varias)	d1: 132,5 d2: 8,4	4,2	2683,6	8,0	29	2667,90	3105,4
3- Chlorophyceae							
<i>Chlamydomonas</i> sp.	9,2		450,51	16,1	17,0	307,9	592,9
<i>Pandoria</i> sp.	12,7	14,0	1263,86	7,8	24,0	1071,8	1455,9
<i>Eudorina</i> sp.	5,5		153,92	10,0	16,0	109,8	198,1
<i>Cosmarium</i> sp.	d1: 50,0 d2: 30,0	56,9	47437,06	8,0	17,0	40018,6	54855,6

Taxón de fitoplancton	d	h	Volumen promedio (µm³)	σrel (%)	n	X _i	X _u
<i>Closterium</i> sp.	2,5	61,5	176,67	15,6	11,0	122,78	230,6
<i>Scenedesmus</i> sp.	6,2	26,5	609,58	10,2	28,0	460,7	758,5
<i>Actinastrum</i> sp.	2,91	37,9	133,09	6,8	12,0	115,5	150,7
<i>Desmodesmus</i> sp.	6,0	16,3	362,65	10,0	28,0	262,5	462,8
<i>Spirogyra</i> sp.	16,6	264,0	52810,82	15,0	3,0	327244,1	68377,6
4- Dinophyceae							
<i>Ceratium</i> sp.	48,3		37289,47	6,3	36,0	32682,4	41896,6
<i>Peridinium</i> sp.	21,5		5175,84	8,2	6,0	4345,2	6006,5
5- Euglenophyceae							
<i>Euglena</i> sp.	d1: 10,4 d2: 8,3	46,8	2151,2	7,3	13,0	1843,6	2458,9
6- Cryptophyceae							
<i>Cryptomonas</i> sp.	d1: 12,93 d2: 10,35	27,2	2183,94	10,5	27,0	1729,1	2638,8
7- Chrysophyceae							
<i>Dinobryon</i> sp.	5,6	11,7	202,64	9,8	24,0	163,6	241,7

- d: mediana de los diámetros medidos en los “n”, respectivos de cada taxón.
- h: mediana de las alturas medidas en los “n”, respectivo de cada taxón.
- σrel (%): error estándar porcentual.
- n: número de cel/individuos medidas correspondientes al taxón.
- x_i: límite inferior del intervalo de confianza al 95 %.
- x_u: límite superior del intervalo de confianza al 95 %.

El cálculo del parámetro reproducibilidad experimental del método fue del 10 % con una cantidad de 72 medidas, en condiciones diferentes de análisis.

El valor calculado de la estimación de incertidumbre intralaboratorio para el rango de las medidas en µm del diámetro celular para *Microcystis aeruginosa* fue de 12 % y para *Dolichospermum* sp., del 8 % (Tabla 3).

TABLA 3. Resumen de los resultados de la estimación de la incertidumbre a partir del límite de la reproducibilidad intralaboratorio.

Taxón de Cianobacterias	Cantidad de determinaciones	Grados de libertad	t de Students	Desviación estándar relativa (%)	Limite de Reproducibilidad * (%)	Incertidumbre Expandida ** (%)
	n	v	t	σR	R	U
<i>Dolichospermum</i> sp	53	52	2,0066	1,47	4,16	8
<i>Microcystis aeruginosa</i>	31	30	2,0423	2,11	6,09	12

(*) El límite de reproducibilidad intralaboratorio fue calculado de la siguiente forma:
 $R = t \cdot \sqrt{2} \cdot \sigma R$, en donde t es el valor de Student de dos colas con v (grados de libertad) igual a 30 para los datos obtenidos para *Microcystis aeruginosa* y v = 52 para *Dolichospermum* sp., con un nivel de confianza del 95 %; y σR es la desviación estándar relativa medida bajo las condiciones de reproducibilidad para *Microcystis aeruginosa* y *Dolichospermum* sp.

(**) Incertidumbre expandida U: intervalo de incertidumbre se encuentra representado por un factor de cobertura K = 2, con un nivel del 95 % de confianza.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este trabajo permitieron validar y establecer los parámetros de desempeño del método de estimación de biovolumen de fitoplancton desarrollado en el laboratorio, contribuyendo al control y precisión del proceso metodológico, incorporando el aseguramiento de la calidad en la estimación de la variable biovolumen.

Se trata de la primera vez que se utiliza una norma como la UNE 14996:2007 (Asociación Española de Normalización y Certificación, 2007) para verificar la calidad de los datos ecológicos obtenidos del medio ambiente acuático en la gestión ambiental del embalse, la cual está diseñada para completar aquellas que indican directrices generales sobre el aseguramiento de la calidad como la Norma ISO 17025:2017 (International Organization for Standarization, 2017a). Con este método validado se logra disponer de la mejor variable para lograr de forma estandarizada y ágil un método que ha mostrado ser óptimo para el análisis cuantitativo del fitoplancton en el embalse, siendo útil en diferentes ámbitos: monitoreo de la calidad del agua (Hoehn et al., 1998), estudios ecológicos funcionales (Reynolds et al., 2002) y clasificación y modelización de ecosistemas como lo menciona la Norma UNE-EN 16695:2016 (Asociación Española de Normalización y Certificación, 2016) en su apartado 0 (Introducción). Además, su aplicación en la identificación de floraciones de cianobacterias y su toxicidad resulta clave para la vigilancia sanitaria (Bonilla y O’Farrell, 2023), porque es la variable que mejor refleja la contribución de las cianobacterias a la biomasa del fitoplacnton, considerando

especialmente que estas son la clase dominante del fitoplancton en el embalse durante épocas cálidas con reconocida toxicidad (Chalar et al., 2002; Bordet et al., 2017).

La incorporación de biovolumen como indicador ecológico, estimado mediante metodología basada en las especificaciones de la Norma UNE-EN 16695:2016 (Asociación Española de Normalización y Certificación, 2016), facilita una evaluación precisa y reproducible del estado ecológico del sistema acuático y, es una mejora significativa frente a mediciones tradicionales en monitoreos de rutina de empresas potabilizadoras y organismos de control de la calidad del agua para uso recreativo (clorofila *a*, o densidad de organismos o células), que podrían subestimar la diversidad y biomasa del fitoplancton. Este enfoque refuerza la importancia del esfuerzo en integrar el uso de estimaciones de biovolumen propias (a distintos niveles de organización y objetivos), evitando la extrapolación de datos de otros ecosistemas que podría introducir sesgos en la evaluación de la biomasa (Olenina et al., 2006); influyendo en la alerta temprana sobre los riesgos sanitarios asociados.

Por esta razón, la incorporación de la medida de la incertidumbre, según lo propuesto por la Norma UNE 14996:2007 (Asociación Española de Normalización y Certificación, 2007) en su apartado 10, asegura que los resultados sean consistentes y comparables internacionalmente respecto a valores guías de la calidad del agua.

La estimación de la incertidumbre intralaboratorio desarrollada en este trabajo persiguió conocer la validez de las mediciones realizadas y la estimación de incertidumbre según la significación estadística de los resultados. Si bien fue calculada a partir del límite de la reproducibilidad, factor que nos brinda información sobre la precisión intermedia de la metodología de medida; es de gran aporte para garantizar la calidad de los datos generados, sobre todo cuando se carece de ensayos de interlaboratorios accesibles y desarrollados en la región.

La estrategia de trabajar integrando las medidas a nivel de especies y géneros fue adoptada en función de los recursos disponibles (habilidades técnicas avanzadas, costos y tiempo del análisis), y el contexto ecológico del embalse (recurrentes floraciones estivales de cianobacterias, y múltiples usos). Dentro de este enfoque balanceado, combinando ambos niveles de identificación, se obtuvieron detalles específicos como una comprensión general de las comunidades de fitoplancton en la gestión.

El análisis basado en biovolumen identificó tres grupos algales principales: Cyanophyta, Chlorophyta y Bacillariophyceae, que representaron aproximadamente el 100 % de la biomasa en la mayoría de las muestras. Esto es consistente con registros históricos del embalse tanto en el cauce principal, los brazos, como en distintas estaciones (estival e invernal) y profundidades (Chalar et al., 1993; De León y Chalar, 2003; Bordet, 2004; O'Farrell et al., 2012; Izaguirre et al., 2018; Bordet et al., 2017) y comparable con estudios de otros lagos donde el biovolumen es un indicador clave para la gestión ambiental (Canfield et al., 2019).

Para los taxones de cianobacterias de importancia sanitaria por su producción de toxinas, como *Microcystis aeruginosa* y *Dolichospermum* spp., los volúmenes celulares obtenidos se alinean con valores reportados previamente (Bonilla y O'Farrell, 2023; Chorus y Welker, 2021), con ligeras variaciones que reflejan las condiciones específicas del embalse. De manera similar, en Bacillariophyceae, *Aulacoseira granulata* mostró

volúmenes celulares con alta precisión ($\pm 5,3\%$) y resultados superiores a los reportados en otros estudios (Olenina et al., 2006; Reyes Motavita et al., 2023).

Además, se registró una presencia de Dinophyceae en las estaciones de muestreo del embalse. El caso de *Ceratium furcoides*, especie registrada con alto biovolumen (Bordet et al., 2017), mostró un volumen similar al de otros estudios con un error estándar menor al 10 %; lo que refleja una precisión mejorada para la estimación de su biomasa (Napiórkowska-Krzebietke y Kobos, 2016). No obstante, se reconoce la necesidad de establecer líneas futuras de trabajo que integren el análisis a nivel de especies en lugar de género, lo cual brindaría estimaciones más precisas del biovolumen y podría influir significativamente en las evaluaciones de biomasa.

