

ISSN 1688-6593 [en línea]

Número 14
Julio - diciembre 2017

INNOTEC

REVISTA DEL LABORATORIO TECNOLÓGICO DEL URUGUAY



INNOTEC ISSN 1688-6593 [en línea]

es una revista científica arbitrada editada por el Laboratorio Tecnológico del Uruguay.

Equipo editorial

Dirección

Dr. Jorge Silveira,
Laboratorio Tecnológico del Uruguay (LATU), Uruguay

Consejo editorial

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

Dr. Tomás López,
Coordinador de carrera Licenciatura en Leche y Productos Lácteos,
Universidad Tecnológica del Uruguay, Uruguay

PhD. Laura Moya Silva,
Universidad ORT Uruguay, Facultad de Arquitectura, Uruguay

MSc. Daniel Volpe,
Gerente de Análisis, Ensayo y Metrología,
Laboratorio Tecnológico del Uruguay-LATU, Uruguay

Dr. Federico Harte,
Profesor adjunto de Food Science, Penn State University

Edición

Lic. Marina Barrientos,
Edición revistas INNOTEC, Centro de Información Técnica,
Laboratorio Tecnológico del Uruguay-LATU, Uruguay

Administración de OJS y soporte técnico

Lic. Lorena Fiori,
Centro de Información Técnica.
Laboratorio Tecnológico del Uruguay-LATU, Uruguay

Diseño

Manosanta Desarrollo Editorial

Acerca de INNOTEC

INNOTEC es una publicación arbitrada del Laboratorio Tecnológico del Uruguay (LATU) que publica artículos originales inéditos con una periodicidad semestral en los periodos de enero a junio y julio a diciembre.

De contenido multi scope, sus áreas temáticas prioritarias se corresponden con las líneas estratégicas de investigación del LATU: Forestales, Medio Ambiente, Metrología y Tecnología Alimentaria.

INNOTEC es una revista científica arbitrada en modalidad doble ciego por un equipo de revisores independiente y externo a su entidad editora. INNOTEC es editada en Montevideo, Uruguay, por el Laboratorio Tecnológico del Uruguay (LATU) por medio de su Centro de Información Técnica, en formato digital en Open Journal Systems (<http://ojs.latu.org.uy>).

La transferencia de conocimiento y el intercambio con la comunidad son objetivos prioritarios de nuestra publicación, que reúne trabajos originales con un enfoque de rigor y calidad teórica y metodológica con el fin de contribuir a la producción sistemática de nuevo conocimiento científico tecnológico.

La revista está dirigida a investigadores, académicos, tecnólogos y estudiantes vinculados a los campos temáticos que aborda y que se corresponden a las áreas estratégicas de investigación del LATU y del país.

INNOTEC se encuentra indexada en las siguientes bases de datos: Latindex, Google Académico, Fuente Académica Premier de EBSCOhost y DOAJ.



La colección completa se puede consultar en línea en <http://ojs.latu.org.uy/index.php/INNOTEC/index>

La versión digital se distribuye bajo la modalidad de acceso abierto y los derechos autorales son protegidos por Creative Commons (CC) Atribución-NoComercial 3.0 Unported.

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.

INNOTEC - NÚMERO 14 - Julio a diciembre de 2017

ISSN electrónico: 1688-6593

Título clave: INNOTEC (En línea)

Título clave abreviado: Innotec (En línea)

Centro de Información Técnica, LATU
Av. Italia 6201. Tel. (598) 2601 3724, ints. 1314 y 1350
ditec@latu.org.uy
<http://www.latu.org.uy>
<http://ojs.latu.org.uy>

Política editorial 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 ditec@latu.org.uy para recibir instrucciones para el envío de artículos a nuestro proyecto editorial.

SUMARIO

Instrucciones a los autores	4
Índice de autores.	67
Índice temático.	68

ARTÍCULOS

AGUAS

07. Evolución de la eutrofización en el Río Santa Lucía: influencia de la intensificación productiva y perspectivas

Evolution of eutrophication in Santa Lucía river: influence of land use intensification and perspectives
Aubriot, Luis; Delbene, Lucía; Haakonsson, Signe; Somma, Andrea; Hirsch, Federica; Bonilla, Sylvia.

17. Comunidades de macroalgas en puntas rocosas de la costa de Rocha, Uruguay

Macroalgae communities in rocky outcrops in Rocha, Uruguay
González-Etchebehere, Lucila; Kruk, Carla; Scarabino, Fabrizio; Laporta, Martín; Zabaleta, María; González, Leticia; Vélez-Rubio, Gabriela.

ENERGÍA

31. Potencial del efluente de los parques geotermales del Sistema Acuífero Guaraní para la calefacción de invernáculos

Potential of the Guaraní's Aquifer System geothermal parks effluent for the heating of greenhouses
Ramos, Julián Andrés; Blanco, Carlos Nicolás; Gamazo, Pablo; Saravia, Celmira; de Souza, Romina; de los Santos, Jorge; Betancur, Oscar; Ferreira, Álvaro.

37. Hidrotatamiento catalítico de aceites vegetales para la producción de biocombustibles líquidos

Catalytic hydrotreating of vegetable oils for the production of liquid biofuels
Volonterio, Elisa; Bussi, Juan; Castiglioni, Jorge; Vieitez, Ignacio; Jachmanián, Iván.

44. Caracterización de pigmentos extraídos de algas rojas de la Antártida para su posible uso en celdas solares del tipo DSSC

Characterization of dyes extracted from Antarctic red algae for their use in DSSC
De Bon, Micaela; Hurtado, Joaquín; Enciso, Paula; Armeli Minicante, Simona; Cerdá, María Fernanda.

METROLOGÍA

50. Calibración de espirómetros por vía húmeda en el LATU y su adaptación a la ley de «alcohol cero»

Calibration of breath analyzers using wet bath simulators by LATU and its adaptation to «zero tolerance» DUI legislation
Silva, Ana I.; Ferrando, Ma Eugenia; Ferreira, Elizabeth.

TEXTILES

58. Estudio de características vinculadas al procesamiento textil en lanas del Consorcio Regional de Innovación en Lanass Ultrafinas

Evaluation of characteristics related to textile processing in wool from the Regional Consortium of Innovation in Ultrafine Wools
Pérez, Víctor; Bonner, Martín; Montossi, Fabio; Ramos, Zully; Sacchero, Diego; De Barbieri, Ignacio

Instrucciones a los autores para publicar en INNOTEC

Ámbito de los artículos y proceso de revisión

INNOTEC publica artículos originales inéditos en campos temáticos que responden a las áreas estratégicas de investigación del LATU y del país.

Esta publicación anual recopila las investigaciones realizadas por técnicos del Laboratorio Tecnológico del Uruguay (LATU) y equipos de investigación de otras instituciones en el marco de 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.

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 consideran 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, 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 online. La versión digital se distribuye bajo la modalidad de acceso abierto y los derechos autorales son protegidos por Creative Commons (CC) Atribución-NoComercial 3.0 Unported. Al ingresar al sistema <http://ojs.latu.org.uy> 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 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 previstas por la organización y su Consejo editorial para cada edición y de realizar modificaciones que favorezcan la óptima presentación de los artículos 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 y que no forman parte del staff editorial. Los comentarios y recomendaciones de los árbitros 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 INNOTEC 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 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 diríjase al correo electrónico de referencia ditec@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 en relación al conocimiento previo. Si procede, se mencionan posibles líneas futuras de investigación y de aplicación de los resultados.

Reconocimientos. 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 y español.

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

Palabras clave, 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, gráficos 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.

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 y gráficos. Las figuras deben numerarse correlativamente en orden de aparición en el texto, y deben incluir un breve título explicativo en el margen inferior. Si es necesario incluir fotos o imágenes, estas se deben designar como figuras, deben ser nítidas y enviadas en formato jpg (mínimo 300 px aseguran una buena calidad de visualización). Las tablas deben ser numeradas correlativamente y en forma independiente de las figuras, y cada entrada debe ocupar su propia celda. Las tablas se numeran según el orden de aparición en el texto, y su título explicativo debe ubicarse en el margen inferior. Evite utilizar líneas verticales, incluir más de dos tablas por carilla y dividir tablas en más de un folio o en forma perpendicular al texto. Recuerde que el texto presenta las tablas, no desarrolla su contenido, estas deben explicarse en sí mismas.

Los gráficos deben ser enviados en formato xls o doc, con los datos editables, para su eventual utilización en la etapa de diseño. No se consideran válidos los gráficos enviados en formato jpg, salvo en los casos en los que hayan sido creados en programas que no habilitan la exportación a Excel.

Además de estar insertadas en el artículo, cada figura, gráfico 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).

Por favor, evite las notas al pie en el desarrollo del artículo. Denominaciones en latín: Deben ir en cursiva.

Estilo y formato de citas y referencias 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. Nº de edición. Lugar de edición: editorial. (Serie; Nº). ISBN (Este último si se posee)

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

Newman, R., 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.

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.

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

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.

Evolución de la eutrofización en el Río Santa Lucía: influencia de la intensificación productiva y perspectivas

Evolution of eutrophication in Santa Lucía river: influence of land use intensification and perspectives

Aubriot, Luis (1); Delbene, Lucía (1); Haakonsson, Signe (1); Somma, Andrea (1); Hirsch, Federica (1); Bonilla, Sylvia (1) (1) Grupo de Fisiología y Ecología de Fitoplancton, Sección Limnología, Instituto de Ecología y Ciencias Ambientales, Facultad de Ciencias, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay.

Contacto: laubriot@fcien.edu.uy

RECIBIDO: 5/9/2017 – APROBADO: 25/11/2017

Resumen

El río Santa Lucía (RSL), principal fuente de agua potable de Uruguay, presenta síntomas de eutrofización. Este estudio evaluó algunos factores que influyen en la eutrofización del río para contribuir a la conservación y gestión del recurso. Se analizó la mayor base de datos de calidad de agua del RSL (2004 - 2016), con indicadores de intensificación productiva y cambios en el uso del suelo. La eutrofización del RSL tendió a estabilizarse en 2010, con máximos de fósforo total (PT) en 2013. Los embalses aumentaron su estado hipereutrótico, y los arroyos Canelón Grande y Chico se mantienen en hipereutrofia. El fósforo reactivo soluble se correlacionó con el PT ($r^2 = 0,95$, 76 % del total), asociado al exceso de fertilización de suelos y no se relacionó con indicadores de erosión. La relación significativa entre el PT y la importación de fertilizantes (indicador proxy) refleja el impacto de las actividades productivas (máximas: 2011 - 2015) en la eutrofización del RSL. Para mejorar la eficacia en la retención de nutrientes será necesario profundizar en las medidas de control de la fertilización y de efluentes de tambos, la extensión de las zonas de amortiguación hacia los tributarios de menor orden y las nacientes.

Palabras clave: Calidad de agua, fósforo, erosión, fertilizantes, ecosistemas lóticos, embalses, gestión, contaminación.

Abstract

Santa Lucía River (RSL) is the main drinking water resource of Uruguay which has symptoms of eutrophication. This study analyzed factors influencing the eutrophication of the river in order to contribute to the conservation and management of water quality. We analyzed the largest water quality database of RSL (2004 - 2016), including land-use changes and indicators of agriculture production. The eutrophication of RSL tended to stabilize in 2010, with maximum values of total phosphorus (PT) in 2013. The reservoirs increased the hypereutrophic state, while the rivers Canelón Grande and Chico were stable in hypereutrophy. The soluble reactive phosphorus correlated positively with PT ($r^2 = 0,95$, 76 % of PT), associated to the excess of land fertilization and it was not correlated with soil erosion indicators. The significant correlation between PT and fertilizers import reflected to the impact of productive activities in the basin (maxima: 2011 - 2015) and RSL eutrophication. Measures to control the excess of land fertilization, dairy effluents, together with the extension of buffer zones, are necessary to improve the efficacy of nutrient load reduction in streams and water sources.

Keywords: Water quality, phosphorus, land erosion, fertilization, lotic ecosystems, reservoirs, management, contamination.

Introducción

El aumento de las actividades productivas y el incremento poblacional han alterado el funcionamiento y estructura de los principales ecosistemas acuáticos y terrestres a nivel mundial (Paerl, 2017). En general, los síntomas más perceptibles del impacto antrópico en los ecosistemas naturales no se producen

de forma progresiva, sino luego de un período de acumulación en el cual no aparecen síntomas visibles (Scheffer, et al., 2001; Smith y Schindler, 2009). Por lo tanto, la identificación de tendencias que permitan conocer la evolución y posible predicción del comportamiento del ecosistema es fundamental para la gestión y conservación de los recursos naturales. Dentro de los indicadores de eutrofización más robustos y

estudiados se destaca la concentración de fósforo total (PT) en el agua (Schindler, 1977; Bennett, et al., 2001). Con base en este indicador, o en combinación con otras variables, se han desarrollado numerosos índices que permiten clasificar a los ecosistemas acuáticos en un gradiente de oligo a hipereutrófico, indicando así su condición de productividad potencial y de alteración o impacto.

En Uruguay se han producido cambios significativos en la matriz productiva como resultado de la intensificación y expansión de las actividades agropecuarias e industriales de la última década (DINAMA, 2014; OPP, 2015). Estas actividades, muchas veces realizadas sin suficientes medidas de preservación del ambiente, han generado severos problemas en la calidad del agua y en la conservación de los ecosistemas acuáticos del país (Bonilla, et al., 2015; Brazeiro, 2015).

En los últimos años la sociedad uruguaya ha experimentado el deterioro de la calidad de agua de varios ecosistemas acuáticos, situación que fue anunciada oportunamente por varios estudios académicos (Chalar, 2006; Arocena, et al., 2008; Chalar, et al., 2011; Bonilla, et al., 2015). En la actualidad, la generación de embalses para riego a gran escala (modificación de Ley de Riego, Uruguay, 1997; Fernández, et al., 2016), y la instalación de nuevas industrias de gran porte en el país, sumado a la tendencia de aumento de actividades agropecuarias, plantean un escenario desafiante para la conservación de los ecosistemas naturales y de la calidad de agua. A este contexto preocupante se suman las predicciones de cambio climático que indican aumentos de temperatura y de precipitaciones para la región (IPCC, 2014), lo que podría potenciar los efectos de la eutrofización de los ecosistemas acuáticos (Paerl, 2017; Sinha, et al., 2017). Por lo tanto, se plantea un escenario complejo que requiere de la coordinación y esfuerzos entre usuarios e instituciones vinculadas al monitoreo y a la gestión de los recursos naturales para instrumentar planes de manejo sostenibles a largo plazo.

La cuenca del Río Santa Lucía (RSL), tercera cuenca en extensión del país (13.480 km²), es un sistema fluvial mixto, lótico y léntico (embalses) y es el principal recurso de agua potable para el 60 % de la población (Achkar, et al., 2014). A su vez, es fuente de agua para riego y depósito de efluentes puntuales y difusos de la zona de mayor actividad agroindustrial del país (DINAMA-JICA, 2011; DINAMA, 2015). Desde 2004, cuando se comenzó a registrar información sistemática de calidad de agua, el RSL sufre una progresiva eutrofización, alcanzando niveles elevados de PT hasta 2011 (DINAMA, 2015). Otro síntoma de deterioro ambiental en la cuenca del RSL fue la aparición de una floración de cianobacterias (*Dolichospermum* sp., marzo de 2013) con alta producción de geosmina, que otorgó mal sabor y olor al agua. Algunos episodios de floraciones también se registraron en ecosistemas acuáticos destinados a la potabilización de agua en otras zonas del país (Laguna del Sauce, Bonilla, et al., 2015; Río Negro, Chalar, et al., 2015; González-Piana, et al., 2017). Esta situación aceleró la formulación y ejecución del Plan de Acción para la Protección del Agua en la Cuenca del Santa Lucía (DINAMA, 2013), la creación de las Comisiones de Cuencas y la Mesa Técnica del Agua, entre otros ámbitos, y la reciente propuesta del Plan Nacional de Aguas (MVOTMA, 2017).

En este trabajo se investiga la influencia de la intensificación productiva agropecuaria en la eutrofización del río Santa Lucía y su evolución, mediante el análisis de la mayor serie temporal de datos disponibles para la cuenca hasta el presente (2004 - 2016). Se utilizó un indicador *proxy* de intensificación productiva e información reciente de los cambios en el uso

del suelo. Se utilizó el PT como el indicador más simple y ampliamente utilizado en estudios de eutrofización, y el que contó con la mayor cantidad de registros en la base de datos para el análisis de tendencias temporales.

Materiales y métodos

Área de estudio

La cuenca del Río Santa Lucía comprende a los ríos Santa Lucía (RSL), Santa Lucía Chico (RSLCH) y San José. Del RSL se extrae agua para potabilizar para el 60 % de la población. El caudal para abastecimiento de agua está regulado por tres embalses: Paso Severino (RSL Chico: RSLCH) y Canelón Grande (sobre el arroyo Canelón Grande, ACG) son los principales y, en menor medida, San Francisco. El área de estudio comprendió el área definida como Zona A, con el objetivo de uso preponderante «fuente de agua potable» (DINAMA, 2015), con estaciones de muestreo localizadas aguas arriba de la planta potabilizadora de Aguas Corrientes (Figura 1). Las estaciones de muestreo se localizaron en la subcuenca del RSL (840.760 ha), aguas arriba de la represa de Aguas Corrientes, y en la del ACG (72.383 ha) (Tabla 1). La estación de muestreo SL integra el aporte de RSLCH y RSL, mientras que el sitio EPS está localizado en el embalse de Paso Severino (RSLCH) y PP en Paso Pache (RSL). La subcuenca del ACG (sitio CBZ, Belinzon-Margat) comprende a la subcuenca del embalse de Canelón (EC) y el Arroyo Canelón Chico (ESC, Paso Espinosa), aguas debajo de la Ciudad de Canelones (Figura 1).

Base de datos histórica

Se utilizó la base de datos histórica para la cuenca del RSL desde 2004 a 2010 de DINAMA y que fue compilada por la Sección Limnología (Bonilla, et al., 2015). Para este estudio se completó esa información con la serie de datos de 2011 a 2016 proporcionada por DINAMA. Se incluyeron datos adicionales para los años 2014 y 2015 de los muestreos realizados por la Facultad de Ciencias (FC) en la cuenca del RSL (en el marco del Convenio FC y Obras Sanitarias del Estado; responsables L. Aubriot y S. Bonilla) (Figura 1). En la Tabla 1 se muestran las estaciones de muestreo utilizadas según cada institución. Se seleccionaron datos de fósforo total (PT), fósforo reactivo soluble (PRS), sólidos totales en suspensión (STS) y turbidez (NTU) del agua. Se obtuvieron datos pluviométricos mensuales para el período 2004-2016 de la estación meteorológica de Florida (INUMET), por tener datos completos y ser representativa de la cuenca alta del RSL.

Usos de suelo

En la cuenca del RSL se concentra el 32 % de la población rural nacional, que se dedica principalmente a la producción hortícola, frutícola, vitivinícola, a la cría de aves y cerdos, y a la actividad lechera (Achkar, et al., 2012). Los usos del suelo son el ganadero (71,3 %, incluye la lechería y tambos), seguido por la actividad agrícola (16,2 %) y forestal (4,2 %), con 7,2 % de monte nativo, humedales, cuerpos de agua y suelos rocosos (Achkar, et al., 2012). Las ciudades de la cuenca no cuentan con saneamiento o cuentan con tratamiento de efluentes incompleto en vías de adecuación (URSEA, 2017), a excepción de la

Subcuenca	FC	Coordenadas FC	DINAMA	Coordenadas DINAMA	Nº muestreos	Hectáreas subcuenca
RSL y RSLCH	SL	34°30'21,20"S, 56°23'33,66"O	SL05 - C01 -C1	34°26'57,65"S, 56°24'8,38"O	62	840.760
RSL	PP	34°21'51,10"S, 56°15'0,42"O	SL04 - C03 -C3	*	62	494.214
RSLCH	EPS	34°15'49,41"S, 56°18'17,04"O	PS02 - F5	*	63	256.962
ACG y ACCH	CBZ	34°30'19,92"S, 56°23'1,03"O	CA04 - C02 -C2	34°29'4,97"S, 56°20'27,95"O	62	72.383
ACG	EC	34°27'38,28"S, 56°16'2,13"O	CA03-CG02 -C4	*	60	31.864
ACCH	ESC	34°29'56,45"S, 56°16'55,37"O	CA02 - C05 -C5	*	59	36.557

Tabla 1. Correspondencia entre las estaciones de muestro utilizadas en la base de datos histórica de FC (usada en el Convenio FC-OSE) y DINAMA (nomenclatura actual y antigua). RSL: Río Santa Lucía, RSLCH: Río Santa Lucía Chico, ACG: Arroyo Canelón Grande, ACCH: Arroyo Canelón Chico. SL: Río Santa Lucía (aguas arriba de Aguas Corrientes); PP: Paso Pache; EPS: Embalse de Paso Severino; CBZ: Belinzon; EC: embalse de Canelón Grande, ESC: Paso Espinosa. *Coordenadas iguales a las de FC.

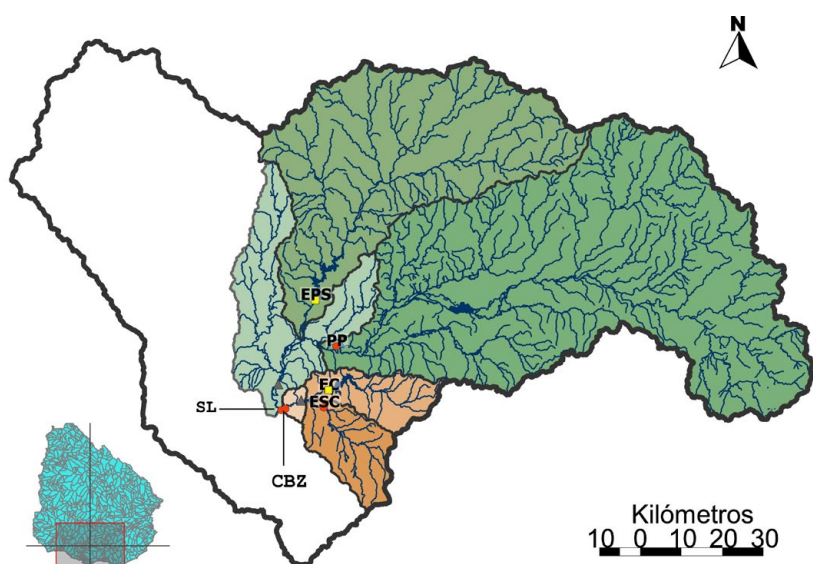


Figura 1. Mapa de la cuenca del Río Santa Lucía (contorno negro) y las subcuencas estudiadas y su red hidrográfica (contornos grises). Se incluye la subcuenca de los ríos Santa Lucía y Santa Lucía Chico (sitio SL, Santa Lucía, área coloreada con celeste y verde). Aguas arriba de SL se ubica la subcuenca que comprende la continuación del Río Santa Lucía (PP, Paso Pache) y Santa Lucía Chico (EPS, embalse de Paso Severino, ambas subcuencas coloreadas con verde). La subcuenca del Arroyo Canelón Grande (Sitio CBZ, Belinzon-Margat, color rosado claro, rosado oscuro y naranja), comprende la subcuenca del embalse de Canelón (EC, color rosado oscuro) y el Arroyo Canelón Chico (ESC, Paso Espinosa, color naranja). Los sitios de muestreo en cursos fluviales y en embalses se marcan con círculos rojos y cuadrados amarillos, respectivamente.

ciudad de Canelones que tiene tratamiento terciario, aunque no comprende a la totalidad de la población. Dieciocho de las 54 industrias operativas en la cuenca (frigorífica, láctea, textil, bebidas) comenzaron a usar tratamiento completo de efluentes líquidos a partir de 2016 (URSEA, 2017). Un kilómetro aguas arriba de la planta potabilizadora de OSE (Aguas Corrientes) descarga el arroyo Canelón Grande (ACG). Este arroyo tiene

una alta influencia de aportes puntuales (industria frigorífica, asentamientos sin saneamiento, cría de animales a corral, por ejemplo) y difusos por la agricultura intensiva, a la vez que su cuenca es la más densamente poblada (68,2 hab/km², mientras que la cuenca de SL va de 13,9 a 35,6 hab/km²).

La información geográfica se analizó con el software libre gvSIG 2.2.0. La composición relativa de los usos de

suelo se determinó para cada subcuenca para los años 2000, 2008, 2011 y 2015 a partir de las capas de acceso libre generadas por el Sistema de Información Territorial de la Dirección Nacional de Ordenamiento Territorial, del MVOTMA (SIT-MVOTMA). El SIT-MVOTMA utiliza las categorías según sistema estandarizado *Land Cover Classification System* (LCCS) (Di Gregorio, 2016). En este trabajo se analizaron las áreas terrestres cultivadas y manejadas (ATCM), dentro de estas los cultivos regados y de secano < 4-5 ha, cultivos regados > 4-5 ha, cultivos de secano > 4-5 ha y frutales.

Análisis de datos

Se eliminaron valores atípicos de la base de datos cuando se encontraron por encima o debajo de los límites superiores e inferiores (cuartil superior o inferior ± 1.5 x espacio intercuartilico) calculados para cada estación de muestreo. Las series temporales fueron analizadas con el test no paramétrico Mann-Kendall (M-K, estadístico S, Makesens 1.0). El ajuste de regresiones partidas por tramos (Liu, et al., 2010; Singh, et al., 2015; Campa y Morales, 2016) se realizó con Sigma Plot 11.0 (Systat Software Inc.). Cuando el ajuste por tramos no mostró cambios de tendencia se utilizaron regresiones lineales simples o lineales semilogarítmicas para cumplir con los requisitos del análisis paramétrico. La normalidad de datos se evaluó con Shapiro-Wilk y la homogeneidad de varianza con la distribución normal de los residuos. Para la comparación entre periodos se utilizó el análisis de ANOVA de una vía, cuando se cumplieron los supuestos de normalidad y homocedasticidad de varianza, y en caso contrario se usó la prueba de Kruskal-Wallis (K-W), test *post hoc* Tukey y Mann-Whitney (M-W) (Sigma Plot 11.0).