En conclusión, el método validado ofrece una herramienta confiable para la estimación del biovolumen de fitoplancton en el embalse con características subtropicales, cumpliendo con las normativas internacionales de calidad. Su aplicación tiene un impacto positivo en la gestión ambiental, pudiendo ser incluido en un protocolo operativo estándar para facilitar su adopción en la vigilancia sanitaria, posicionándolo como una metodología replicable y valiosa para el estudio y la gestión de ecosistemas acuáticos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al ingeniero Martín Irigoyen, del Área de Gestión Ambiental de la Comisión Técnica Mixta de Salto Grande (Argentina-Uruguay), por su asistencia en el desarrollo del soporte informático para el registro y los cálculos de la metodología de medida, y a la licenciada en Gestión Ambiental Ernestina Fiorotto y al maestro mayor de obras Gustavo Gilbert, por su asistencia en las campañas de monitoreo en el embalse.

REFERENCIAS

- Aguilera, A.; Almanza, V.; Haakonsson, S.; Palacio, H.; Benitez Rodas, G. A.; Barros, M. U. G.; Capelo-Neto, J.; Urrutia, R.; Aubriot, L. y Bonilla, S., 2023. Cyanobacterial bloom monitoring and assessment in Latin America. En: *Harmful Algae*, 125.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.hal.2023.102429>
- Argentina - Uruguay. Comisión Administradora del Río Uruguay, 2019.
Resolución N° 28/2019. Digesto sobre el uso y aprovechamiento del río Uruguay. [En línea]. Paysandú: CARU. [Consulta: 11 de diciembre de 2024]. Disponible en: https://www.caru.org.uy/web/pdfs_publicaciones/DIGESTO/DIGESTO%20SOBRE%20EL%20USO%20Y%20APROVECHAMIENTO%20DEL%20RIO%20URUGUAY%20APROBADO%20POR%20RESOLUCION%20CARU%20NRO%2028-19%20DE%205-12-2019.pdf
- Asociación Española de Normalización y Certificación, 2016. UNE-EN 16695: *Calidad de agua. Guía para la estimación del biovolumen de fitoplancton*. Madrid: AENOR.
- Asociación Española de Normalización y Certificación, 2007. UNE-EN 14996: *Calidad de agua. Guía para el aseguramiento de la calidad de las evaluaciones biológicas y ecológicas en el medio ambiente acuático*. Madrid: AENOR.

- Asociación Española de Normalización y Certificación, 2006. UNE-EN 15204: *Guía para el recuento de fitoplancton por microscopía invertida (Técnica Utermöhl)*. Madrid: AENOR.
- Bonilla, S. y O'Farrell, I., 2023. La importancia de usar el biovolumen en estudios de fitoplancton y monitoreo ambiental de cianobacterias. En: *Ecología Austral*, 33(2), pp. 558-566. DOI: <https://doi.org/10.25260/EA.23.33.2.0.2148>.
- Bordet, F. H., 2004. *Estudio del comportamiento estacional de Cianofitas como agente biológico, para la detección de la calidad de agua en el Embalse de Salto Grande (Entre Ríos, Argentina)*. Santa Fe: UNL. (Tesis de Licenciatura).
- Bordet, F.; Fontanarrosa, M. S., y O'Farrell, I., 2017. Influence of light and mixing regime on bloom-forming phytoplankton in a subtropical reservoir. En: *River Research and Applications*, 33(8), pp. 1315-1326. DOI: <https://doi.org/10.1002/rra.3189>.
- Bourrelly, P., 1966. *Les Algues d'eau Douce. 1. Les algues vertes*. Paris: N. Boubée & Cie, París.
- Bourrelly, P., 1968. *Les Algues d'eau Douce. 2. Les algues jaunes et brunes*. Paris: N. Boubée & Cie, París.
- Bourrelly, P., 1970. *Les Algues d'eau Douce. 3. Les algues bleues et rouges*. Paris: N. Boubée & Cie.
- Cabrera, J. L.; Salas, J. A.; Guardado, J. A. y Juárez, J. M., 2008. Calibración de retícula ocular micrométrica. En: CENAM. *Simposio de Metrología 2008*. Santiago de Querétaro, (22 al 24 de octubre 2007). México: CENAM. Disponible en: https://www.cenam.mx/simposio2008/sm_2008/.
- Calado, A. J. y Larsen, J., 1997. On the identity of the type species of the genus *Ceratium* Schrank (Dinophyceae), with notes on *C. hirundinella*. En: *Phycologia*, 36, pp. 500-505.
- Canfield, D. E.; Bachmann, R. W.; Hoyer, M. V.; Johansson, L. S.; Søndergaard, M. y Jeppesen, E., 2019. To measure chlorophyll or phytoplankton biovolume: an aquatic conundrum with implications for the management of lakes. En: *Lake and Reservoir Management*, 35(2), pp. 181-192. DOI: <https://doi.org/10.1080/10402381.2019.1607958>.
- Chalar, G.; De Leon, L.; De Leon, R.; Fabian, D. y Gorga, J., 1993. *Evaluación de la eutrofización del embalse de Salto Grande. Análisis de las relaciones entre los parámetros físico-químicos y biológicos. Limnología de los embalses del Río Negro (noviembre 2000-marzo 2009). Informe Final de la primera etapa*. Montevideo: Facultad de Ciencias.
- Chalar, G.; De Leon, L.; Brugnoli, E.; Clemente, J. y Paradiso M., 2002. Antecedentes y nuevos aportes al conocimiento de la estructura y dinámica del Embalse Salto Grande. En: Fernández-Cirelli, A. C. G., ed. *El agua en Sudamérica: de la limnología a la gestión en Sudamérica. Aprovechamiento y gestión de los recursos hídricos*. Buenos Aires: Editorial Eudeba. pp. 123-142.
- Chalar, G., 2006. Dinámica de la eutrofización a diferentes escalas temporales: embalse Salto Grande (Argentina - Uruguay). En: Galizia Tundisi, José, Matsumura Tundisi, Takako y Sidagis Galli, Corina, eds. *Eutrofização na América do Sul: Causas, conseqüências e tecnologias de gerenciamento e controle*. [s.l.]: Instituto Internacional de Ecologia, Instituto Internacional de Ecologia e Gerenciamento Ambiental, Academia Brasileira de Ciências, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, InterAcademy Panel on International Issues, InterAmerican Network of Academies of Sciences. pp. 87-101.
- Chorus, I. y Welker, M., 2021. *Toxic cyanobacteria in water. A guide to their public health consequences, monitoring and management*. 2a ed. Boca Raton: CRC Press. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781003081449>.

- De León, L. y Chalar, G., 2003. Abundancia y diversidad del fitoplancton en el Embalse de Salto Grande (Argentina-Uruguay). Ciclo estacional y distribución espacial. En: *Limnetica*, 22(12), pp. 103-113.
- Edler, L. y Elbrächter, M., 2010. The Utermöhl method for quantitative phytoplankton analysis. En: Karlson, B.; Cusack, C. y Bresnan, E., eds. *Microscopic and molecular methods for quantitative phytoplankton analysis*. Paris: UNESCO. (IOC Manuals and Guides, 55). pp. 13–20.
- European Commission, 2000. Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy. En: *Official Journal of the European Communities*, 327(43), pp. 1-72.
- Hoehn, E.; Katelaars, H. A. M. y Ewig, B., 1998. *Erfassung und Bewertung von Planktonorganismen. Arbeitsgemeinschaft Trinkwassertalsperren. Technische Informationen 7*. München: Oldenburg Verlag.
- Hillebrand, H.; Dürselen, C.D.; Kirschtel, D.; Pollingher, U. y Zohary, T., 2015. Biovolume calculation for pelagic and benthic microalgae. En: *J. Phycol.*, 1999, 35, pp. 403–424.
- International Organization for Standardization, 2023. ISO 5725-3: *Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results – Part 3: Intermediate precision and alternative designs for collaborative studies*. Ginebra: ISO.
- International Organization for Standardization, 2017a. ISO 17025: *General requirements for the competence of Calibration and Testing Laboratories*. Ginebra: ISO.
- International Organization for Standardization, 2017b. ISO 21748: *Guide to the use of repeatability, reproducibility and trueness estimates in measurement uncertainty estimation*. Ginebra: ISO.
- International Organization for Standardization, 2006. ISO 3534-2: *Vocabulary and Symbols Part 2: Applied Statistics*. Ginebra: ISO.
- International Organization for Standardization, 1994. ISO 5725-6: *Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results – Part 6: Use in practice of accuracy values*. Ginebra: ISO.
- Izaguirre, I.; Procura, H.; Bordet, F. y Bazzalo, M., 2018. *Variaciones espaciales y temporales de la comunidad fitoplanctonica y análisis particular de cianobacterias potencialmente tóxicas en el río Uruguay* [En línea]. Paysandú: CARU. [Consulta: 13 de setiembre de 2024]. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/331974817>
- Komárek, J. y Anagnostidis, K., 1999. Cyanoprokaryota 1: Chroococcales. En: Ettl, H.; Gartner H. G.; Heynig, D. y Mollenhauer, H., eds. *Süßwasserflora von mitteleuropa*. Berlín: Spektrum Akademischer Verlag.
- Komárek, J. y Anagnostidis, K., 2005. Cyanoprokaryota-2. Teil/2nd Part: oscillatoriales. En: Büdel, B.; Krienitz, L.; Gärtner, G. y Schagerl, M., eds. *Süßwasserflora von Mitteleuropa 19/2*. Heidelberg: Elsevier/Spektrum.
- Komárek, J., 2013. Cyanoprokaryota. 3. Heterocytous genera. En: Büdel, B.; Gärtner, G.; Krienitz, L. y Schagerl M., eds. *Süßwasserflora von Mitteleuropa/Freshwater flora of Central Europe*. Heidelberg: Springer Spektrum Berlin.
- Lund, J. W. G.; Kipling, C. y Le Cren, E. D., 1958. The inverted microscope method of estimating algal numbers and the statistical basis of estimations by counting. En: *Hydrobiologia*, 11, pp. 143-170. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00007865>