Se utilizaron datos de importación de fertilizantes para el país como indicador *proxy* de intensificación productiva agraria para la cuenca del RSL, debido a que no existen datos disponibles de fertilización discriminados por cuenca o departamento. Se seleccionaron datos de fertilizantes totales y fosfatados (se incluyeron las materias primas para la elaboración de fertilizantes y se excluyó la urea) tomados del Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca (MGAP-División de Suelos y Aguas-Departamento de Fertilizantes, MGAP, 2016b). Se obtuvo una correlación significativa entre las toneladas de fertilizantes totales importadas y los índices de precios anuales (FAO, 2017) de alimentos, carne, lácteos y cereales ($p < 0,001$). La importación de fertilizantes se correlacionó con la producción nacional de soja, trigo y maíz (soja: $r^2 = 0,60$; $p < 0,001$, trigo: $r^2 = 0,47$; $p = 0,05$, maíz: $r^2 = 0,80$; $p < 0,001$) mejor que con otros cultivos cereales e industriales. También se obtuvo una correlación altamente significativa con la producción de leche comercial desde el año 2000 ($r^2 = 0,75$; $p < 0,001$) (fuente de datos de producción: MGAP, 2016a).

Para analizar la relación entre el PT en el agua y las variables explicativas (fertilizantes, precipitaciones y NTU) se ajustaron modelos lineales generalizados (GLM). Para esto, los sitios fueron agrupados en las subcuencas del río Santa Lucía (RSL = EPS + PP + SL) y del arroyo Canelón Grande (ACG = CBZ + ESC + EC) debido a las claras diferencias en los valores de fósforo total entre subcuencas. Los modelos fueron construidos utilizando una matriz con valores de PT y turbidez del agua (NTU) promedio por año y por subcuenca, fertilizantes totales por año para el país, y

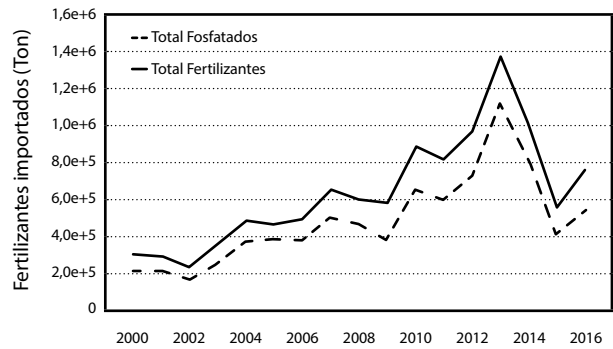


Gráfico 1. Evolución de la importación de fertilizantes totales y con fosfatos (urea excluida) por año para Uruguay. Se incluyen en estos datos la importación de materias primas para la elaboración de los fertilizantes. Fuente: MGAP-División de Suelos y Aguas-Departamento de Fertilizantes (MGAP, 2016b).

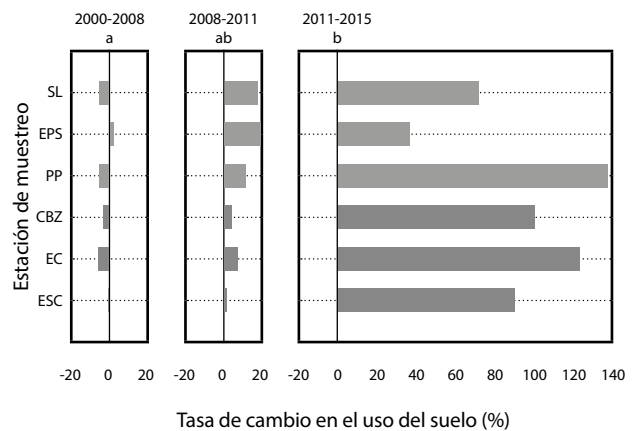


Gráfico 2. Tasa de cambios en el uso del suelo (%) para las subcuencas del RSL, entre los tres periodos que se indican. Se incluyeron las Áreas Terrestres Cultivadas y Manejadas (ATCM): los Cultivos Regados y de Secano < 4-5 ha, Cultivos Regados > 4-5 ha, Cultivos de Secano > 4-5 ha, y Frutales, según la clasificación Land Cover Classification System (LCCS) de FAO (ISO TC211 19144-LMCL). Ver siglas de las estaciones de muestreo en Figura 1. Barras en gris claro corresponden a la cuenca del Río Santa Lucía y gris oscuro a la cuenca del Arroyo Canelón Grande. Las letras diferentes indican diferencias significativas entre periodos (K-W, Tukey, $p < 0,05$).

precipitaciones acumuladas por año. Para cumplir con los supuestos de normalidad y homogeneidad de las varianzas de los residuos, las variables fueron log-transformadas y los modelos fueron sujetos a análisis de los residuos. Los análisis se realizaron para cada subcuenca partiendo de un modelo inicial que contenía todas las variables explicativas ($\text{Log}(\text{PT}) \sim \text{Log}(\text{fertilizantes}) + \text{Log}(\text{turbidez}) + \text{Log}(\text{precipitaciones})$). En función de la significancia de explicación de cada variable independiente se seleccionó el modelo más parsimonioso y explicativo con el Criterio de Información de Akaike (AIC) (Burnham y Anderson, 2002). Para este análisis se utilizó el programa R (3.0.3.6).

Resultados

Indicadores de intensificación productiva

En el periodo 2000 – 2016, la importación de fertilizantes totales para el país mostró un aumento progresivo desde los valores mínimos en 2002 a los máximos en 2013, con un aumento de 6,1 veces (Gráfico 1). La misma tendencia se observó para los fertilizantes fosfatados (como la suma de fosfato de amonio, fosfato monoamónico, superfosfato triple y materias primas para su elaboración). A partir de 2013 se produjo una disminución sostenida de hasta tres veces el volumen de las importaciones. Los cambios en el uso del suelo de la subcuenca del RSL muestran para las ATCM una tasa de variación de negativa a neutra entre 2000 - 2008 (Gráfico 2). En el periodo 2008 a 2011 se observaron aumentos de hasta el 20 % de la superficie de las ATCM, con mayores cambios en la cuenca del RSL, particularmente en el RSLCH. Los mayores cambios de superficie de ATCM se observaron entre el periodo 2011 y 2015, con los valores máximos para el RSL, particularmente en la subcuenca correspondiente a PP (Figura 1 y Gráfico 2, +138,2 % de tasa de cambio y 36,4 % de la superficie de la subcuenca ocupada por ATCM). En la cuenca del ACG los cambios de superficie ocupadas por las ATCM fueron marcadamente mayores en ese periodo, en particular en la subcuenca del EC (tasa máxima de +123,5 %, y 69,3 % de la superficie ocupada por ATCM). La diferencia de la tasa de variación de superficie de ATCM entre 2000 y 2008 y entre 2011 y 2015 fue significativa (K-W: $p = 0,002$, *post hoc* Tukey y K-W: $p < 0,001$, respectivamente).

Fósforo total en agua y tendencias temporales

La concentración de PT en agua presentó diferencias significativas entre las subcuencas (Gráfico 3). La subcuenca del ACG tuvo valores significativamente mayores de PT que la del RSL (ACG: $1290 \pm 554 \mu\text{g PT L}^{-1}$; RSL: $244 \pm 100 \mu\text{g PT L}^{-1}$, media y desvío estándar del período, respectivamente; M-W, $p < 0,001$). Los sitios dentro de la cuenca del RSL y del ACG no presentaron diferencias significativas entre ellos. Tampoco se encontraron diferencias significativas entre el PT de los dos embalses. Las concentraciones medias máximas del período estudiado se encontraron en ESC ($2500 \mu\text{g PT L}^{-1}$, ACCH), seguido por CBZ ($1600 \mu\text{g PT L}^{-1}$, ACG), y las mínimas en SL y PP (60 y $110 \mu\text{g PT L}^{-1}$, respectivamente).

Las series temporales de datos anuales de PT tuvieron aumentos significativos en SL (44), PP (34), EPS (64), EC (56) (M-K $p < 0,05$, valores de S entre paréntesis). No se determinó una tendencia significativa en CBZ y ESC (M-K). Se obtuvo un ajuste significativo con funciones lineales para los sitios SL y PP (Gráfico 4). Los puntos de quiebre se ajustaron para los años 2010 y 2013, para SL y PP, respectivamente. El cambio de tendencia hacia una pendiente negativa se encontró en PP. Los embalses EPS y EC mostraron una tendencia lineal positiva sin puntos de quiebre. En el caso de EPS la regresión se realizó con datos transformados $\log(\text{PT})$ para cumplir con homogeneidad de variancia de residuos. En toda la distribución de datos desde 2004 no se observaron valores por debajo del límite estándar de PT ($25 \mu\text{g PT L}^{-1}$) para las aguas superficiales según la legislación uruguaya (Uruguay, 1979).

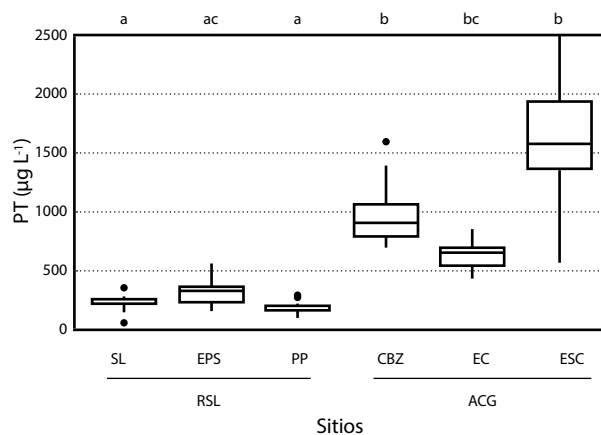


Gráfico 3. Concentración de fósforo total (PT) en agua para las medias del período 2004 - 2016 en cada sitio (ver nomenclatura en Figura 1) y subcuenca (Río Santa Lucía: SL, EPS y PP; Arroyo Canelón Grande: CBZ, EC y ESC). Límite superior e inferior de las cajas: percentil 75 y 25, respectivamente, línea continua horizontal: mediana, líneas verticales arriba y abajo: percentil 90 y 10, respectivamente, y círculos negros: valores medios atípicos. Las letras diferentes indican diferencias significativas (K-W, Tukey, $p < 0,05$).

Factores asociados a las variaciones de fósforo total

Se correlacionaron todos los datos de PT para ambas subcuencas con el PRS, turbidez y STS, con el objetivo de evaluar si las concentraciones de PT se relacionan a partículas en suspensión, por ejemplo asociadas a la erosión de suelos o al fósforo disuelto que puede provenir de la fertilización. Se obtuvo una correlación altamente significativa entre el PRS y PT ($r^2: 0,95$, $F = 2120$, $p < 0,0001$) y no se obtuvo correlación con NTU ni con STS (Gráfico 5). El PRS de cada sitio contribuyó al PT con un promedio mínimo de 72 % en el sitio PP y un máximo de 83 % en el CBZ. Se puede concluir que el fósforo en los cursos de agua de las subcuencas se encuentra mayoritariamente como fosfato inorgánico disuelto, biodisponible, y no se encuentra asociado a las partículas en suspensión.

Se analizó la relación entre el PT en el agua con las variables explicativas fertilizantes, precipitaciones y NTU, para la subcuenca RSL, mediante el ajuste del modelo GLM (Gráfico 6). Las variables precipitaciones y turbidez del agua no fueron significativas para la construcción del modelo. El mejor modelo para PT incluyó únicamente fertilizantes (Fer) como variable significativa y explicó el 42 % de la variabilidad (Gráfico 6, modelo: $\log(\text{PT}) = -0,88 + 0,57 \times \log(\text{Fer})$, % de desviación = 42, $gd = 12$, $\text{AIC} = -15,4$, (AIC modelo inicial = $-5,65$)). Para la cuenca del ACG no se encontró ningún modelo con parámetros significativos.

Discusión

En este trabajo mostramos la evolución de la eutrofización en la cuenca del Río Santa Lucía, aguas arriba de Aguas Corrientes, y la influencia de la intensificación agropecuaria, mediante la evaluación de la mayor serie temporal de datos

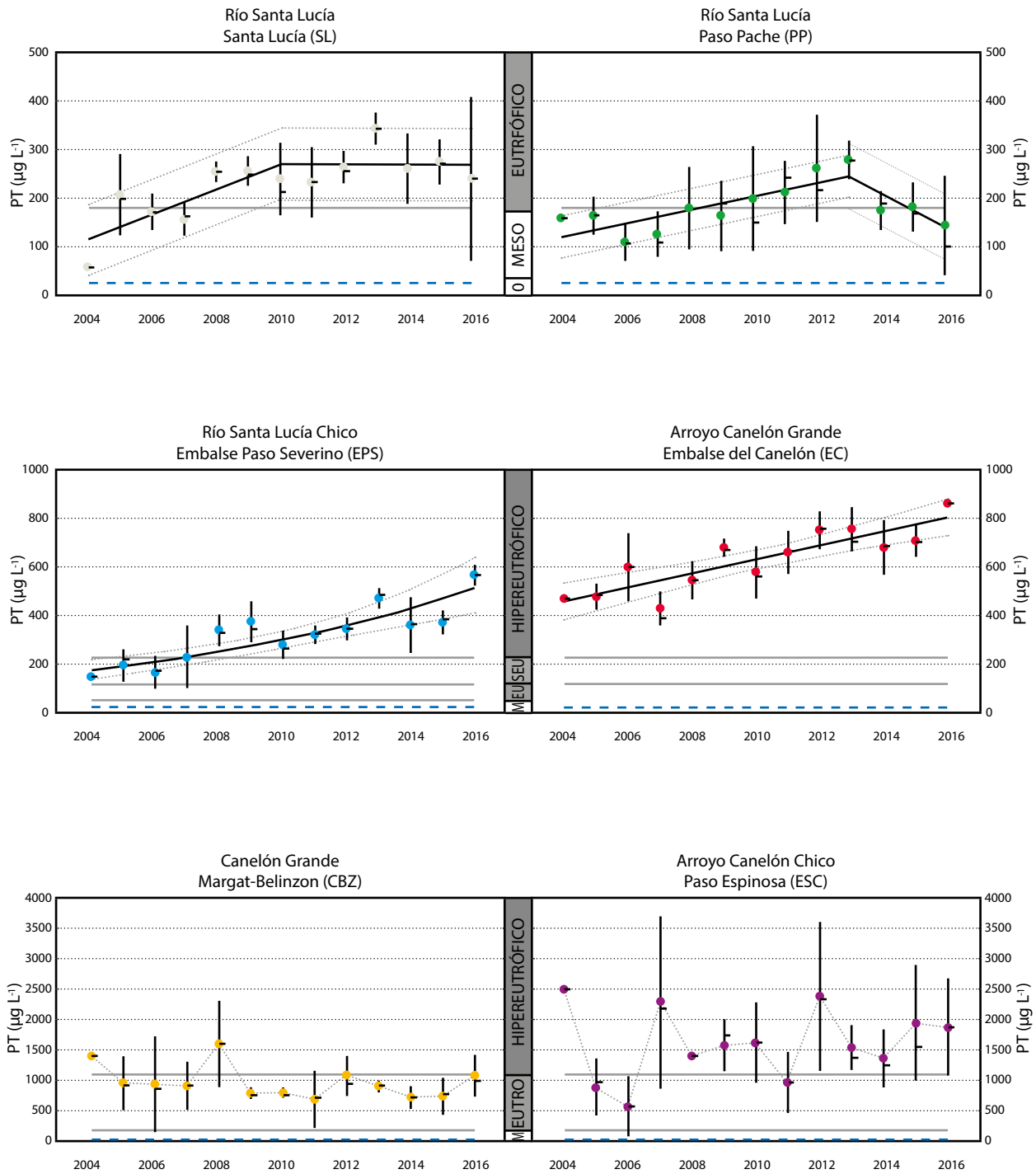


Gráfico 4. Series temporales de la concentración de fósforo total (PT) desde 2004 a 2016, en la cuenca del Río Santa Lucía y del Arroyo Canelón Grande. Los círculos indican la media, la línea vertical el desvío estándar y la línea horizontal negra la mediana. Se muestran los ajustes de regresiones lineales partidas en dos tramos (línea continua) y los intervalos de confianza 95 % (línea punteada) para SL, EPS y PP. Los parámetros para SL: $y_1: 115,6$, $y_2: 271,9$, $y_3: 269,4$, T_1 (punto de quiebre): 2010; $r^2: 0,67$, $F = 6,1$, $p = 0,015$; y PP: $y_1: 121,4$, $y_2: 246,2$, $y_3: 142,9$, T_1 (punto de quiebre): 2013; $r^2: 0,67$, $F = 6,1$, $p = 0,015$. Para el EPS el mejor ajuste fue semilogarítmico lineal (modelo: $\log(PT) = 10^{(0,03885x(\text{año}) - 75,6154)}$; $r^2: 0,79$, $F = 39,8$, $p < 0,0001$) y lineal simple en el EC (modelo: $PT = 28,4x(\text{año}) - 56515,4$, $F = 34,3$, $p < 0,0001$). No hubo ajustes significativos para CBZ y ESC. La línea entrecortada azul corresponde al límite del estándar de PT del Decreto 253/79 (Uruguay, 1979). Las líneas horizontales grises y las barras verticales muestran los límites del índice de estado trófico para ríos y embalses (Lamparelli, 2004). O: oligotrófico, M: mesotrófico, EU y EUTRO: eutrófico, SEU: supereutrófico. Nótese la diferencia de escalas del eje de las ordenadas en los paneles verticales.

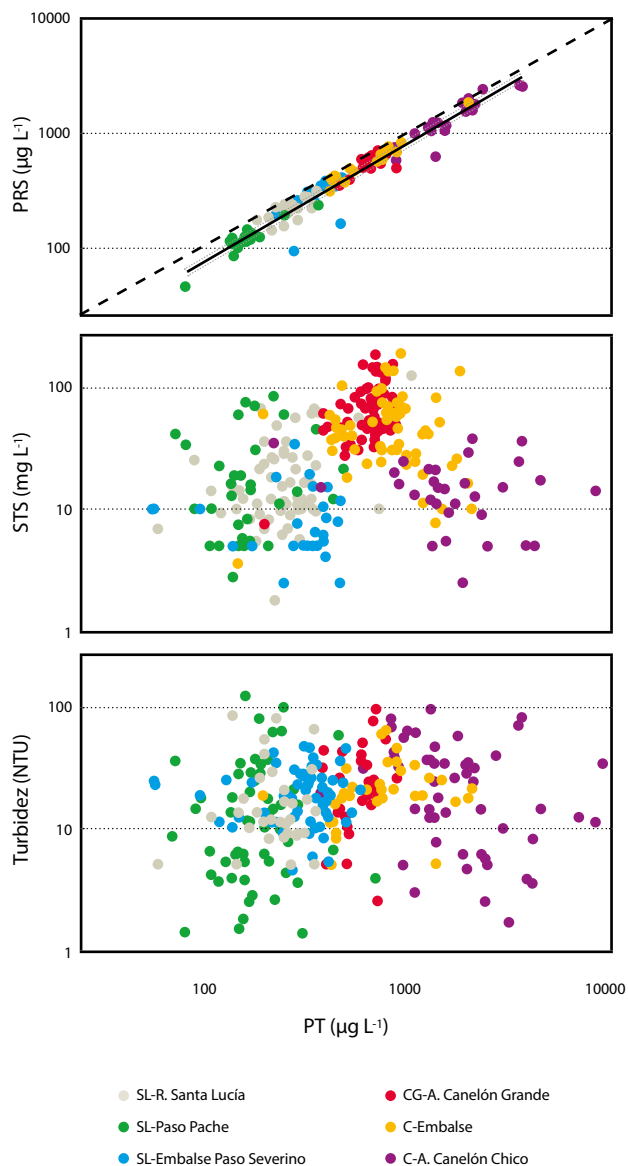


Gráfico 5. Correlaciones entre el fósforo reactivo soluble (PRS) y el fósforo total (TP) arriba, y los sólidos totales en suspensión (STS) y la turbidez (NTU) con el PT al centro y abajo, en escala logarítmica para todos los sitios de muestreo (diferenciados por colores). Modelo: $\ln(\text{PRS}) = 1,03 \times \ln(\text{PT}) + \ln(0,632)$; $r^2: 0,95$, $F = 2120,1$, $p < 0,0001$. La línea continua muestra el ajuste lineal y la línea punteada el 95 % de intervalo de confianza. La línea entrecortada muestra la relación proporcional 1:1. No se obtuvo ajuste significativo de STS y NTU con PT.

disponibles para la cuenca hasta el presente (2004 - 2016). La evolución de la eutrofización en el RSL presentó tendencias de estabilización en la eutrofia e hipereutrofia (cauce principal del RSL, y ACG – ACCH, respectivamente), tendencias ascendentes dentro de rangos de hipereutrofia (embalses) y signos de disminución (valores con tendencias descendientes en PP) para esta variable desde 2013 (según índices de Lamparelli, 2004; Cunha, et al., 2013).

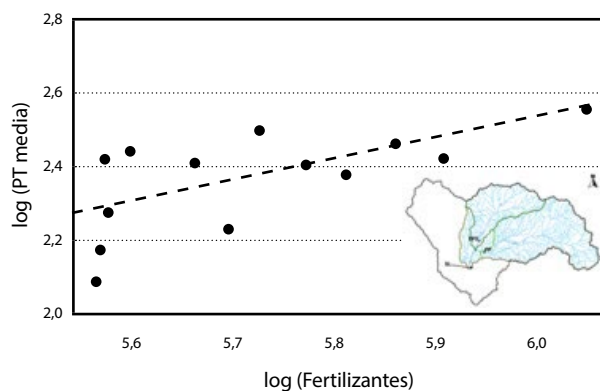


Gráfico 6. Regresión lineal significativa entre el logaritmo de PT en agua (datos anuales promediados de la subcuenca RSL, sitios SL, PP y EPS) y de las toneladas de fertilizantes importados por el país. Se detalla el modelo en el texto. En el mapa inserto se muestra la superficie de subcuenca analizada con relación al total (subcuenca con la red hidrográfica resaltada en celeste).

La presencia de altos porcentajes de PRS que componen el PT indica un aporte extremadamente alto de formas inorgánicas disueltas al agua, probablemente proveniente de la fertilización inorgánica de suelos y los efluentes de excreción animal (estiércol), y no se asoció con indicadores de erosión del suelo, como los STS y turbidez del agua (NTU). Este alto porcentaje de PRS, junto con la asociación significativa positiva encontrada entre la concentración de PT en el agua y la importación anual de fertilizantes (*proxy* de intensificación productiva), muestran el efecto de las actividades agropecuarias intensivas en la calidad de agua de la cuenca.

Causas y tendencias de la eutrofización

La eutrofización del RSL se evaluó en este estudio de forma simple, mediante la utilización de un indicador robusto con la concentración de PT (Lamparelli, 2004; Cunha, et al., 2013). La comparación de índices de estado trófico no es un objetivo de este estudio, ya que los índices son más útiles para estudios acotados en el tiempo y tienen categorías discretas con rangos amplios, por lo que el análisis de la evolución de las tendencias tiene mayor relevancia para comprender el funcionamiento del sistema. Otros índices de estado trófico, aplicados para clasificar la calidad del agua de la cuenca, se encuentran en Arocena et al. (2008), DINAMA (2015) y Quintans (2015).

El cauce principal del RSL presentó una tendencia a la estabilización del estado eutrófico a partir de 2010 (ausencia de cambios significativos), sin embargo, el valor máximo del periodo se encontró en 2013. De forma similar, aguas arriba de la desembocadura del SLCH, en PP, se determinó un punto de inflexión descendente desde el mismo año. Esta variación descendente en PP respondió a los cambios significativos producidos en la caída de importación de fertilizantes, explicado por la caída de los precios internacionales de cereales y en su producción (MGAP 2016a; FAO, 2017). Entre 2011 y 2015 se produjo el mayor cambio en el uso del

suelo en los últimos 17 años para la cuenca, particularmente con tasas máximas de incremento de áreas cultivadas y manejadas en la subcuenca de PP (Gráfico 2). Según esta tendencia, y de acuerdo a las clasificaciones de Haygarth et al. (2014), esta zona del RSL se comportaría como un sistema Tipo C, «exportador» de la carga de fósforo que recibe. Los embalses, no obstante, muestran tendencias de eutrofización ascendentes, con niveles de hipereutrofia desde 2007 (EPS) y claramente hipereutróficas en el embalse de Canelón. De acuerdo al índice para embalses subtropicales y tropicales TSI_{sr} (Cunha, et al., 2013), derivado de Lamparelli (2004), ambos embalses se encontrarían en hipereutrofia desde 2004 ($\geq 77.7 \mu\text{g PT L}^{-1}$). Un estudio reciente mostró que la cuenca del EPS presenta elevados coeficientes de exportación de nutrientes debido al alto porcentaje de superficie ocupada por cultivos, intensa producción de forraje para la producción lechera y efluentes de tambos sin tratamiento del estiércol (Chalar, et al., 2017). Ambos embalses se comportarían como sistemas del Tipo B, «acumulador» de fósforo, de acuerdo a la clasificación de Haygarth et al. (2014). Esta diferencia con el funcionamiento fluvial es típica de ecosistemas lénticos, debido a que tienen un mayor tiempo de residencia del agua y a que tienden a acumular el fósforo en el sedimento (Chalar y Clemente, 2005). Por lo tanto, los embalses son más resilientes a la mitigación de la eutrofización (Scheffer, 2007; Jarvie, et al., 2013).

La estabilización y disminución de la concentración de PT comenzó en 2010 y 2013, previo a la instrumentación del Plan de Acción (DINAMA, 2013) (URSEA, 2017), cuyos efectos positivos se podrían evidenciar en los siguientes años. Hasta el presente, ambos embalses, así como el ACG y ACCH, aún presentan tendencias ascendentes o estables en niveles hipereutróficos. Los niveles extremadamente altos de PT y estables en ACG y ACCH son característicos de la combinación del bajo caudal y aportes difusos de la agricultura intensiva y aportes puntuales significativos sin tratamiento (Withers y Jarvie, 2008). Por lo tanto, de haberse producido una disminución del aporte de nutrientes por una menor fertilización en la cuenca del CG (por ejemplo, a partir de 2013), los efectos positivos se verían solapados por los altos aportes puntuales de fósforo de otras fuentes como las industriales. Además, la alta carga interna del nutriente presente en sedimentos y napas freáticas superficiales contaminadas pueden resultar en elevados aportes de PT al agua (Sharpley, et al., 2013). A pesar de esto, los efectos del control de los grandes aportes de fuentes puntuales que se encuentran en instrumentación (medidas 1 y 2 del Plan de Acción), deberían arrojar resultados cuantificables a corto plazo. Asimismo, el control de los efluentes de los principales tambos (Chalar, et al., 2017) podría modificar las tendencias observadas en el EPS.