- Magnusson, B.; Näykki, T.; Hovind, H.; Krysell, M. y Sahlin, E., 2017. *Handbook for calculation of measurement uncertainty in environmental laboratories* [En línea]. 4a ed. (Nordtest Report TR 537). [Consulta: 13 de setiembre de 2024]. Disponible en: <https://www.nordtest.info/wp/2017/11/29/handbook-for-calculation-of-measurement-uncertainty-in-environmental-laboratories-nt-tr-537-edition-4/>
- Napiórkowska-Krzebietke, A. y Kobos, J., 2016. Assessment of the cell biovolume of phytoplankton widespread in coastal and inland water bodies. En: *Water Research*, 104, pp. 532-546. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.08.016>
- O'Farrell, I.; Bordet F. y Chaparro, G., 2012. Bloom forming cyanobacterial complexes co-occurring in a subtropical large reservoir: validation of dominant eco-strategies. En: *Hydrobiologia*, 698, pp.175-190. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10750-012-1102-4>.
- Olenina, I.; Hajdu, S.; Edler, L.; Andersson, A.; Wasmund, N.; Busch, S.; Göbel, J.; Gromisz, S.; Huseby, S.; Huttunen, M.; Jaanus, A.; Kokkonen, P.; Ledaine, I. y Niemkiewicz, E., 2006. *Biovolumes and size-classes of phytoplankton in the Baltic Sea*. Helsinki: Helsinki Commission. Baltic Marine Environment Protection Commission. (Baltic Sea Environment Proceedings, No.106).
- Parra, O. y Bicudo, C., 1995. *Introducción a la biología y sistemática de las algas de aguas continentales*. Concepción: Universidad de Concepción
- Popovský, J. y Pfiester, L. A., 1990. Dinophyceae (Dinoflagellida). En: Ettl, H.; Gerloff J. y Heynig, H., ed. *Süßwasser flora von Mitteleuropa*. Heidelberg: Spektrum Akademischer.
- Quirós, R. y Luchini, L., 1982. Características limnológicas del embalse de Salto Grande, III: fitoplancton y su relación con parámetros ambientales. I.N.I.D.E.P. En: *Rev. Asoc. Cienc. Nat. Litoral*, 13, pp. 49-66.
- Red de Laboratorios Ambientales de Uruguay; Organismo Uruguayo de Acreditación; Uruguay. Ministerio de Vivienda Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente. Dirección Nacional de Medio Ambiente, 2009. *Laboratorios ambientales. Directrices para la acreditación* [En línea]. Montevideo: RLAU, OUA y DINAMA. [Consulta: poner fecha]. Disponible en: https://www.gub.uy/ministerio-ambiente/sites/ministerio-ambiente/files/2023-10/Directrices_para_la_Acreditacion.pdf
- Ren, L.; Belton, T.J.; Schuster, R. y Enache, M., 2017. Phytoplankton index of biotic integrity and reference communities for Barnegat Bay–Little Egg Harbor, New Jersey: a pilot study. En: *Journal of Coastal Research*, 78, pp. 89-105.
- Reyes Motavita, M. C.; Díaz Barrios, M. C. y Hernández Castillo, B. E., 2023. *Biodiversidad acuática del sitio demostrativo de ecohidrología PHI-UNESCO DRMI-Sitio Ramsar complejo cenagoso de Zapatosa. Volumen 2 Microalgas y cianobacterias. Fichas de morfoespecies* [En línea]. Bogotá: BID. [Consulta: 12 de agosto de 2024]. Disponible en: <https://natura.org.co/wp-content/uploads/2023/06/Catalogo-02-Microalgas-y-cianobacterias.pdf>
- Reynolds, C. S.; Huszar, V.; Kruk, C.; Naselli-Flores, L. y Melo, S., 2002. Toward a functional classification of the freshwater phytoplankton. En: *Journal of Plankton Research*, 24, pp. 417-428.
- Saccà, A., 2017. Methods for the estimation of the biovolume of microorganisms: A critical review. En: *Limnology and Oceanography: Methods*, 15, pp. 337-348. DOI: <http://doi.org/10.1002/lom3.10162>.

- Salas, H. J. y Martino, P., 1990. *Metodologías simplificadas para la evaluación de la eutrofización en lagos cálidos tropicales* [En línea]. Washington: OPS, OMS. [Consulta: 15 de noviembre de 2024]. Disponible en: <https://iris.paho.org/handle/10665.2/55330>
- World Health Organization, 2020. *Cyanobacterial toxins: Anatoxin-a and analogues; Cylindro-spermopsins; Microcystins; Saxitoxins. Background documents for the development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality and Guidelines for Safe Recreational Water Environments* [En línea]. Geneva: WHO. [Consulta: 15 de noviembre de 2024]. Disponible en: <https://www.who.int/teams/environment-climate-change-and-health/water-sanitation-and-health/water-safety-and-quality/publications>

Contaminación fecal en playas recreativas: revisión de normativas a nivel nacional, regional e internacional e insumos para la gestión en Uruguay

Fecal contamination on recreational beaches: review of national, regional, and international regulations and inputs for management in Uruguay

Contaminação fecal em praias recreativas: revisão de regulamentações nacionais, regionais e internacionais e insumos para gestão no Uruguai

 **FERNANDA DE LEÓN** (1)

 **ÁNGEL SEGURA** (1)

 **CARLA KRUK** (2) (3)

 **CLAUDIA PICCINI** (4)

- (1) Departamento de Modelización Estadística de Datos e Inteligencia Artificial (MEDIA), Centro Universitario Regional del Este (CURE), Universidad de la República, Rocha, Uruguay.
- (2) Instituto de Ecología y Ciencias Ambientales (IECA), Centro Universitario Regional del Este (CURE), Universidad de la República, Rocha, Uruguay.
- (3) Limnología-IECA, Facultad de Ciencias, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay.
- (4) Instituto de Investigaciones Biológicas Clemente Estable (IIBCE), Ministerio de Educación y Cultura, Montevideo, Uruguay.

RECIBIDO: 8/3/2025 → APROBADO: 23/5/2025  fernanda.deleon@fcien.edu.uy

RESUMEN

La creciente urbanización desordenada de la faja costera y la falta de tratamiento o saneamiento adecuados de las aguas residuales han producido un incremento de la carga de contaminantes fecales en las aguas que derivan a las playas recreativas, poniendo en riesgo la salud de los/las usuarios/as. Los monitoreos de calidad de agua evalúan la abundancia de microorganismos de origen intestinal y las normativas que establecen los indicadores, los valores máximos permitidos (VMP) y la forma de muestreo varían entre países y regiones. El objetivo de este trabajo es brindar insumos para la revisión de las normativas actuales de Uruguay y recomendaciones para la gestión de esta contaminación. Para ello, se realizó una revisión bibliográfica de las normativas

nacionales (histórica), regionales (11 países) e internacionales sobre contaminación fecal en playas recreativas (dulces y marinas). A nivel internacional, se utiliza una diversidad de indicadores para evaluar la calidad de playas, siendo la abundancia de enterococos y de *Escherichia coli* los más utilizados en el hemisferio norte, y los coliformes fecales, a nivel regional y nacional. La normativa uruguaya no ha sido actualizada desde hace más de 45 años, es la más antigua de las relevadas en el continente y una de las más permisivas con la contaminación fecal. En este sentido, se sugiere una actualización, manteniendo los indicadores actuales y sumando otros como la *E. coli* y los enterococos, y disminuyendo sus VMP para preservar la salud ecosistémica y proteger la salud de la población.

Palabras clave: indicadores bacteriológicos, reglamentos, calidad de agua en playas.

ABSTRACT

The increasing urbanization of the coastal strip and the lack of adequate wastewater treatment or sanitation have led to an increase in the load of fecal contaminants in the waters flowing into recreational beaches, putting the health of beachgoers at risk. Water quality monitoring assesses the abundance of microorganisms of intestinal origin, and the regulations establishing indicators, maximum allowable values (MPVs), and sampling methods vary among countries and regions. The objective of this paper is to provide input for the review of current regulations and recommendations for the management of this contamination in Uruguay. To this end, a bibliographic review of national (historic revision), regional (11 countries), and international (OMS, EPA) regulations regarding fecal contamination in recreational beaches (freshwater and marine) was conducted. Internationally, a variety of indicators are used to assess beach quality, with enterococci and *Escherichia coli* abundance being the most commonly used in the northern hemisphere, and fecal coliforms at regional and national level. Uruguayan regulations have not been updated for more than 45 years. They are the oldest regulations on the continent and one of the most permissive regarding fecal contamination. Therefore, we suggest updating Uruguay's regulations, maintaining the current indicators, adding others such as *E. coli* and enterococci and decreasing their MPVs in order to preserve ecosystem health and protect the health of the population.

Keywords: bacteriological indicators, regulations, water quality on beaches.

RESUMO

A crescente urbanização da faixa costeira e a falta de tratamento ou saneamento adequado de águas residuais têm levado ao aumento da carga de contaminantes fecais nas águas que deságuam nas praias recreativas, colocando em risco a saúde dos frequentadores das praias. O monitoramento da qualidade da água avalia a abundância de microrganismos de origem intestinal, e as regulamentações que estabelecem indicadores, valores máximos permitidos (VMPs) e métodos de amostragem variam entre países e regiões. O objetivo deste trabalho é fornecer subsídios para a revisão das regulamentações para Uruguai e recomendações atuais para o gerenciamento desta

contaminação. Para tanto, foi realizada uma revisão bibliográfica das regulamentações nacionais (histórica), regionais (11 países) e internacionais referentes à contaminação fecal em praias recreativas (de água doce e marinhas). Internacionalmente, diversos indicadores são utilizados para avaliar a qualidade das praias, sendo a abundância de enterococos e *Escherichia coli* os mais utilizados no Hemisfério Norte, e a de coliformes fecais, em nível regional e nacional. A regulamentação uruguaia não é atualizada há mais de 45 anos; é a mais antiga do continente e uma das mais permissivas em relação à contaminação fecal. Nesse sentido, sugere-se uma atualização, mantendo os indicadores atuais e adicionando outros, como *E. coli* e enterococos, e reduzindo seus MPVs para preservar a saúde do ecossistema e proteger a saúde da população.

Palavras-chave: indicadores bacteriológicos, regulamentações, qualidade da água nas praias.