Los efectos positivos de la reducción del aporte difuso de fósforo por la implementación de las zonas de amortiguación (medida 8, también conocidas como zonas *buffer*) comenzarían a observarse a medida que la flora riparia se recupera. Cabe destacar que esta medida se ha aplicado en los cursos principales y los embalses, por lo tanto, la extensión de las zonas de amortiguación a los cursos de agua de menor tamaño, como pequeños arroyos y cañadas (cursos de agua de primer y segundo orden, según clasificación de Strahler), y las nacientes de las cuencas, aumentaría la eficacia del área de amortiguación. Por ejemplo, un estudio en la cuenca de la Laguna de Rocha demostró experimental-

mente la eficacia de los pastizales naturales en la retención de 40 a 50 % de los nutrientes disueltos (nitrato, amonio y fosfato) bajo condiciones de precipitación baja a intermedia (Lescano, et al., 2017). La exclusión del laboreo y del acceso del ganado a los márgenes de las cañadas y nacientes podría amplificar el efecto positivo buscado de la retención de la exportación de fósforo y nitrógeno a los cursos de agua.

La predicción de la respuesta de los ecosistemas es todavía un tema de intensa investigación científica, debido a que existen grandes incertidumbres (Jarvie, et al., 2013). Varios autores plantean que las medidas de mitigación de la eutrofización deben ser más exigentes de lo previsto, porque los tiempos de recuperación son más lentos de lo esperado por el efecto del «legado de fósforo» y «carga interna», producto de la sobrecarga del nutriente al continuo suelo-agua durante décadas (Hamilton, 2012; Jarvie, et al., 2013; Sharpley, et al., 2013; Haygarth, et al., 2014). Es esperable entonces que los resultados significativos en la calidad de agua se observen a mediano y largo plazo, por lo que es necesario continuar con los esfuerzos dirigidos a la disminución significativa del aporte de nutrientes a los ecosistemas acuáticos para alcanzar un control sostenido de la eutrofización.

Posibles orígenes de las altas concentraciones de fósforo en el agua

Las altas concentraciones de fósforo presentes en el agua del RSL y ACG no se asocian de forma significativa con la erosión de suelos, usando como indicador la concentración de partículas en suspensión y la turbidez del agua (STS y NTU), lo que indica que el ingreso de este elemento al agua tendría otro origen principal. La forma predominante en que se encuentra el fósforo en el agua no es con el material particulado sino inorgánica disuelta (83 % del total), en concordancia con estudios realizados en la misma cuenca (Barreto, et al., 2017; Chalar, et al., 2017). Esta forma del nutriente en el agua se encuentra biodisponible, por ejemplo, para el crecimiento de plantas acuáticas, microalgas y cianobacterias (Aubriot, et al., 2005; Aubriot y Bonilla, 2012). Varios estudios muestran que los suelos con agricultura intensiva, fertilización frecuente y forrajeo intenso tienen los mayores porcentajes de PRS del fósforo total (Jarvie, et al., 2010; Goyenola, et al., 2015; Barreto, et al., 2017; Chalar, et al., 2017). En general, los usos del suelo de moderada a baja intensidad agrícola muestran niveles PRS inferiores al 50 % del total (Jarvie, et al., 2010), y no se correlacionan con el PT o la fracción particulada (Goyenola, et al., 2015). Las altas concentraciones de PRS presentes en el agua encontradas en nuestro estudio son un indicador de la forma en que el nutriente llega al curso fluvial. Un estudio reciente reportó concentraciones excesivas de fósforo (Bray I) en los primeros 20 cm de los suelos de la cuenca, como consecuencia de la fertilización en combinación con la siembra directa (Barreto, et al., 2017). Por lo tanto, la alta concentración y proporción de PRS encontrada en la cuenca del RSL indica una saturación de la capacidad de los suelos de retener el nutriente. Aportes adicionales de PRS al agua se producirían por la removilización del fósforo por reciclaje de la materia orgánica (Sharpley, et al., 2013). Este alto porcentaje de fosfato disuelto en ecosistemas acuáticos es uno de los mayores riesgos ecológicos debido a su gran demanda biológica y, por lo tanto, a su capacidad de alterar la producción primaria y la biodiversidad fluvial.

Conclusiones

En este trabajo se pudieron demostrar las tendencias de eutrofización en diversos puntos de la cuenca del río Santa Lucía mediante el análisis de 12 años de datos de calidad de agua disponibles para la cuenca hasta el presente (2004 - 2016). Además, se encontró una correspondencia entre la intensificación productiva agropecuaria, utilizando la importación de fertilizantes fosfatados en el país como indicador *proxy* general, y los cambios en el uso del suelo de cada subcuenca como aproximación específica, con las tendencias de eutrofización del río Santa Lucía y sus embalses. Se encontraron tendencias de estabilización en los niveles de eutrofización del cauce principal del RSL, y descendientes a partir de 2013 en PP. Los embalses mostraron tendencias de incremento de PT en el estado hipereutrófico, propio de sistemas con alto tiempo de residencia del agua y mayor carga interna de fósforo. La cuenca del ACG presentó un estado eutrófico a hipereutrófico estable típico de sistemas con bajo caudal y altos aportes puntuales. La correlación entre la concentración de PT en la cuenca de SL con las variaciones en la importación de fertilizantes, sumado a los cambios recientes más significativos en el uso de suelo y a la alta proporción de PRS en el PT, indican un efecto directo de las actividades productivas en la eutrofización del RSL y sus afluentes. Para mejorar la eficacia en la retención de nutrientes y lograr una recuperación de la calidad de agua del RSL a largo plazo es necesario continuar con la implementación del Plan de Acción de la DINAMA, avanzar en aspectos clave como el control de la fertilización excesiva, el control de los aportes de los efluentes de tambos, evitar los cultivos en zonas inundables y, particularmente, extender las zonas de amortiguación hacia los tributarios de menor orden y las nacientes.

Reconocimientos

Este trabajo fue parcialmente financiado por ANII (proyecto FCE 6384), DINAMA y OSE. Agradecemos a Federico Quintans por la lectura crítica del manuscrito y a los técnicos del Departamento Seguimiento de Componentes del Ambiente, División Calidad Ambiental de la DINAMA, por los datos históricos proporcionados.

Referencias

- Achkar, M., Domínguez, A. y Pesce, F., 2012. *Cuenca del Río Santa Lucía - Uruguay. Aportes para la discusión ciudadana*. Montevideo: Uruguay RAdIT.
- Achkar, M., Domínguez, A. y Pesce, F., 2014. *Cuencas hidrográficas del Uruguay. Situación actual y perspectivas*. Montevideo: Redes Amigos de la Tierra.
- Arocena, R., Chalar, G., Fabián, D., de León, L., et al., 2008. *Evaluación ecológica de cursos de agua y biomonitorio* [En línea]. Montevideo: MVOTMA -DINAMA, Universidad de la República-Facultad de Ciencias. (Informe Final). [Consulta: 13 de marzo de 2017]. Disponible en: <http://limno.fcien.edu.uy/pejecutados/1-%20Convenio%20DINAMA%20Resum%20Intro%20Area%20estudio.pdf>
- Aubriot, L. y Bonilla, S., 2012. Rapid regulation of phosphate uptake in freshwater cyanobacterial blooms. En: *Aquat Microb Ecol*, 67, pp.251-263.
- Aubriot, L., Conde, D., Bonilla, S., Hein, V. y Brito, A., 2005. Vulnerabilidad de una laguna costera reserva de biósfera: indicios recientes de eutrofización. En: Vila, I. y Pizarro, J., ed. *Taller Internacional de Eutrofización y Embalses CYTED VXIIB*. Santiago de Chile: Patagonia Impresores. pp. 65-87.
- Barreto, P., Dogliotti, S. y Perdomo, C., 2017. Surface water quality of intensive farming areas within the Santa Lucia River basin of Uruguay. En: *Air, Soil and Water Research*, 10. <https://doi.org/10.1177/1178622117715446>
- Bennett, E. M., Carpenter, S. R. y Caraco, N. F., 2001. Human impact on erodable phosphorus and eutrophication: a global perspective increasing accumulation of phosphorus in soil threatens rivers, lakes, and coastal oceans with eutrophication. En: *Bioscience*, 51, pp.227-234.
- Bonilla, S., Haakonsson, S., Somma, A. y Gravier, A., et al., 2015. Cianobacterias y cianotoxinas en ecosistemas límnicos de Uruguay. En: *INNOTEC*, 10, pp.9-22.
- Brazeiro, A., ed., 2015. *Eco-regiones de Uruguay: biodiversidad, presiones y conservación*. Vol 1. Montevideo: Facultad de Ciencias.
- Burnham, K. P. y Anderson, D. R., 2002. *Model selection and multimodel inference: a practical information-theoretic approach*. New York: Springer-Verlag.
- Campra, P. y Morales, M., 2016. Trend analysis by a piecewise linear regression model applied to surface air temperatures in Southeastern Spain (1973–2014). En: *Nonlin Processes Geophys Discuss*, 2016, pp.1-25.
- Cunha, D.G.F., Calijuri, M.C. y Lamparelli, M.C., 2013. A trophic state index for tropical/subtropical reservoirs (TSI_{tr}). En: *Ecological Engineering*, 60, pp.126-134.
- Chalar, G., 2006. Dinámica de la eutrofización a diferentes escalas temporales: embalse Salto Grande (Argentina-Uruguay). En: Tundisi, J.G., Matsumura-Tundisi, T., Sidagis, C., eds., 2006. *Eutrophication in South America: causes, consequences and technologies for management and control*. San Pablo: International Institute of Ecology. pp 87-101.
- Chalar, G., Arocena, R., Pacheco, J. P. y Fabián, D., 2011. Trophic assessment of streams in Uruguay: a trophic state index for benthic invertebrates (TSI-BI). En: *Ecological Indicators*, 11, pp.362-369.
- Chalar, G. y Clemente, J., 2005. Tasa de resuspensión de fósforo y sedimentos en un cuerpo de agua muy somero (Laguna de Rocha, Uruguay). En: Vila, I. y Pizarro, J., ed. *Taller Internacional de Eutrofización y Embalses CYTED VXIIB*. Santiago de Chile: Patagonia Impresores. pp. 89-108.
- Chalar, G., Fabián, D., González-Piana, M. y Piccardo, A., 2015. *Estado y evolución de la calidad de agua de los tres embalses del Río Negro*. Montevideo: Facultad de Ciencias, UdelaR, UTE.
- Chalar, G., García-Pesenti, P., Silva-Pablo, M., Perdomo, C., Olivero, V. y Arocena, R., 2017. Weighting the impacts to stream water quality in small basins devoted to forage crops, dairy and beef cow production. En: *Limnologica - Ecology and Management of Inland Waters*, 65, pp.76-84.
- Di Gregorio, A., 2016. *Land cover classification system* [En línea]. Roma: FAO, Land and Water Development Division. [Consulta: 13 de marzo de 2017]. Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/003/x0596e/x0596e00.htm>
- DINAMA y JICA, 2011. *Proyecto sobre control de contaminación y calidad de agua en la cuenca del Río Santa Lucía. Informe final del proyecto*. Montevideo: MVOTMA.



- DINAMA, 2013. *Plan de acción para la protección del agua en la cuenca del Santa Lucía* [En línea]. Montevideo: Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente. [Consulta: 3 de agosto de 2017]. Disponible en: <http://www.mvotma.gub.uy/portal/ambiente-territorio-y-agua/gestiona/item/10006604-plan-de-accion-para-la-proteccion-del-agua-en-la-cuenca-del-santa-lucia.html>
- DINAMA, 2014. *Indicadores ambientales de Uruguay. Informe de estado del ambiente 2013*. Montevideo: MVOTMA.
- DINAMA, 2015. *Evolución de la calidad en la cuenca del Santa Lucía. 10 años de información*. Montevideo: MVOTMA.
- FAO, 2017. *Situación Alimentaria Mundial. Índice de los precios de los alimentos de la FAO* [En línea]. Roma: FAO. [Consulta: 13 de marzo de 2017]. Disponible en: <http://www.fao.org/worldfoodsituation/es/>
- Fernández, E., Aharonian, A., Aubriot, L., Santos, C., Achkar, M. y Calliari, D., 2016. *Desafíos, impactos e implicaciones de la propuesta de modificación a la Ley de Riego. Resumen mesa redonda III-JIBE Cure-Rocha 1 diciembre 2016*. Rocha: CURE-UdelaR.
- González-Piana, M., Fabián, D., Piccardo, A. y Chalar, G., 2017. Dynamics of total Microcystin LR concentration in three subtropical hydroelectric generation reservoirs in Uruguay, South America. En: *Bull. Environ. Contam. Toxicol.* doi: 10.1007/s00128-017-2158-7
- Goyenola, G., Meerhoff, M., Teixeira-de Mello, F., González-Bergonzoni, I., et al., 2015. Monitoring strategies of stream phosphorus under contrasting climate-driven flow regimes. En: *Hydrol. Earth. Syst. Sci.*, 19, pp.4099-4111.
- Hamilton, S. K., 2012. Biogeochemical time lags may delay responses of streams to ecological restoration. En: *Freshw Biol.* 57, pp.43-57.
- Haygarth, P. M., Jarvie, H. P., Powers, S. M., Sharpley, A. N., et al., 2014. Sustainable phosphorus management and the need for a long-term perspective: the legacy hypothesis. En: *Environ. Sci. Technol.*, 48, pp.8417-8419.
- IPCC, 2014. Summary for policymakers. En: Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V. y Midgley, P.M., ed. *Climate change 2013: the physical science basis contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. Cambridge: Cambridge University Press.
- Jarvie, H. P., Sharpley, A. N., Withers, P. J. A., Scott, J. T., Haggard, B. E. y Neal, C., 2013. Phosphorus mitigation to control river eutrophication: murky waters, inconvenient truths, and «postnormal» science. En: *J Environ Qual*, 42, pp.295-304.
- Jarvie, H. P., Withers, P. J. A., Bowes, M. J., Palmer-Felgate, E. J., et al., 2010. Streamwater phosphorus and nitrogen across a gradient in rural-agricultural land use intensity. En: *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 135, pp.238-252.
- Lamparelli, M. C., 2004. *Grau de trofia em corpos d'água do estado de São Paulo: avaliação dos métodos de monitoramento*. São Paulo: UdSPUDdE. (Tesis de doctorado).
- Lescano, C., Ruibal, M., Barreto, P., Piñeiro, V., Lozoya, J. P., Perdomo, C. y Rodríguez-Gallego, L., 2017. Rol de los pastizales naturales en la retención de nutrientes provenientes de la agricultura. En: *INNOTEC*, 13, pp.78-91
- Liu, R. Q., Jacobi, C., Hoffmann, P., Stober, G. y Merzlyakov, E. G., 2010. A piecewise linear model for detecting climatic trends and their structural changes with application to mesosphere/lower thermosphere winds over Collm, Germany. En: *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 115.
- MGAP, 2016a. *Anuario estadístico agropecuario 2016* [En línea]. Montevideo: Oficina de Programación y Políticas Agropecuarias. (Anuarios DIEA). [Consulta: 13 de marzo de 2017]. Disponible en: http://www.mgap.gub.uy/sites/default/files/anuario_2016.rar
- MGAP, 2016b. *Datos estadísticos de importaciones de fertilizantes* [En línea]. Montevideo: Dirección General de Servicios Agrícolas. [Consulta: 13 de marzo de 2017]. Disponible en: http://www.mgap.gub.uy/sites/default/files/principales_matrices_de_fertilizantes_importacion_2016.xlsx
- MVOTMA, 2017. *Plan Nacional de Aguas* [En línea]. Montevideo: Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente. [Consulta: 13 de marzo de 2017]. Disponible en: <http://www.mvotma.gub.uy/images/slides/PNA%202017%20propuesta%20PE.pdf>
- OPP, 2015. *Reporte Uruguay 2015*. Montevideo: OPP.
- Paerl, H. W., 2017. Controlling harmful cyanobacterial blooms in a climatically more extreme world: management options and research needs. En: *J Plankton Res*, pp.1-9. DOI:10.1093/plankt/fbx1042.
- Quintans, F., 2015. *Propuesta de aplicación de índices de calidad de agua para la Cuenca del Santa Lucía*. Montevideo. DINAMA-DCA.
- Scheffer, M., 2007. Shallow lakes theory revisited: various alternative regimes driven by climate, nutrients, depth and lake size. En: *Hydrobiologia*, 584, pp.455-466.
- Scheffer, M., Carpenter, S., Foley, J., Folke, C. y Walker, B., 2001. Catastrophic shifts in ecosystems. En: *Nature*, 413, pp.591-596.
- Schindler, D., 1977. Evolution of phosphorus limitation in lakes. En: *Science*, 195, pp.260-262.
- Sharpley, A., Jarvie, H. P., Buda, A., May, L., Spears, B., y Kleinman, P., 2013. Phosphorus legacy: overcoming the effects of past management practices to mitigate future water quality impairment. En: *J Environ Qual*, 42, pp.1308-1326.
- Singh, D., Glupta, R. D. y Jain, S. K., 2015. Statistical analysis of long term spatial and temporal trends of temperature parameters over Sutlej river basin, India. En: *Journal of Earth System Science*, 124, pp.17-35.
- Sinha, E., Michalak, A. M. y Balaji, V., 2017. Eutrophication will increase during the 21st century as a result of precipitation changes. En: *Science*, 357, pp.405-408.
- Smith, V. H. y Schindler, D. W., 2009. Eutrophication science: where do we go from here? En: *Trends. Ecol. Evol.*, 24, pp.201-207.
- URSEA, 2017. *Informe de situación de las medidas que se están implementado para el aseguramiento de la potabilización del agua del sistema de abastecimiento de Montevideo y Laguna del Sauce*. Montevideo: URSEA.
- Uruguay. Decreto 253/979, de 09 de mayo de 1979. *Diario Oficial*, 31 de mayo de 1979, No. 20.504, p. 1473.
- Uruguay. Ley 16.858, de 03 de setiembre de 1997. *Diario Oficial*, 11 de setiembre de 1997, No. 24.865, p. 944A.
- Withers, P. J. A. y Jarvie, H. P., 2008. Delivery and cycling of phosphorus in rivers: A review. En: *Sci Total Environ*, 400, pp.379-395.

Comunidades de macroalgas en puntas rocosas de la costa de Rocha, Uruguay

Macroalgae communities in rocky outcrops in Rocha, Uruguay

González-Etchebehere, Lucila (1, 3); Kruk, Carla (2, 4); Scarabino, Fabrizio (3); Laporta, Martín (6); Zabaleta, María (5); González, Leticia (3); Vélez-Rubio, Gabriela (3)

(1) Facultad de Ciencias, UdelaR, Montevideo, Uruguay.

(2) Limnología, IECA, Facultad de Ciencias, UdelaR, Uruguay.

(3) Centro Universitario Regional Este (CURE), UdelaR, Rocha, Uruguay.

(4) Ecología Funcional de Sistemas Acuáticos (EFSA), Centro Universitario Regional Este (CURE), UdelaR, Rocha, Uruguay.

(5) Centro Universitario Regional Este (CURE), UdelaR, Maldonado, Uruguay.

(6) Dirección Nacional de Recursos Acuáticos (DINARA), MGAP, Base La Paloma, Rocha, Uruguay.

Contacto: lulige.bio@gmail.com

RECIBIDO: 27/10/2017 APROBADO: 5/12/2017

Resumen

Las macroalgas son fundamentales para los ecosistemas marinos y son muy sensibles a los cambios ambientales (por ejemplo, temperatura, salinidad). La costa atlántica uruguaya es clave para la biogeografía regional de macroalgas, transición entre la ficoflora subtropical y subantártica. El objetivo de este trabajo fue evaluar la riqueza de especies y biomasa de macroalgas, su distribución espacial y relación con variables ambientales en puntas rocosas de la costa de Rocha (33°S; 54°O), Uruguay. Se realizaron dos muestreos (verano e invierno) en puntas rocosas de Cerro Verde (La Coronilla), Cerro Rivero (Punta del Diablo) y El Cabito (La Paloma). Mediante transectas se cubrieron distintas profundidades, midieron variables ambientales y colectaron muestras. Se identificaron en total 36 taxa (21 rodofitas, 11 clorofitas y 4 ocrofitas). La riqueza de especies y biomasa fue mayor en verano para todos los sitios con especies principalmente subtropicales, y la temperatura fue un factor clave. Las ocrofitas ocurrieron en menor frecuencia, asociadas a aguas frías y claras. Se alcanzó el 50 % del total de especies registradas para Uruguay; el complejo *Ulva* spp. (clorofita) fue el más frecuente. El conocimiento generado aportará al manejo de las macroalgas uruguayas retomando la línea de investigación y favoreciendo el desarrollo de trabajos futuros en el tema.

Palabras clave: Riqueza de especies, macrofitas, variabilidad espacio-temporal, intermareal rocoso.

Abstract

Macroalgal communities are fundamental for marine ecosystems and very sensitive to environmental changes (e.g. temperature, salinity). The Uruguayan Atlantic coast represents a transition between subtropical and subantarctic phycoflora and therefore has a key role to the regional biogeography of macroalgae. The objective of this study was to analyze the macroalgal community richness and biomass, its spatial distribution and its changes along diverse environmental gradients in rocky outcrops of Rocha coast (33°S; 54°W), Uruguay. Two samplings were carried out (summer and winter) in rocky shores of Cerro Verde (La Coronilla), Cerro Rivero (Punta del Diablo) and El Cabito (La Paloma). Transects were used to cover different microhabitats and depths, environmental variables were measured and samples collected. A total of 36 taxa were identified (21 Rhodophyta, 11 Chlorophyta and 4 Ochrophyta). The species richness and biomass were higher in summer for every site, with communities dominated by subtropical species. Temperature was a key modulating factor. For all the species, 50 % were previously registered in previous literature for Uruguay and *Ulva* spp. complex (Chlorophyta) was the most frequent. Ochrophyta were less frequent being associated with cold and clear waters. Present results provide a basis for the macroalgae management of the Uruguayan coast, reopening a line for future research in the subject.

Keywords: Species richness, macrophytes, spatio-temporal variability, intertidal rocky shore.

Introducción

Las macroalgas constituyen uno de los grupos más variados de organismos fotosintéticos. Abarcan principalmente las divisiones clorofita (algas verdes), rodofita (algas rojas) y ocrofita (algas pardas). Dentro de las algas existe una gran

diversidad de especies (aproximadamente 10.000 especies de algas verdes, por ejemplo), con características fisiológicas (por ejemplo pigmentos), ciclos de vida y respuestas a los cambios ambientales muy variadas (Hurd, et al., 2014). Las macroalgas marinas se encuentran fijas a diversos sustratos por distintas estructuras de adhesión, confinadas principalmente al

sustrato consolidado rocoso o firme para soportar la acción mecánica de las olas (Oliveira, et al., 2001; Harley, et al., 2012).

Estos organismos son fundamentales para el funcionamiento de los sistemas costeros; modulan los ciclos de nutrientes y aportan materia orgánica a través de su producción primaria (Santelices, et al., 2009; Hurd, et al., 2014). Su rol es clave, además, en cuanto a que proporcionan alimento y refugio a diversos animales (Santelices, et al., 2009; Wahl, 2009). Las macroalgas marinas son muy sensibles a los cambios ambientales (por ejemplo, nivel del mar o salinidad) y modificaciones menores en el ambiente pueden generar cambios importantes en su composición y distribución (Harley, et al., 2012). Algunas especies de macroalgas son invasoras y afectan negativamente la comunidad residente y el ecosistema en general (Williams y Smith, 2007). Muchas especies son utilizadas con fines productivos como el consumo humano, la producción de materias primas y como insumos para productos farmacéuticos y biotecnológicos (Pellizzari y Reis, 2011).

Factores condicionantes de la comunidad de macroalgas

La distribución, abundancia y composición de las macroalgas están determinadas por factores físicos (como nivel del mar, salinidad, temperatura u oleaje) y biológicos (como herbivoría o competencia) que ocurren a diversas escalas espaciales y temporales (Kerswell, 2006; Smale, et al., 2010). La conjunción de factores latitudinales y locales afecta también la estructura de esta comunidad (Harley, et al., 2012; Sanches, et al., 2016).

Los gradientes latitudinales modifican las características de las masas de agua (salinidad y temperatura, por ejemplo) y las corrientes, lo que resulta en una distinta distribución de las macroalgas debido a diferencias en su capacidad de dispersión y preferencias ambientales (Kerswell, 2006; Harley, et al., 2012; Sanches, et al., 2016). La riqueza total de especies de macroalgas se incrementa hacia mayores latitudes, observándose diferencias para los distintos grupos (Kerswell, 2006). Las ocofitas aumentan su diversidad hacia regiones frías, los patrones de diversidad de las rodofitas varían entre hemisferios, aumentando de los polos a los trópicos en el hemisferio norte y disminuyendo de los polos a los trópicos en el hemisferio sur; mientras que las clorofitas tienen un patrón menos asociado a la latitud con un leve aumento hacia zonas tropicales (Santelices, et al., 2009; Liuzzi, et al., 2011; Keith, et al., 2014).

La zona intermareal o mesolitoral rocosa se caracteriza por una abundante presencia de macroalgas. En esta zona el estrés ambiental (deseccación, variaciones del nivel del mar, oleaje), la estructura espacial y características del sustrato (tipo, orientación y rugosidad superficial) afectan fuertemente la abundancia y diversidad de macroalgas (Liuzzi, et al., 2011; Harley, et al., 2012; Holloway-Adkins, et al., 2015). Sustratos con mayor rugosidad retienen más humedad, favoreciendo la sobrevivencia de más especies de macroalgas, mientras que sedimentos de grano fino (arena, limo-arcilla) asociados o próximos a las rocas pueden quedar en suspensión limitando el desarrollo de las macroalgas y disminuyendo su capacidad fotosintética (Schiel, et al., 2006). Como resultado de los factores bióticos y abióticos se observa un patrón de bandas longitudinales (zonación) en la estructura de la comunidad de macroalgas. En zonas más expuestas del intermareal dominan las algas verdes, las algas rojas en zonas más protegidas

y parcialmente cubiertas por agua, mientras que en la zona submareal de mayor profundidad dominan las algas pardas (Holloway-Adkins, et al., 2015; Pellizzari, et al., 2016a).