INTRODUCCIÓN

El aumento de la población en zonas costeras, asociado a un ordenamiento territorial no planificado en los balnearios turísticos, genera presiones en las playas cuando los residuos y las aguas servidas no son tratadas adecuadamente (Nelson Rangel-Buitrago et al., 2024). La contaminación puntual suele surgir de las descargas fluviales o del transporte marítimo; sin embargo, las principales fuentes de contaminación difusa en las zonas costeras son el vertimiento de aguas residuales (OMS, 2003) y el saneamiento deficiente o inexistente (Bartram y Rees, 2000; Sardiñas et al., 2006; Campos-Pinilla et al., 2008).

Los problemas de salud más frecuentes, generados por contaminación fecal, están asociados a infecciones digestivas como la gastroenteritis (OMS, 2003); enfermedades respiratorias genéricas o febriles (Prüss, 1998); enfermedades respiratorias del tracto superior (dolor de garganta, tos, secreción nasal, frío o fiebre); erupciones e infecciones oculares y de oídos (Prüss, 1998; Fleisher et al., 1998; Haile et al., 1999; McBride et al., 1998; Wade et al., 2008). La posibilidad de contraer estas enfermedades depende del grado de la contaminación del agua (Pike et al., 1990), de la frecuencia y forma de exposición (directa: deportes acuáticos, o indirecta: caminata, pesca) y de la sensibilidad de los/las usuarios/as (menores, inmunocomprometidos y adultos mayores) (OMS, 2003, Cabelli et al., 1979; Sanborn y Takaro, 2013).

Para evaluar la calidad bacteriológica del agua se utiliza la abundancia de bacterias indicadoras de contaminación fecal (FIB por su sigla en inglés) (Bentancor et al., 2023). En general, las FIB no son los agentes causantes de enfermedades, salvo excepciones (algunas cepas de *Escherichia coli*), pero se asume que se comportan de manera similar a los patógenos derivados de las fecas (*Shigella* spp., *Salmonella* spp., *Campylobacter* spp., *E. coli*, (Hendricks y Pool, 2012)) y, por lo tanto, son indicadoras de estas. Las abundancias de coliformes totales (CT), coliformes fecales (CF), *E. coli* y enterococos son los indicadores de calidad microbiológica más utilizados (Figura 1).

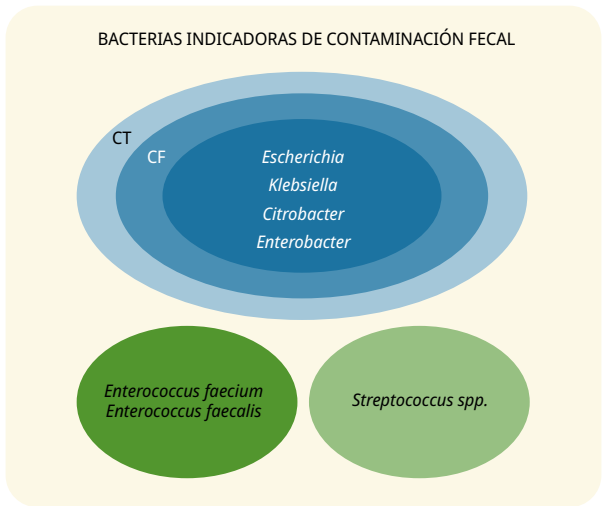


FIGURA 1. Principales grupos de bacterias indicadoras de contaminación fecal (FIB) en aguas recreativas dulces y marinas utilizados a nivel global. Los círculos de colores representan los grupos principales de bacterias. En azul: CT (coliformes totales), los cuales incluyen a los CF (coliformes fecales) y a cuatro géneros de la familia Enterobacteriaceae (*Escherichia*, *Klebsiella*, *Citrobacter* y *Enterobacter*). En verde: *Enterococcus faecium* y *Enterococcus faecalis*, y *Streptococcus spp.* Fuente: elaboración propia.

El marco normativo sobre calidad de agua respecto a contaminación fecal es un conjunto de normas y estándares que determinan los valores máximos permitidos (VMP) de determinados indicadores en relación con los usos de los sistemas acuáticos, con el fin de garantizar la salud ecosistémica y humana. En Uruguay, la normativa respecto a la calidad del agua se mantiene sin actualizaciones desde hace varias décadas, mientras que la calidad del agua en playas disminuye notoriamente (Bonilla et al., 2015; Kruk et al., 2018; Kruk et al., 2023). El objetivo de este trabajo es brindar insumos para la revisión de las normativas actuales en Uruguay y recomendaciones para la gestión de esta contaminación con el fin último de contribuir a la disminución de los riesgos sanitarios asociados a la contaminación fecal.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizó una revisión y un análisis de las principales normativas nacionales, regionales e internacionales referentes a contaminación fecal en playas recreativas (dulces y marinas) con el objetivo de proponer recomendaciones para la gestión de esta problemática. La revisión de normativas implicó la búsqueda en páginas web oficiales de instituciones de gobierno y organizaciones internacionales. I) A nivel internacional se sistematizaron las recomendaciones propuestas por los organismos referentes, como la Organización Mundial de la Salud (OMS), la Unión Europea (UE) y las agencias encargadas de la protección ambiental en Estados Unidos (US EPA), Canadá (Health Canada) y Australia. II) A nivel regional fueron incluidas normativas de 11 países de América Latina y el Caribe (Argentina, Brasil, Chile, Colombia, Costa Rica, Cuba, Ecuador, México, Perú, República

Dominicana y Venezuela). III) Finalmente, a nivel nacional fue revisada la evolución histórica del marco legal mediante el análisis de planes, convenios, leyes, decretos y resoluciones contenidos en el sitio web oficial del Ministerio de Ambiente (Ex Ministerio de Vivienda Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente: MVOTMA).

RESULTADOS

Guías de organismos internacionales y normativas regionales

Existe variabilidad en el tipo de indicador utilizado y en los niveles máximos de FIB permitidos en aguas destinadas a usos recreativos (Tabla 1). Las FIB más utilizadas son los CT, CF, estreptococos fecales, enterococos y *E. coli*. A nivel internacional (OMS, UE, US EPA, Australia y Canadá), los indicadores de contaminación fecal más recomendados son la abundancia de *E. coli* y enterococos. La literatura que se utiliza para justificar que los enterococos, ahora separados en dos géneros (*Streptococcus* y *Enterococcus*), son mejores indicadores que los CF en agua marina se remite al año 1967. Esta no se basa en que los enterococos sobreviven más en agua marina, sino que los CF se multiplican en agua marina y los enterococos no, manteniendo números estables, y mueren luego de 2 a 3 días (Sinton et al., 1993; Hanes y Fragala, 1967; Hanes et al., 1964). En los países de la región latinoamericana (Costa Rica, Chile, Colombia, Ecuador, Venezuela, República Dominicana y Uruguay) se utilizan exclusivamente CT y CF; mientras que en Argentina se utilizan los enterococos y *E. coli*; y en México únicamente los enterococos. Cuba, Perú y Brasil incluyen en sus normativas el uso simultáneo de varios indicadores (CF y enterococos).

En general, los análisis se realizan mediante el método tradicional de ensayo en tubos múltiples, que se expresa como el número más probable por cada 100 ml (NMP/100 ml) o la técnica de filtración por membrana, expresada en unidades formadoras de colonias cada 100 ml (UFC/100 ml) (Miner, 2006).

Los cuerpos de agua se clasifican en diferentes categorías de calidad bacteriológica. Los organismos internacionales como la OMS o la US EPA definen los VMP en función de estudios epidemiológicos, que relacionan la frecuencia de enfermedad con la concentración de las bacterias indicadoras (Dufour, 1984; Ferley et al., 1989; Prüss, 1998; Kay et al., 1994; Fleisher et al., 1998; Kay et al., 2001; Kay et al., 2004; Wiedenmann et al., 2006; Wade et al., 2010). Las aguas recreativas suelen clasificarse según su aptitud como excelente, buena, suficiente y mala (OMS, 2018).

Los criterios de evaluación generalmente emplean el valor de concentración de FIB en una muestra de agua puntual y/o mediante la media geométrica, por lo general de cinco muestras consecutivas en un periodo menor a 45 días (MG). Otro criterio empleado es la evaluación de niveles de cumplimiento porcentuales, por ejemplo, que el 95 % de las muestras de una playa estén por debajo de un valor específico, comúnmente utilizado a nivel internacional (OMS, 2018).

Respecto a los VMP puntuales para aguas recreativas, en general la concentración de CF de las normativas indica un VMP entre 200 y 2000 UFC/100 ml. La abundancia de *E. coli* debe ser menor a 800 UFC/100 ml (de acuerdo con la MG) para ser considerada satisfactoria; estar entre 0 - 400 UFC/100 ml si la muestra es simple; o ser menor a 900

UFC/100 ml si se evalúa de acuerdo con el percentil 90. Mientras que la abundancia de enterococos en general debe ser menor a 35 de acuerdo con la MG; menor a 70 o 200 para VMP puntuales; menor a 500 UFC/100 ml (percentil 95), o menor a 330 (percentil 90).

TABLA 1. Principales criterios de evaluación de contaminación fecal en agua recreativa por contacto primario a nivel nacional, regional e internacional. CT (coliformes totales), CF (coliformes fecales), MG (media geométrica de mínimo 5 muestras), UFC (unidades formadoras de colonias), NMP (número más probable). Las consideraciones indican el marco de referencia estadístico para interpretar los valores.

Organismo/ País	Indicador	Categoría y valor	Consideraciones	Unidad	Tipo de agua	Referencia
Organización Mundial de la Salud (OMS)	Enterococos	Muy Buena: ≤40 Buena: 41 - 200 Regular: 201 - 500 Mala >500	Percentil 95	UFC/100 ml	Dulce y marina	OMS, 2003; OMS, 2021
Unión Europea (UE)	Enterococos	Excelente: 200 Buena: 400	Percentil 95	UFC/100 ml	Dulce	(Unión Europea, 2006)
		Suficiente: 330	Percentil 90			
		Excelente: 100 Buena: 200	Percentil 95		Marina	
		Suficiente: 185	Percentil 90			
	E. coli	Excelente: 500 Buena: 1000	Percentil 95		Dulce	
		Suficiente: 900	Percentil 90			
		Excelente: 250 Buena: 500	Percentil 95		Marina	
		Suficiente: 500	Percentil 90			
Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US EPA)	Enterococos	Tasa de enfermedad (36/1000): 35 Tasa de enfermedad (32/1000): 30	MG	UFC/100 ml	Dulce y marina	(United States Environmental Protection Agency, 2012)
	E. coli	Tasa de enfermedad (36/1000): 126 Tasa de enfermedad (32/1000): 100			Dulce	
Canadá	Enterococos	≤35	MG	UFC/100 ml	Marina	(Health Canada, 2012; Health Canada 2023)
		≤70	Muestra simple			
	E. coli	≤200	MG		Dulce	
		≤400	Muestra simple			

Organismo/ País	Indicador	Categoría y valor	Consideraciones	Unidad	Tipo de agua	Referencia
Australia	Enterococos	Muy Buena: ≤40 Buena: 41 - 200 Regular: 201 - 500 Mala >500	Percentil 95	UFC/100 ml	Dulce y marina	(Australia. National Health and Medical Research Council of Australia, 2008)
Argentina	Enterococos	33	MG	UFC/100 ml	Marina	(Argentina. Ministerio de Salud, 2016)
		35			Dulce	
	<i>E. coli</i>	126			Dulce	
Brasil	Enterococos	Excelente: ≤25 Muy Buena: ≤50 Satisfactoria: ≤100	En ≥80% de las muestras las 5 semanas anteriores	UFC/100 ml	Dulce y marina	(Brasil, 2000)
		No apta: >400	Última muestra			
	<i>E. coli</i>	Excelente: ≤200 Muy Buena: ≤400 Satisfactoria: ≤800	En ≥80% de las muestras las 5 semanas anteriores			
		No apta: >2000	Última muestra			
	CF	Excelente: ≤250 Muy Buena: ≤500 Satisfactoria: ≤1000	En ≥80% de las muestras las 5 semanas anteriores			
		No apta: > 2500	Última muestra			
Chile	CF	<1000	Muestra simple	UFC/100 ml	Dulce y marina	(Instituto Nacional de Normalización, 1987)
Colombia	CF	200	Muestra simple	NMP/100 ml	Dulce y marina	(Colombia, 1984)
	CT	1000				
Costa Rica	CF	20 - 1000	Muestra simple	NMP/100 ml	Dulce y marina	(Costa Rica, 2007)
Cuba	CF	<200	Muestra simple	NMP/100 ml	Dulce y marina	(Oficina Nacional de Normalización, 1999)
	Estreptococos fecales	<100				
Ecuador	CF	200	Muestra simple	NMP/100 ml	Dulce y marina	(Ecuador. Presidencia de la República, 2014)
	CT	2000				
México	Enterococos	100	Percentil 95	NMP/100 ml	Marina	(México. Secretaría de Economía, 2016)

Organismo/ País	Indicador	Categoría y valor	Consideraciones	Unidad	Tipo de agua	Referencia
Perú	Enterococos	200	Muestra simple	NMP/100 ml	Dulce y marina	(Perú, 2017)
	<i>E. coli</i>	0				
	CF	200				
	CT	1000				
República Dominicana	CF	400	Muestra simple	NMP/100 ml	Dulce	(República Dominicana. Ministerio de Medio Ambiente, 2012, 2012)
		400-2000			Marina	
	CT	1000			Dulce	
		1000-10000			Marina	
Uruguay	CF	<1000	MG	UFC/100 ml	Dulce y marina	(Uruguay, 1979)
		<2000	Muestra simple			
Venezuela	CF	200	90% de una serie de muestras consecutivas	NMP/100 ml	Dulce y marina	(Venezuela, 1995)
		400	10% restante			
	CT	1000	90% de una serie de muestras consecutivas			
		5000	10% restante			

Marco legal en Uruguay

De los países estudiados, Uruguay tiene la normativa de calidad de agua más antigua de Latinoamérica, con 46 años de vigencia creada a través del Decreto 253/79 y decretos modificativos 232/88, 579/89 y 195/91 (Uruguay, 1979, 1988, 1989 y 1991). Este decreto determina que el límite de CF en aguas para uso recreativo (clase 2b) no debe superar los 1000 UFC/100 ml en una muestra individual, ni los 500 UFC/100 ml en la MG.

En 1999, la Resolución s/n (Uruguay, 2005) determinó que todos los cursos y cuerpos de agua cuya cuenca tributaria sea mayor a 10 km² se clasifican como clase 3: «aguas destinadas a la preservación de los peces en general y de otros integrantes de la flora y fauna hídrica, o también aguas destinadas al riego de cultivos cuyo producto no se consume en forma natural o en aquellos casos que siendo consumidos en forma natural se apliquen sistemas de riego que no provocan el mojado del producto» (Uruguay, 2005). Por consecuencia, todas las aguas recreativas fueron automáticamente clasificadas en clase 3 en lugar de 2b, y por ende se amplió el VMP de CF a 2000 UFC/100 ml para muestras simples y a 1000 UFC/100 ml en términos de MG, siendo más permisivo a la contaminación fecal.

En 2008 se constituyó el Grupo de Estandarización para Agua (Gesta-Agua, 2008), coordinado por la ex Dirección Nacional de Medio Ambiente (DINAMA) que inició una

Propuesta de modificación del Decreto 253/79 y modificativos 232/88, 579/89 y 195/91 (Uruguay, 1979, 1988, 1989 y 1991). En un primer borrador, se recomendó el uso de la abundancia de *E. coli* y los enterococos (Gesta-Agua, 2008), donde además se propuso una evaluación anual para clasificar las playas recreativas a partir del promedio de todas las MG calculadas en la temporada estival. La calidad bacteriológica del agua sería entonces clasificada en cuatro categorías: excelente, si el promedio de la MG de la temporada estival era menor a 250 UFC/100 ml; muy buena entre 250 y 500 UFC/100 ml; satisfactoria, entre 500 y 1000 UFC/100 ml; y no apta, si el promedio era mayor a 1000 UFC/100 ml. Sin embargo, la propuesta final del año 2014 del Gesta-Agua (Gesta-Agua, 2014) propuso tanto para la clase 2b como la clase 3 que las concentraciones de CF sean menores a 1000 UFC/100 ml en términos del valor de la MG de 5 muestras consecutivas tomadas en un periodo de 45 días, eliminando el criterio de utilizar los máximos de muestras individuales.

En 2021, la nueva Guía de Aptitud y Categorización de Playas (Uruguay. Ministerio de Ambiente, 2021), propuso además que para que una playa sea categorizada excelente debe cumplir con el 100 % de días monitoreados aptos, con ausencia total de cianobacterias, datos puntuales de coliformes termotolerantes ≤ 2000 UFC/100 ml, y ausencia de bandera sanitaria debido a otros eventos ambientales (Uruguay. Ministerio de Ambiente, 2021), reflejando aún la categorización de las playas recreativas como clase 3.

Las actividades de monitoreo y análisis se realizan en el marco de la Red de Monitoreo de Playas, en sus inicios llamada Red de Monitoreo Costero. Fue creada en 2013 mediante un Convenio de Cooperación Técnica entre el Ministerio de Ambiente (ex MVOTMA) y las intendencias de Colonia, San José, Montevideo, Canelones, Maldonado y Rocha. A esta red se han incorporado progresivamente otros departamentos como Soriano en 2016; Lavalleja, Salto, Paysandú y Florida en 2019; Cerro Largo en 2020; y Treinta y Tres y Río Negro en 2021. En este marco, los muestreos deben realizarse semanalmente en la temporada de verano en las zonas de mayor concurrencia de bañistas (entre las 08:00 y las 17:00 h) y fuera de la temporada estival con una frecuencia mensual (Uruguay. Ministerio de Ambiente, 2024a). En algunos departamentos como Rocha, el muestreo en el periodo de octubre - marzo se realiza de forma quincenal (Uruguay. Ministerio de Ambiente, 2024a). Las muestras de agua son colectadas sub-superficialmente a una profundidad de 1 m y transportadas en frío al laboratorio para realizar el correspondiente análisis bacteriológico de CF, siguiendo el método de membrana filtrante según los procedimientos estandarizados de operación del Laboratorio Ambiental de la DINAMA (5053 UY) (Uruguay. Ministerio de Vivienda Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente, 2009), para luego ingresar los resultados al Sistema de Información Ambiental de la DINAMA (SIA) (Uruguay. Ministerio de Ambiente, 2024a).

Desde el 2019, se procede a la utilización de un Protocolo Nacional de Actuación Frente a Eventos Ambientales en Playas, que tiene como objetivo proporcionar una guía que oriente las acciones institucionales en caso de incumplimiento de la normativa por ocurrencias como floraciones de cianobacterias y exceso de CF (Uruguay. Ministerio de Vivienda Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente, 2019). En base a los resultados de laboratorio, se evalúa si la MG o los VMP puntuales de CF exceden lo establecido en la clase 3. Las medidas implican desde aumentar la frecuencia de monitoreo (24 h), desplegar la bandera sanitaria, hasta el aviso a las autoridades y la comunicación a la

población en medios públicos (Uruguay. Ministerio de Ambiente, 2022). La nueva versión del protocolo cambia la acción de colocación de bandera sanitaria ante un segundo valor puntual alto de CF por su colocación solo frente a medias geométricas elevadas (Uruguay. Ministerio de Ambiente, 2022).