El desarrollo de actividades antrópicas, como el turismo y la urbanización, en los ambientes costeros generalmente degrada el hábitat de las macroalgas, modificando la dinámica dunar, la disponibilidad de sustrato y generando contaminación, ocasionando así la disminución de su riqueza y abundancia (Portugal, et al., 2016). Las especies exóticas, cuya introducción generalmente se asocia a actividades antrópicas, como el agua de lastre de los barcos o la acuicultura (Carlton, 1993), compiten por el espacio y sustrato disponible con las macroalgas nativas generando también una disminución en su biodiversidad y la de organismos asociados (Schaffelke y Hewitt, 2007).

Macroalgas en Uruguay

El conocimiento de las macroalgas en Uruguay es limitado. Según la literatura existente, la costa atlántica de Uruguay es una zona de escasa diversidad de macroalgas y exhibe la riqueza específica más baja en el Atlántico sudoccidental (Coll y Oliveira, 1999; Liuzzi, et al., 2011; Steigleder, 2015). Sin embargo, estas observaciones se basan en estudios muy aislados, discontinuados y usualmente con escasa conexión entre sí, en los que se estudiaron distintos puntos de la costa de Montevideo, Maldonado y Rocha (Howe, 1931; Taylor, 1960; Coll, 1976, 1979; Scarabino, et al., 1975; Maytía y Scarabino, 1979; Méndez, 1983; Hareau y Silva 1984a, 1984b; Coll y Oliveira, 1999). Maytía y Scarabino (1979) realizaron una caracterización cualitativa y sin considerar variaciones estacionales de la zonación del macrobentos de las puntas rocosas de la costa uruguaya. Estos autores reportaron especies de macroalgas características de cada nivel en donde la zona mesolitoral se encontró principalmente habitada por las especies *Pterocladia capillacea*, *Hypnea musciformis*, *Polysiphonia tepida*, *Gelidium cardinale*, *Porphyra* sp., *Enteromorpha* sp., *Hildenbrandia* sp. y *Ulva lactuca*. Posteriormente, Coll y Oliveira (1999) relevaron para toda la costa de Uruguay un total de 72 taxa de macroalgas (41 especies de rodofitas, 24 especies de clorofitas y 7 especies de ocofitas). Entre estas se incluyen varias especies cosmopolitas de los tres principales clados, pertenecientes, por ejemplo, a los géneros *Cladophora*, *Ulva* (clorofita), *Chondracanthus*, *Grateloupia* y *Polysiphonia* (rodofita).

Keith et al. (2014) proponen que la biodiversidad en las regiones templadas y polares está controlada principalmente por las variaciones ambientales, mientras que en las zonas tropicales los factores bióticos serían más importantes (Wiens y Donoghue, 2004). En este marco, la costa uruguaya es una región clave para estudiar los procesos subyacentes a los patrones de biodiversidad y la biogeografía regional (Scarabino, et al., 2016) ya que es una zona de transición entre la ficoflora subtropical y subantártica (Coll y Oliveira, 1999). Por otro lado, la costa atlántica de Uruguay se encuentra fuertemente influenciada por los aportes de agua dulce rica en nutrientes del Río de la Plata (35°S) (Campos, et al., 2008; Pivel, 2009; Kruk, et al., 2015). De esta forma, el estudio de la ficoflora de esta región puede además contribuir a comprender el efecto de las actividades antropogénicas, incluyendo la eutrofización, las modificaciones físicas y el cambio climático en las comunidades de macroalgas a escala regional.

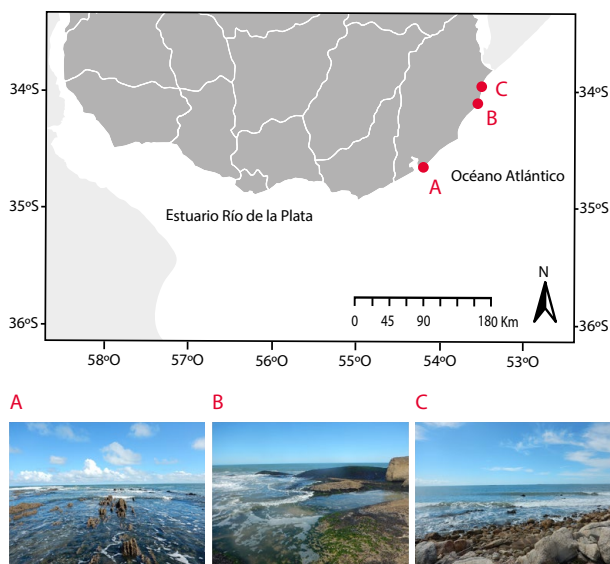


Figura 1. Mapa de la costa de Uruguay dividida en la zona estuarina (Estuario Río de la Plata) y la zona oceánica (Océano Atlántico). Las imágenes muestran las localidades de muestreo: **A:** El Cabito (La Paloma); **B:** Cerro Rivero (Punta del Diablo) y **C:** Cerro Verde (La Coronilla).

En Uruguay las macroalgas constituyen una importante fuente de alimentación para los juveniles de la tortuga verde (*Chelonia mydas*) (López-Mendilaharsu, et al., 2006, Vélez-Rubio, et al., 2013, Vélez-Rubio, et al., 2016). Por otra parte, numerosas especies de invertebrados obtienen refugio entre las distintas especies de macroalgas, especialmente aquellas que forman matas densas que retienen sedimentos. Se destacan por su abundancia los crustáceos (anfípodos, isópodos y decápodos), poliquetos, nemertinos, bivalvos y gasterópodos (Brazeiro, et al., 2006, Scarabino, obs. pers.). En este sentido, los estudios de la comunidad de macroalgas aportan también al análisis de las relaciones tróficas de las especies y sus posibles efectos dentro de los ecosistemas.

El objetivo de este trabajo fue realizar un relevamiento de la riqueza de especies y biomasa total de macroalgas en puntas rocosas del Este de la costa atlántica de Uruguay. Para ello, se seleccionaron diferentes zonas representativas de distintas condiciones ambientales y presión antropogénica. Éstas incluyeron puntas rocosas: Cabo de Santa María (Balneario La Paloma), Cerro Rivero (Balneario Punta del Diablo) y Cerro Verde (Balneario La Coronilla). En ellas se evaluó la distribución de macroalgas a lo largo de la zona litoral en verano e invierno, se analizaron las condiciones ambientales (temperatura, salinidad) y sustrato (composición, pendiente) y cómo estas afectaron a las macroalgas.

Materiales y Métodos

Área de estudio

El estudio se llevó a cabo en tres zonas rocosas de la costa de Rocha (Este de la costa atlántica uruguaya): El Cabito (La Paloma), Cerro Rivero (Punta del Diablo) y Cerro Verde (Área Protegida Costero Marina de Cerro Verde e Islas de

La Coronilla, La Coronilla) (Figura 1, Tabla 1). El Cabito es una zona costera con importantes infraestructuras y gran afluencia turística. Cerro Rivero presenta un desarrollo costero en pleno crecimiento con una gran influencia turística. Cerro Verde tiene baja afluencia de visitantes y no presenta infraestructuras costeras. Esta última zona ingresó al Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SNAP) en el 2011 (Uruguay, 2011) bajo el dominio de «Área de manejo de hábitats y/o especies». En los tres casos el número de visitantes aumenta notoriamente durante la temporada estival.

Cerro Rivero y Cerro Verde comparten la misma unidad geológica, denominada Complejo Granítico Santa Teresa (edad 543 ± 7 millones de años), que integra el Ciclo Brasileño que continúa hacia Santa Catarina, Brasil. El Cabito corresponde a metasedimentos de fondo marino de la Formación Rocha, secuencia turbidítica integrada por areniscas, vaques y pelitas de bajo grado de metamorfismo y al menos tres fases de deformación, su sedimentación corresponde a flujos gravitacionales submarinos en un arco continental activo (edad 610 y 550 millones de años) (Basei, et al., 2013; Blanco, et al., 2014).

Las mareas de tipo astronómico tienen escasa amplitud (ca. 40 cm) en la costa atlántica uruguaya y han sido escasamente caracterizadas. Determinan un intermareal relativamente estrecho, donde a su vez se puede definir una zona alta dominada por el cirripedio *Chthamalus bisinuatus* y una zona baja dominada por el bivalvo *Brachidontes rodriguezii* (Maytía y Scarabino, 1979; Scarabino, obs. pers.). En el área de estudio el principal condicionante del nivel del mar es el viento; vientos fuertes del sector norte generalmente determinan bajantes excepcionales, principalmente en verano, alcanzando el submareal somero en el concepto aquí utilizado (por ejemplo, -1 metro o más). En forma contraria, vientos fuertes del sector S determinan, principalmente en invierno, subidas excepcionales que alcanzan el supralitoral, renovando el agua de las pozas supralitorales (MTO, et al., 1980; Ortega en Demicheli y Scarabino, 2006; Scarabino, obs. pers.).

Muestreo

Se realizaron dos muestreos en cada sitio, uno en verano (marzo) y otro en invierno (setiembre), durante el año 2016. Para Cerro Verde solo fue posible muestrear en verano. En cada sitio se registraron las características geológicas de cada área, identificando el tipo de roca, características mineralógicas y estructurales en base a información bibliográfica existente para cada sitio (Basei, et al., 2013; Blanco, et al., 2014).

En cada sitio se realizaron tres transectas perpendiculares a la línea de la costa separadas a una distancia de 50 a 100 m entre sí, abarcando distintas profundidades e incluyendo la zona supralitoral, intermareal y submareal somero (aproximadamente un metro de profundidad máxima). Para cada sitio se seleccionó una transecta y se estimó la pendiente realizando un perfil con una regla graduada (Leyca CLR 102), desde el mayor nivel de la pleamar hasta la zona de mayor profundidad muestreada, midiendo la pendiente cada 3 m. A partir de esos datos se calculó un indicador de la variabilidad de las alturas: cociente entre el desvío estándar de la altura y el largo de la transecta. Para estimar la riqueza de especies y abundancia de macroalgas en cada sitio y estación del año, se realizaron colectas de macroalgas a lo largo de tres transectas, separadas 100 m entre sí, que abarcaron la zona desde el último nivel alcanzado por la pleamar hasta 1 m de profundidad en el

submareal. Para cada transecta, se utilizó como superficie de muestreo un cuadrante de 35x35 cm. Estos fueron ubicados cada 5 m de distancia entre sí a lo largo de todas las transectas y alcanzando hasta un total de 38 cuadrantes para todo el estudio. En cada uno se removieron los organismos con talos mayores a 0,5 cm de largo. Además se tomaron muestras de macroalgas en un área definida de 2 m de radio alrededor de cada cuadrante, considerando distintos microhábitats y profundidades y detectando así el mayor número de especies posibles. Las muestras fueron guardadas en bolsas de plástico con agua de mar y se mantuvieron congeladas para su posterior análisis en laboratorio.

En los mismos sitios donde se ubicaron los cuadrantes se midieron variables abióticas del agua y se caracterizó el tipo de sustrato y micro-hábitat (pozas, tipo de roca, arena). Se registraron otras características categóricas como distancia al mar, profundidad y zonificación (supralitoral, intermareal, o submareal). Las variables ambientales del agua se midieron con un multiparámetro (Horiba U-50) e incluyeron temperatura (Tagua, °C), salinidad (S, ppt), pH, turbidez (NTU) y oxígeno disuelto (OD, mg/l).

Análisis de laboratorio

En el laboratorio se identificaron los organismos al nivel taxonómico más detallado posible y se estimó la biomasa (kg/m²) de macroalgas para cada sitio y estación. Se midió el peso húmedo PH (g) y luego del secado de las muestras en estufa durante tres días a 60 °C se midió el peso seco PS (g) por cuadrante. Los taxa fueron identificados por métodos convencionales, considerando morfología, niveles de organización, pigmentación, tipo de ramificación, entre otros. Cuando fue necesario se realizaron cortes histológicos para observación en el microscopio para evaluar estructura y distribución celular, y otros elementos clave para la identificación como estructuras reproductivas. Se utilizaron claves de identificación taxonómica de la región (Taylor, 1960; Coll, 1976; Wynne, 2011) y recursos de la web AlgaeBase (Guiry y Guiry, 2017). Para los organismos registrados e identificados a nivel de género pero que no fue posible diferenciar especie se desarrollaron tres estrategias: [1] si pertenecían a uno o más de un género dentro del cual se esperaba encontrar una o más especies, pero no fue clara la separación entre morfotipos, se consideró el nombre genérico (por ejemplo, *Porphyra/Pyropia* spp.); [2] especies que pertenecían a un mismo género con diferencias morfológicas relevantes pero que no fue posible su identificación se denominaron con un número (por ejemplo, *Polysiphonia* sp.1); [3] si pertenecían a uno o más géneros sin clara identificación taxonómica, se las consideró como integrantes de un complejo (por ejemplo, *Ulva* spp.). El complejo *Ulva* spp. se clasificó en dos morfotipos distintos (morfotipo tubular y morfotipo laminar). Se conservaron muestras de referencia en el Centro Universitario Regional del Este (CURE, Sede Rocha, Uruguay) y en la Dirección Nacional de Recursos Acuáticos (DINARA, Base La Paloma, Rocha, Uruguay), para lo cual algunos ejemplares fueron fijados en húmedo con formol al 4 % y otros en seco en formato de herbario y con silicagel.