El Plan Nacional de Aguas (PNA) aprobado por el Decreto N° 205/017 (Uruguay, 2017) determina los lineamientos generales para la gestión integrada y sustentable del agua en todo el territorio. Respecto a cuerpos de agua transfronterizos, como el Río Uruguay, el Digesto sobre el Uso y Aprovechamiento del Río Uruguay de la Comisión Administradora del Río Uruguay (CARU), en la que participan Uruguay y Argentina, determina que las zonas destinadas a actividades de recreación, deportivas, culturales y turísticas con contacto directo no deberán superar en la MG una concentración de *E. coli* con un máximo de 200 UFC/100 ml y de enterococos con un máximo de 35 UFC/100 ml (Uruguay, 2019). Mientras que en el caso del Río Cuareim, cuenca transfronteriza entre Uruguay y Brasil, la Dirección Nacional de Calidad y Evaluación Ambiental (DINACEA, ex DINAMA) es quien lleva a cabo el monitoreo de calidad de agua. Para esta cuenca, el Plan de monitoreo del río Cuareim plantea que al evaluar el indicador de CF no se tome como referencia el estándar del Decreto 253/79 y modificativos respecto a la MG de 5 muestras consecutivas dado que el tiempo transcurrido entre monitoreos es demasiado extenso (3 meses aproximadamente). Sin embargo, fija un estándar de 1000 UFC/100 ml y especifica que se tenga en cuenta el VMP de valores puntuales de 2000 UFC/100 ml (de acuerdo a la Clase 3 del Decreto 253/79 y modificativos) (Uruguay. Ministerio de Ambiente, 2024b).

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Comparación y limitaciones del uso de indicadores de contaminación fecal en playas recreativas

La revisión de la normativa evidencia que no existe un único criterio aplicado al monitoreo de calidad de agua mediado por FIB. El grupo indicador ideal debería reflejar adecuadamente el grado de contaminación; tener relación directa con las enfermedades; no multiplicarse en ambientes naturales; poseer una tasa de mortalidad bacteriana similar o menor a los patógenos; ser fácil de aislar, identificar y enumerar en laboratorio y mantener estas características en diferentes ambientes (Bartram y Rees, 2000; United States Environmental Protection Agency, 2012; Health Canada, 2012; OMS, 2018).

Los organismos internacionales han basado sus recomendaciones en estudios epidemiológicos que centran el análisis de las tasas de enfermedades de adultos tras la exposición al contacto con el agua recreativa específicamente en climas templados (United States Environmental Protection Agency, 2012; OMS, 2021). Pueden no aplicar en aguas tropicales, o a niños/as, adultos/as mayores o personas inmunodeprimidas, quienes podrían requerir un mayor grado de protección (OMS, 2021). A nivel internacional la abundancia de enterococos en agua dulce y marina, y *E. coli* en agua dulce son los indicadores más recomendados para evaluar la calidad del agua recreativa (OMS, 2018). En Latinoamérica, en general se utiliza el indicador de CF, pero puede presentar algunas limitaciones en agua marina como se mencionó anteriormente (Solic y Krstulovic, 1992;

Dufour, 1984); sin embargo, la existencia de información de larga data, la práctica que tienen técnicos/as en el país para su aplicación, además del conocimiento de su significado, son también ventajas que deben ser tenidas en cuenta al seleccionar un indicador. De los países analizados, únicamente Australia aplica estrictamente la guía de la OMS en su normativa, mientras que Argentina es el único que basa su legislación en recomendaciones de la US EPA.

Se observó una gran variabilidad en la clasificación de la calidad de agua según los valores de abundancia de FIB. Algunas guías y normativas (OMS, UE y Brasil) diferencian la aptitud de playas según sean de agua dulce o marina. Esta clasificación puede ser útil para el registro histórico de la calidad de agua en cada playa, pero no así en términos sanitarios, dado que la clasificación es *a posteriori*, es decir, luego de que ocurrió la contaminación.

Las formas de expresar los resultados también difieren, en general se recomienda la interpretación del valor del percentil 90 o 95 o el cálculo de las medias geométricas de cinco muestras consecutivas. En el primer caso, el criterio refleja gran parte de la variabilidad superior en la distribución de datos de calidad de agua y es más sencillo de comprender. Sin embargo, se ve afectado por una mayor incertidumbre estadística y, por lo tanto, es una medida menos confiable (OMS, 2018). En el segundo caso, si bien la MG es estadísticamente una medida más estable, no permite evidenciar los valores extremos superiores (OMS, 2003), con el consecuente riesgo por exposición puntual elevada.

Las técnicas utilizadas para el recuento de CF, en particular la técnica de NMP, demanda entre 18 y 24 horas para la obtención de resultados, lo que podría aumentar los riesgos a la salud humana causados por el retraso en la notificación (Francy, et al., 2009). Actualmente, organismos como la US EPA buscan actualizar los métodos microbianos existentes o añadir métodos con un tiempo de respuesta más rápido aplicables a *E. coli* y enterococos, incluyendo métodos qPCR y métodos PCR digitales (dPCR) (United States Environmental Protection Agency, 2023) que ya se están aplicando en Uruguay (Soumastre et al., 2022; Cabot et al., 2024). También se sugiere desde los organismos internacionales (OMS, 2018; OMS 2021; United States Environmental Protection Agency, 2023) combinar estas aproximaciones con estrategias de modelización predictiva para apoyar la gestión de playas (Dada y Hamilton, 2016; Segura et al., 2021; Bourel et al., 2021; Vidal et al., 2024). Estos esfuerzos podrían ayudar a reducir el número de personas expuestas a la contaminación fecal en playas recreativas (United States Environmental Protection Agency, 2023).

Respecto a la vigencia de las normativas citadas anteriormente en este artículo, Perú cuenta con la normativa más reciente (actualizada en 2017), junto con Argentina y México (año 2016), seguidos de Ecuador (año 2014) y República Dominicana (año 2012). Mientras que a nivel nacional la normativa vigente respecto a la calidad bacteriológica del agua es la más antigua de la región, con una vigencia mayor a 45 años (Uruguay, 1979) y también la más permisiva. Tras la Resolución Ministerial s/n (Uruguay, 2005), los VMP de CF se flexibilizaron de 1000 a 2000 UFC/ 100 ml en muestras individuales, siendo más permisivos a la contaminación. Mientras que, en otros países del continente, el máximo valor permitido de este indicador para uso recreativo del agua por contacto directo es considerablemente menor, tal es el caso de Colombia (200 UFC/100 ml) o Cuba (500 UFC/100ml). En el primer Protocolo Nacional de Actuación Frente Eventos Ambientales de

Uruguay (Uruguay. Ministerio de Vivienda Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente, 2019) el uso de la bandera sanitaria está indicado si existen al menos dos muestras puntuales que superan la normativa, o cuando la MG de cinco eventos excede los 1000 UFC/100 ml. En la nueva versión del protocolo 2021 se indica que la bandera sanitaria se desplegará solo frente a medias geométricas elevadas (Uruguay. Ministerio de Ambiente, 2021), sin considerar los efectos de los valores de contaminación elevados para la salud, aumentando aún más los riesgos a la salud por exposición recreativa.

Insumos para la gestión

A partir de los resultados del presente trabajo, se proponen sugerencias para actualizar la normativa vigente de Uruguay. En cuanto al valor del indicador de CF, se recomienda ajustar los VMP para los sitios cuyo uso predominante es la recreación a un valor máximo de 200 UFC/100 ml para muestras puntuales en comparación a las normativas regionales. El despliegue de la bandera sanitaria debería tener en cuenta los valores puntuales de exceso de CF, dado que el cálculo de la MG es adecuado para caracterizar un ecosistema y evaluar su evolución interanual, pero no considera eventos de contaminación puntual que pueden poner en riesgo la salud humana.

Mientras se avanza en el estudio de las FIB, se recomienda sumar otros indicadores a los ya utilizados como *E. coli* en agua dulce y enterococos en agua dulce y marina (específicamente *Enterococcus faecium* en ambientes de agua dulce y *Enterococcus faecalis* en ambientes de agua salada) (OMS, 2003; OMS, 2018; OMS, 2021). Asimismo, surge como necesidad la integración de los pluviales que llegan a las playas y los sedimentos ya que en estos lugares se ha identificado la presencia de contaminación fecal, siendo donde más se exponen los/las niños/as en Uruguay (Kruk et al., 2019; Cabot et al., 2024). También se recomienda desarrollar estudios epidemiológicos en playas recreativas a nivel local que evalúen las infecciones relacionadas con la contaminación fecal, considerando los diferentes riesgos que se producen por contacto directo e indirecto con el agua, así como en la arena (OMS, 2021; Health Canada, 2023), y de acuerdo con la susceptibilidad diferencial de los usuarios para generar equivalencias de protección.

Por último, esta revisión recomienda desarrollar modelos predictivos utilizando la extensa base de datos disponible del esfuerzo de los muestreos que realizan las autoridades y los técnicos para aplicar medidas de gestión preventivas con el fin de minimizar los riesgos a la salud humana en las playas recreativas de nuestro país.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a PEDECIBA Geociencias por una beca de iniciación a la investigación de este trabajo como parte de la monografía final de la Licenciatura en Gestión Ambiental de Fernanda de León, en la Universidad de la República, CURE, y a Natalia Verrastro y Micaela Trimble por contribuir con sus comentarios.

REFERENCIAS

- Argentina. Ministerio de Salud, 2016. *Directrices sanitarias para uso seguro de aguas recreativas. Módulo II: Directrices sanitarias para enteropatógenos y microorganismos oportunistas en agua ambiente. Resolución Ministerial 2523/2019* [En línea]. Buenos Aires: Ministerio de Salud. [Consulta: 02 febrero 2025]. Disponible en: <https://www.argentina.gob.ar/>
- Australia. National Health and Medical Research Council of Australia, 2008. *Guidelines for Management Risks in Recreational Water* [En línea]. Canberra: NHMRC. [Consulta: 10 febrero 2025]. Disponible en: <https://www.nhmrc.gov.au/about-us/publications/guidelines-managing-risks-recreational-water>
- Bartram, J., y Rees, G., 2000. *Monitoring bathing waters - A practical guide to the design and implementation of assessments and monitoring programmes* [En línea]. London: WHO-EPA-UE. [Consulta: 16 febrero 2025]. Disponible en: <https://cdn.who.int/>
- Bentancor, A.; Blanco Crivelli, X.; Piccini, C. y Trueba, G., 2023. *New concepts on domestic and wild reservoirs and transmission of E. coli and its environment*. En: Torres, Alfredo, ed. *Trending topics in Escherichia coli research: the Latin American perspective*. Cham: Springer International Publishing. pp. 55-77.
- Bonilla, S.; Haakonsson, S.; Somma, A.; Gravier, A.; Britos, A.; Vidal, L.; De León, L.; Brena, B.; Pérez, M.; Piccini, C.; Chalar, G.; González-Piana, M.; Martigani, F.; Aubriot, L. y de la Escalera, G. M., 2015. Cianobacterias y cianotoxinas en ecosistemas límnicos de Uruguay. En: *Innotec*, 10, pp. 9-22. DOI: <https://doi.org/10.26461/10.01>
- Bourel, M.; Segura, A. M.; Crisci, C.; López, G.; Sampognaro, L.; Vidal, V.; Kruk, C.; Piccini, C. y Perera, G., 2021. Machine learning methods for imbalanced data set for prediction of faecal contamination in beach waters. En: *Water Research*, 202, 117450. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117450>
- Brasil. Resolução CONAMA 274/2000, de 29 de noviembre de 2000. Diário Oficial da União Publicação [En línea], 08 de enero de 2001. [Consulta: 10 de enero 2025]. Disponible en: <https://cetesb.sp.gov.br/>
- Cabelli, V. J.; Dufour, A. P.; Levin, M. A.; McCabe, L.J. y Haberman, P. W., 1979. Relationship of microbial indicators to health effects at marine bathing beaches. En: *American Journal of Public Health*, 69(7), pp. 690-696. DOI: <https://doi.org/10.2105/AJPH.69.7.690>
- Cabot, M. E.; Piccini, C.; Inchausti, P.; de la Escalera, G. M. y García-Alonso, J., 2024. Relationships between fecal indicator abundance in water and sand and the presence of pathogenic genes in sand of recreational beaches. En: *Environmental Monitoring and Assessment*, 196(11), 1067. DOI: 10.1007/s10661-024-13256-z
- Campos-Pinilla, C.; Cárdenas, M. y Guerrero, A., 2008. Comportamiento de los indicadores de contaminación fecal en diferentes tipos de agua de la sabana de Bogotá (Colombia). En: *Universitas Scientiarum*, 13(2), pp. 103-108.
- Colombia. Decreto 1594/1984, de 26 de junio de 1984. Diario Oficial [En línea], 26 de junio de 1984. [Consulta: 30 de mayo de 2025]. Disponible en: http://www.ideam.gov.co/documents/24024/36843/Dec_1594_1984.pdf/aacbcd5d-fed8-4273-9db7-221d291b657f

- Costa Rica. Decreto Ejecutivo 33903/2007, de 9 de marzo de 2007. *Diario Oficial La Gaceta* [En línea], 17 de setiembre de 2007. [Consulta: 15 febrero 2025]. Disponible en: <http://www.digeca.go.cr/>
- Dada, A.C. y Hamilton, D.P., 2016. Predictive Models for determination of E. coli concentrations at Inland Recreational Beaches. En: *Water, Air, & Soil Pollution*, 227, 347. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11270-016-3033-6>
- Dufour, A. P., 1984. *Health effects criteria for fresh recreational waters*. Cincinnati: US EPA. (EPA report EPA-600/1-84-004).
- Ecuador. Presidencia de la República, 2014. *Norma de calidad ambiental y de descarga de efluentes: recurso agua de Ecuador*. Quito: Registro Oficial.
- Ferley, J. P.; Zmirou, D.; Balducci, F.; Fera, P.; Larbaigt, G.; Jacq, E.; Moissonnier, B.; Blineau, A. y Boudot, J., 1989. Epidemiological significance of microbiological pollution criteria for river recreational waters. En: *International Journal of Epidemiology*, 18(1), pp. 198-205. DOI: <https://doi.org/10.1093/ije/18.1.198>
- Fleisher, J. M.; Kay, D.; Wyer, M. D. y Godfree, A. F., 1998. Estimates of the severity of illnesses associated with bathing in marine recreational waters contaminated with domestic sewage. En: *International Journal of Epidemiology*, 27(4), pp. 722-726. DOI: <https://doi.org/10.1093/ije/27.4.722>
- Francy, D. S., 2009. Use of predictive models and rapid methods to nowcast bacteria levels at coastal beaches. En: *Aquatic Ecosystem Health & Management*, 12 (2), 177e182. DOI: <https://doi.org/10.1080/14634980902905767>
- Gesta-Agua, 2008. *Normas reglamentarias para prevenir la contaminación ambiental mediante el control de las aguas. Propuesta de modificación del Decreto 253/79 y modificativos*. Montevideo: MVOTMA-DINAMA.
- Gesta-Agua, 2014. *Normas reglamentarias para prevenir la contaminación ambiental mediante el control de las aguas*. Montevideo: MVOTMA-DINAMA. (Documento Interno).
- Haile, R. W.; Witte, J. S.; Gold, M.; Cressey, R.; McGee, C.; Millikan, R. C.; Glasser, A.; Harawa, N.; Ervin, C.; Harmon, P.; Harper, J.; Dermand, J.; Alamillo, J.; Barrett, K.; Nides, M. y Wang, G. Y., 1999. The health effects of swimming in ocean water contaminated by storm drain runoff. En: *Epidemiology*, 10(4), pp. 355-363. DOI: <https://doi.org/10.1097/00001648-199907000-00004>
- Hanes, N. B. y Fragala, R., 1967. Effect of seawater concentration on survival of indicator bacteria. En: *Journal Water Pollution Control Federation*, 39(1), pp. 97-104.
- Hanes, N. B.; Sarles, W. B. y G. A. Rohlich, 1964. Dissolved oxygen and survival of Coliform Organisms and Enterococci. En: *American Water Works Association*, 56(4): pp. 441-446. <http://www.jstor.org/stable/41264206>
- Health Canada, 2012. *Guidelines for Canadian recreational water quality* [En línea]. Ottawa: Health Canada. 3a ed. [Consulta: 08 de enero 2025]. Disponible en: <https://healthycanadians.gc.ca/>
- Health Canada, 2023. *Guidelines for understanding and managing risks in recreational waters* [En línea]. Ottawa: Health Canada. [Consulta: 25 febrero 2025]. Disponible en: <https://www.canada.ca/>
- Hendricks, R. y Pool, E., 2012. The effectiveness of sewage treatment processes to remove faecal pathogens and antibiotic residues. En: *Journal of Environmental Science and Health. Part A*, 47(2), pp. 289-297. DOI: <https://doi.org/10.1080/10934529.2012.637432>

- Instituto Nacional de Normalización, 1987. Norma Chilena 1333-1978_Mod-1987. *Requisitos de calidad de agua para diferentes usos* [En línea]. Santiago de Chile: INN. [Consulta: 20 febrero 2025]. Disponible en: <https://ciperchile.cl/>
- Kay, D.; Fleisher, J. M.; Salmon, R. L.; Wyer, M. D.; Godfree, A. F.; Zelenauch-Jacquotte, Z. y Shore, R., 1994. Predicting likelihood of gastroenteritis from sea bathing; results from randomized exposure. En: *Lancet*, 344(8927), pp. 905-909.
- Kay, D.; Fleisher, J.; Wyer, M. D. y Salmon, R. L., 2001. *Re-analysis of the seabathing data from the UK randomised trials. A report to DETR*. Aberystwyth: University of Wales, Centre for Research into Environment and Health.
- Kay, D.; Bartram, J.; Prüss, A.; Ashbolt, N.; Wyer, M. D.; Fleisher, J. M., et al., 2004. Derivation of numerical values for the World Health Organization guidelines for recreational waters. En: *Water research*, 38(5), pp. 1296-1304. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2003.11.032>
- Kruk, C.; Dobroyan, M.; González, L.; Segura, A. M.; Balado, I.; Trabal, N.; de León, F.; Martínez, G.; Rodríguez, A.; Piccini, C.; Chalar, G. y Verrastro, N., 2018. Calidad de agua y salud ecosistémica en playas recreativas de La Paloma, Rocha [En línea]. En: *Revista Trama*, 9, pp. 62-71. [Consulta: 17 febrero 2025]. Disponible en: <http://www.auas.org.uy/>
- Kruk, C.; Dobroyan, M.; Segura, A.M.; Balado, I.; Trabal, N.; Piccini, C.; Sampognaro, L.; de León, F.; Rodríguez, A. y Verrastro, N., 2019. *Calidad de agua y su percepción en playas: La Paloma, Rocha*. II Congreso de Agua Ambiente y Energía. Asociación de Universidades Grupo Montevideo (AUGM). Universidad de la República, Montevideo, Uruguay.
- Kruk, C.; Segura, A.; Piñeiro, G.; Baldassini, P.; Pérez-Becoña, L.; García-Rodríguez, F.; Perera, G. y Piccini, C., 2023. Rise of toxic cyanobacterial blooms is promoted by agricultural intensification in the basin of a large subtropical river of South America. En: *Global Change Biology*, 29(7), pp. 1774-1790. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.16587>
- McBride, G. B.; Salmond, C. E.; Bandaranayake, D. R.; Turner, S. J.; Lewis, G.D. y Till, D. G., 1998. Health effects of marine bathing in New Zealand. En: *International Journal of Environmental Health Research*, 8(3), pp. 173-189. DOI: <https://doi.org/10.1080/09603129873462>
- México. Secretaría de Economía, 2016. *NMX-AA-120-SCFI-2016. Requisitos y Especificaciones de Sustentabilidad de Calidad de Playas (cancela a la NMX-AA-120-SCFI-2006)* [En línea]. Ciudad de México: Secretaría de Economía. [Consulta: 25 enero 2025]. Disponible en: <http://www.economia-nmx.gob.mx/>
- Miner, G., 2006. Standard methods for the examination of water and wastewater. En: *American Water Works Association Journal*, 98(1), p. 130.
- Oficina Nacional de Normalización, 1999. N.C. 22:99: *Lugares de baño en costas y en masa de aguas interiores. Requisitos higiénico-sanitarios*. La Habana: NC.
- OMS, 2003. *Guidelines for safe recreational water environments: coastal and fresh waters* (Vol. 1) [En línea]. Ginebra: OMS. [Consulta: 05 de diciembre 2024]. Disponible en: <https://apps.who.int/>
- OMS, 2018. *Recommendations on scientific, analytical and epidemiological developments relevant to the parameters for bathing water quality in the Bathing Water Directive (2006/7/EC)* [En línea]. Ginebra: OMS. [Consulta: 02 de enero 2025]. Disponible en: <https://circabc.europa.eu/>
- OMS, 2021. *Guidelines on recreational water quality. Volume 1: coastal and fresh waters* [En línea]. Ginebra: OMS. [Consulta: 20 febrero 2025]. Disponible en: <https://iris.who.int/>

- Perú. Decreto Supremo 004-2017, s.d. *El Peruano Diario Oficial* [En línea], 7 de junio de 2017. [Consulta: 24 febrero 2025]. Disponible en: <https://www.minam.gob.pe/>
- Pike, E. B.; Balarajan, R.; Jones, F.; Kay, D.; Stanvell-Smith, R. y Wyer, M., 1990. *Health effects of sea bathing (ET 9511) Phase I - pilot studies at Langland Bay 1989*. [s.l.]: Department of the Environment and the National Rivers Authority.
- Prüss, A., 1998. A review of epidemiological studies from exposure to recreational water. En: *International Journal of Epidemiology*, 27(1), pp. 1-9.
DOI: <https://doi.org/10.1093/ije/27.1.1>
- Rangel-Buitrago, N.; Galgani, F. y Neal, W. J., 2024. Addressing the global challenge of coastal sewage pollution. En: *Marine Pollution Bulletin*, 201, 116232, ISSN 0025-326X.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2024.116232>
- República Dominicana. Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales, 2012. *Norma Ambiental de Calidad de Aguas Superficiales y Costeras de la República Dominicana* [En línea]. Santo Domingo: Gaceta Oficial. [Consulta: 4 de septiembre de 2019].
Disponible en: https://ambiente.gob.do/wpfd_file/norma-ambiental-de-calidad-de-aguas-superficiales-y-zonas-costeras-1/
- Sanborn, M. y Takaro, T., 2013. Recreational water-related illness: Office management and prevention [En línea]. En: *Canadian Family Physician*, 59(5), pp. 491-495. [Consulta: 25 enero 2025]. Disponible en: <https://www.cfp.ca/>
- Sardiñas, O.; Chiroles, S.; Fernández, M.; Hernández, Y. y Pérez, A., 2006. Evaluación físico-química y microbiológica del agua de la presa El Cacao (Cotorro, Cuba). En: *Higiene y Sanidad Ambiental*, 6, pp. 202-206.
- Segura, A.; Sampognaro, L.; Lopez, G.; Crisci, C.; Bourel, M.; Vidal, V.; Eirin, K.; Piccini, C.; Kruk, C. y Perera, G., 2021. Monitoreo de calidad de agua y predicción de coliformes fecales en playas de Montevideo mediante algoritmos de aprendizaje automatizado. En: *Innotec*, 22. DOI: <https://doi.org/10.26461/22.07>
- Sinton, L. W.; Donnison, A. M. y Hastie, C. M., 1993. Faecal streptococci as faecal pollution indicators: A review. Part II: Sanitary significance, survival, and use. En: *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 27(1), pp. 117-137, DOI: <https://doi.org/10.1080/00288330.1993.9516550>
- Solic, M. y Krstulovic, N., 1992. Separate and combined effects of solar radiation, temperature, salinity, and pH on the survival of faecal coliforms in seawater. En: *Marine Pollution Bulletin*, 24(8), pp. 411-416. DOI: [https://doi.org/10.1016/0025-326X\(92\)90503-X](https://doi.org/10.1016/0025-326X(92)90503-X)
- Soumastre, M.; Piccini, J.; Rodríguez-Gallego, L.; González, L.; Rodríguez-Graña, L.; Calliari, D. y Piccini, C., 2022. Spatial and temporal dynamics and potential pathogenicity of fecal coliforms in coastal shallow groundwater wells. En: *Environmental Monitoring and Assessment*, (2). DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09672-0>
- Unión Europea, 2006. Directiva 2006/7/EC. *Manejo de la calidad de la calidad del agua para baño que deroga la Directiva 76/160/EEC* [En línea]. Bruselas: Unión Europea. [Consulta: 16 enero 2025]. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/>
- Uruguay. Decreto 253/79, de 9 de mayo de 1979. *Diario Oficial* [En línea], 31 de mayo de 1979. [Consulta: 05 enero 2025]. Disponible en: <https://www.impo.com.uy/>
- Uruguay. Decreto 232/88, de 17 de marzo de 1988. *Diario Oficial* [En línea], 09 de junio de 1988. [Consulta: 05 enero 2025]. Disponible en: <https://www.impo.com.uy/>

- Uruguay. Decreto 579/89, de 06 de abril de 1989. *Diario Oficial* [En línea]. [Consulta: 05 enero 2025]. Disponible en: <https://www.impo.com.uy/>
- Uruguay. Decreto 195/91, de 04 de abril de 1991. *Diario Oficial* [En línea], 08 de julio de 1991. [Consulta: 05 enero 2025]. Disponible en: <https://www.impo.com.uy/>
- Uruguay. Norma 28/019, s.d. *Diario Oficial* [En línea], 16 de enero de 2020. [Consulta: 12 febrero 2025]. Disponible en: <https://www.impo.com.uy/bases/otras-normas-originales/28-2019>
- Uruguay. Ministerio de Vivienda Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente, 2009. *Manual de procedimientos analíticos para muestras ambientales* [En línea]. 2a ed. Montevideo: DINAMA. [Consulta: 15 agosto 2019]. Disponible en: <https://www.mvotma.gub.uy/>
- Uruguay. Decreto 205/017, de 31 de julio de 2017. *Diario Oficial* [En línea], 8 de agosto de 2017. [Consulta: 24 octubre 2019]. Disponible en: <https://www.impo.com.uy/>
- Uruguay. Resolución s/n, de 25 de febrero de 2005. *Diario Oficial* [En línea], 02 de marzo de 2005. [Consulta: 25 enero 2025]. Disponible en: <https://www.impo.com.uy/>
- Uruguay. Ministerio de Vivienda Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente, 2019. *Red de monitoreo costero. Monitoreo de playas Quinquenio 2013 - 2018. Temporada 2018 - 2019. Anexo 2 protocolo nacional de actuación frente a eventos especiales en playas* [En línea]. Montevideo: MVOTMA. [Consulta: 15 diciembre 2024]. Disponible en: <https://www.dinama.gub.uy/>
- Uruguay. Ministerio de Ambiente, 2021. *Guía para definir la aptitud y categorización de las playas* [En línea]. Montevideo: MA. [Consulta: 26 febrero 2025]. Disponible en: <http://ambiente.gub.uy/>
- Uruguay. Ministerio de Ambiente, 2022. *Protocolo Nacional de actuación frente a eventos ambientales en playas* [En línea]. Montevideo: MA. [Consulta: 26 febrero 2025]. Disponible en: <https://www.ambiente.gub.uy/>
- Uruguay. Ministerio de Ambiente, 2024a. *Red de monitoreo de playas: calidad del agua para la temporada 2023-2024* [En línea]. Montevideo: MA. [Consulta: 22 febrero 2025]. Disponible en: <https://www.ambiente.gub.uy>
- Uruguay. Ministerio de Ambiente, 2024b. *Plan de monitoreo del Río Cuareim, informe de actividades y presentación de resultados año 2023* [En línea]. Montevideo: MA. [Consulta: 26 febrero 2025]. Disponible en: <https://www.ambiente.gub.uy/>
- United States Environmental Protection Agency, 2012. *Recreational water quality criteria* [En línea]. Washington: USEPA. [Consulta: 10 de diciembre 2024]. Disponible en: <https://www.epa.gov/>
- United States Environmental Protection Agency, 2023. *Report on the 2nd five-year review of EPA's recreational water quality criteria* [En línea]. Washington: USEPA. [Consulta: 25 de febrero 2025]. Disponible en: <https://www.epa.gov/>
- Venezuela. Decreto 883, de 11 de octubre de 1995. *Gaceta Oficial Extraordinaria* [En línea], 18 de diciembre de 1995. [Consulta: 03 febrero 2025]. Disponible en: <https://www.lurconsultores.com/>
- Vidal, V.; Sampognaro, L.; de León, F.; Cruk, C.; Perera, G.; Crisci, C. y Segura, A. M., 2024. A critical review of model construction and performance for nowcast systems for faecal contamination in recreational beaches Author links open overlay panel. En: *Science*

of *The Total Environment*, 954, 176233, ISSN 0048-9697. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176233>

- Wade, T. J.; Calderon, R. L.; Brenner, K. P.; Sams, E.; Beach, M.; Haugland, R.; Wymer, L. y Dufour, A. P., 2008. High sensitivity of children to swimming- Associated gastrointestinal illness – Results using a rapid assay of recreational water quality. En: *Epidemiology*, 19(3), pp.375-383. DOI: <https://doi.org/10.1097/ede.0b013e318169cc87>
- Wade, T. J.; Sams, E.; Brenner, K. P.; Haugland, R.; Chern, E.; Beach, M.; Wymer, L.; Rankin, C.; Love, D.; Li, Q.; Noble, R. y Dufour, A. P., 2010. Rapidly measured indicators of recreational water quality and swimming-associated illness at marine beaches: a prospective cohort study. En: *Environ Health*, 9(66). DOI: <https://doi.org/10.1186/1476-069X-9-66>
- Wiedenmann, A.; Kruger, P.; Dietz, K.; Lopez-Pila, J.; Szewzyk, R. y Botzenhart, K., 2006. A randomized controlled trial assessing infectious disease risks from bathing in fresh recreational waters in relation to the concentration of *Escherichia coli*, intestinal enterococci, *Clostridium perfringens*, and somatic coliphages. En: *Environmental Health Perspectives*, 114(2), pp. 228–236. DOI: <https://doi.org/10.1289/ehp.8115>