Análisis de datos

La biomasa total húmeda y seca (kg/m²) se calculó sumando el PH y PS de todos los cuadrantes y dividiendo sobre la superficie total de los cuadrantes por sitio en cada fecha. La riqueza de especies (S) se estimó como el número de taxa presente en

la muestra para cada sitio y estación del año, organizando la información también por grupo filogenético S clorofitas, S rodofitas y S ocrofitas. Se identificaron las especies dominantes como aquellas que se encontraron con mayor frecuencia (mayor al 70 % del total de cuadrantes de cada transecta). Se analizaron las relaciones entre variables biológicas (PS, PH, S, S clorofitas, S rodofitas y S ocrofitas y biomasa seca) utilizando correlaciones no paramétricas de Spearman. En los casos en los que se observaron relaciones significativas se ajustaron modelos lineales ($y = ax + b$) y se estimó el R². Para analizar la relación entre el PS y PH las variables fueron estandarizadas y transformadas con $\log_{10}(x+1)$, luego se ajustaron modelos lineales y se estimó el R². Se analizaron los cambios en las variables biológicas y ambientales entre estaciones del año, sitios y zonas dentro de cada sitio (supra, inter y submareal). Se utilizó la prueba de log-likelihood ratio (LRT) para poner a prueba las diferencias en las medias y varianzas de las variables ambientales entre estaciones del año y zonas en el litoral (supralitoral, intermareal y submareal) usando el paquete de R nlme (Pinheiro, et al., 2016). Se utilizaron análisis de componentes principales (ACP) para describir grupos de casos y su organización en gradientes ambientales incluyendo las variables temperatura del agua, pH, salinidad, oxígeno disuelto, turbidez, TDS, temperatura del aire e intensidad del viento, previamente estandarizadas.

Resultados

Geomorfología de los sitios

Los sitios se diferenciaron en tipo de sustrato y estructura (Tabla 1). En relación al perfil, el Cabito se caracterizó por presentar una zona intermareal más larga (120 m), con menor pendiente y más homogénea, así como rocas en disposición perpendicular a la costa con numerosas canaletas. Se destacan también los alvéolos que generan micro-oquedades. Cerro Verde y Cerro Rivero tuvieron una zona intermareal más corta (ca. 45 m), con mayor pendiente y heterogeneidad espacial asociada a un mayor número y diversidad de pozas (Gráfico 1 y Tabla 1).

Riqueza y composición de especies

Se identificaron un total de 36 taxones que incluyeron un total de 27 géneros (Tabla 2). Para algunos géneros no fue posible separar ni identificar las especies mediante su morfología (*Bryopsis* spp., *Ceramium* spp., *Porphyra/Pyropia* spp., *Rhodomyenia* spp.); si bien es tática la existencia de al menos dos especies, se cuantificó como un taxón. Para el complejo *Ulva* spp. se identificaron dos morfotipos distintos (morfotipo tubular y morfotipo laminar).

Se observó una mayor riqueza de especies de rodofitas, seguida por clorofitas y un escaso número de ocrofitas para todos los sitios y estaciones del año (Tabla 2 y Gráfico 2). Dentro de las rodofitas (22 especies, 16 géneros), las especies más frecuentes fueron *Jania rubens*, *Cryptopleura ramosa* y *Polysiphonia* sp. 1, halladas en su mayoría en el verano. Para las clorofitas (11 especies, seis géneros) el complejo *Ulva* spp. morfotipo laminar y *Cladophora* sp. 1 fueron las dominantes. Las ocrofitas fueron el grupo con menor riqueza (cuatro especies); la más frecuente fue *Myriogloea major*.

Localidad	La Paloma	Punta del Diablo	La Coronilla
Sitio	El Cabito	Cerro Rivero	Cerro Verde
Coordenadas	34° 39' 52,5" S 54° 10' 23,9" 0	34° 0' 54,5" S 53° 32' 9,0" 0	33° 56' 35" S 53° 30' 35" 0
Tipo de sustrato	metasedimentos, arena	granitos, arena	granitos, arena
Microhábitats presentes	roca irregular con numerosas canaletas y pozas intermareales	roca descubierta y pozas intermareales y supralitorales	roca descubierta y pozas intermareales
Pendiente (media y rango en cm)	8,38 (-68 a 38)	21,4 (-53,5 a 90)	20,5 (-72 a 130)
DS altura (cm) por m ²	0,88	2,16	2,52

Tabla 1. Descripción de los sitios de muestreo en cada localidad, incluyendo la descripción del tipo de sustrato y la estimación de pendientes. DS: desvío estándar.

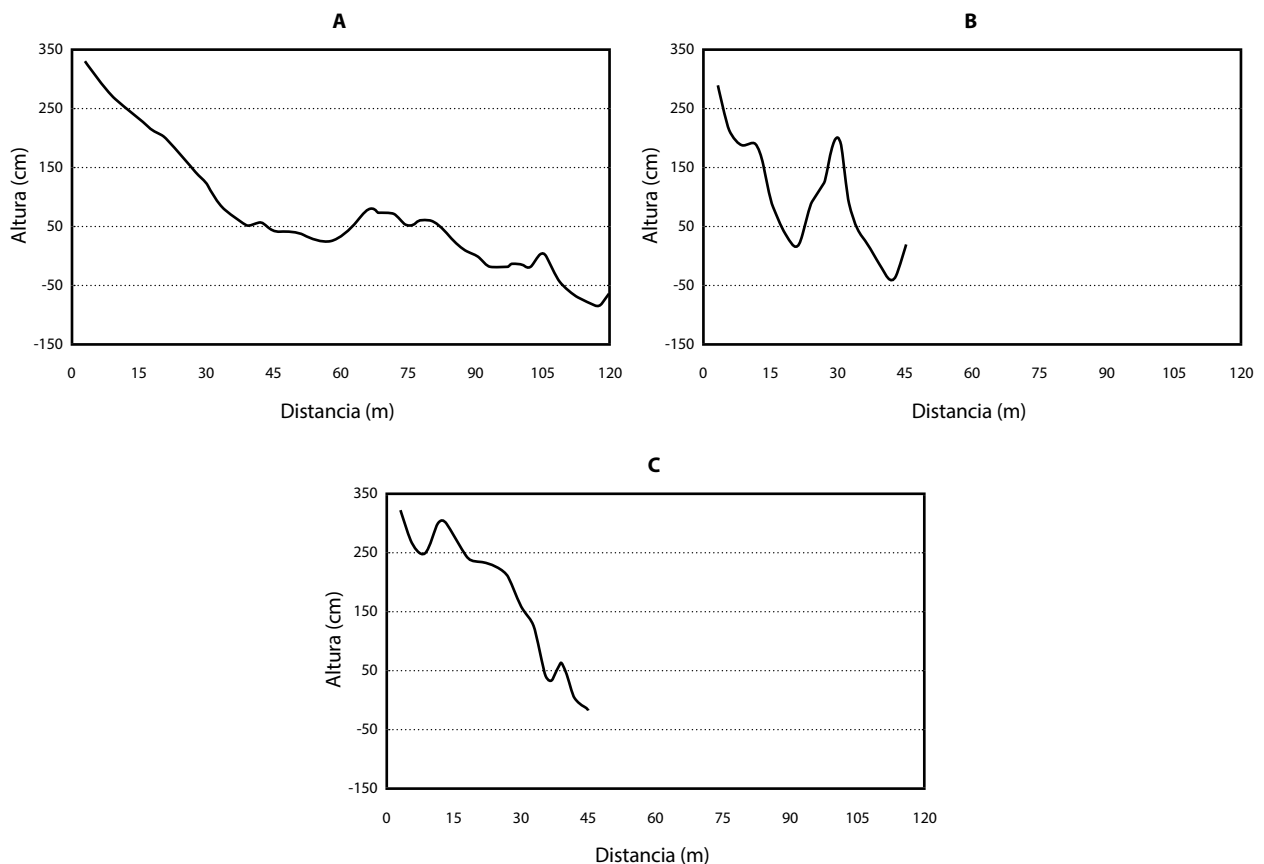


Gráfico 1. Perfil topográfico de cada sitio: **A:** El Cabito (La Paloma); **B:** Cerro Rivero (Punta del Diablo), y **C:** Cerro Verde (La Coronilla).

De todos los taxones identificados se encontraron dos nuevos registros para Uruguay, los cuales corresponden a las especies *Dasya* sp. 1 y *Grateloupia turuturu* (exótica). Para los sitios El Cabito y Cerro Rivero, donde se realizaron muestreos en verano e invierno, se encontró una mayor riqueza de especies en verano con respecto al invierno (Tabla 2 y Gráfico 2). La relación entre la riqueza total de especies (S) y de los distin-

tos grupos filogenéticos (S clorofitas, S rodofitas y S ocrofitas) mostró que, en general, las riquezas estuvieron positivamente relacionadas entre sí, excepto ocrofitas con rodofitas y clorofitas (Tabla 3). En particular, se ajustaron modelos para la relación entre riqueza total y la riqueza de especies de rodofitas y especies de clorofitas y se halló que las primeras eran muy buenas indicadoras de la riqueza total ($R^2=0,96$) (Gráfico 3, Tabla 3).

Gfilo	Especie	Referencias*	EC		CR		CV
			V	I	V	I	V
Clorofitas	<i>Bryopsis pennata</i> J.V. Lamouroux	15		X			X
	<i>Bryopsis</i> spp.		X		X		
	<i>Chaetomorpha antenina</i> (Bory de Saint-Vicent) Kützing	15			X	X	X
	<i>Chaetomorpha aerea</i> (Dilwyn) Kützing	15		X			
	<i>Cladophora albida</i> (Nees) Kützing	15; 16			X		X
	<i>Cladophora vagabunda</i> (Linnaeus) Hoek	8; 10; 15; 16				X	
	<i>Cladophora</i> sp. 1		X	X	X	X	X
	<i>Codium decortcatum</i> (Woodward) M. Howe	1; 2; 4	X		X		X
	<i>Rhizoclonium riparium</i> (Roth) Harvey	15		X			X
	<i>Ulva</i> spp. morfo tubular		X		X	X	X
<i>Ulva</i> spp. morfo laminar		X	X	X	X	X	
Rodofitas	<i>Ahmfeltia plicata</i> (Hudson) Fries	2; 3; 15	X		X		
	<i>Amphiroa beauvoisii</i> J.V. Lamouroux	2; 3; 6; 7; 8; 14; 15	X	X	X		X
	<i>Ceramium</i> spp.		X	X	X	X	X
	<i>Chondracanthus acicularis</i> (Roth) Fredericq	15	X		X	X	X
	<i>Chondracanthus teedei</i> (Mertens ex Roth) Kützing	15	X	X	X	X	X
	<i>Corallina officinalis</i> Linnaeus	2; 3; 6; 7; 8; 10; 15	X	X	X	X	X
	<i>Cryptopleura ramosa</i> (Hudson) L. Newton	15	X	X	X		X
	** <i>Dasya</i> sp. 1			X		X	
	<i>Grateloupia cuneifolia</i> J. Agardh Kützing	2; 3; 6; 7; 14	X	X	X	X	
	<i>Grateloupia filicina</i> (J.V. Lamouroux) C. Agardh	2; 3; 4; 6; 7; 15	X		X		X
	** <i>Grateloupia turuturu</i> Yamada				X		
	<i>Gymnogongrus griffithsiae</i> (Turner) C. Martius	2; 3; 8; 10; 13; 14; 15; 16	X	X	X	X	X
	<i>Hypnea musciformis</i> (Wulfen) J.V. Lamouroux	2; 3; 8; 10; 14; 15	X		X		X
	<i>Janiarubens</i> (Linnaeus) J.V. Lamouroux		X		X		X
	<i>Nemalion helminthoides</i> (Vellay) Batters	10; 15				X	
	<i>Polysiphonia</i> sp. 1		X	X	X	X	X
	<i>Polysiphonia</i> sp. 2		X	X	X	X	X
	<i>Polysiphonia</i> sp. 3		X	X	X		
	<i>Porphyra/Pyropia</i> spp.			X		X	X
	<i>Pterocladia capillacea</i> (S.G. Gmelin) Santelices & Hommersand	14; 15	X	X	X	X	X
<i>Rhodomenia</i> spp.	15			X		X	
Ocrofitas	<i>Colpomenia sinuosa</i> (Mertens ex Roth) Derbès & Solier	15			X		
	<i>Myriogloea major</i> Asensi	17			X		X
	<i>Petalonia fascia</i> (O.F. Müller) Kuntze	15					X
	<i>Scytosiphon lomentaria</i> (Lyngbye) Link	15; 16				X	

*Referencias de registros para Uruguay: 1. Arechavaleta 1884; 2. Howe 1931; 3. Herter 1933a; 4. Herter 1933b; 5. Herter 1939a; 6. Herter 1939b; 7. Herter 1939c; 8. Taylor 1939; 9. Silva 1960; 10. Taylor 1960; 11. Méndez 1983; 12. Hareau y Osorio 1983; 13. Hareau 1984; 14. Hareau y Silva 1984; 15. Coll y Oliveira 1999; 16. Steigleder 2015; 17. Pellizzari et al. 2016a.

**Primer registro: *Dasya* sp. 1 y *Grateloupia turuturu* (especie exótica).

Tabla 2. Lista de las macroalgas colectadas e identificadas al nivel taxonómico más detallado posible y grupo filogenético (Gfilo: clorofita, rodofita y ocrofita) en los diferentes sitios (EC: El Cabito; CR: Cerro Rivero y CV: Cerro Verde) y estaciones del año (V: verano; I: invierno). Se incluyen referencias bibliográficas previas para Uruguay.

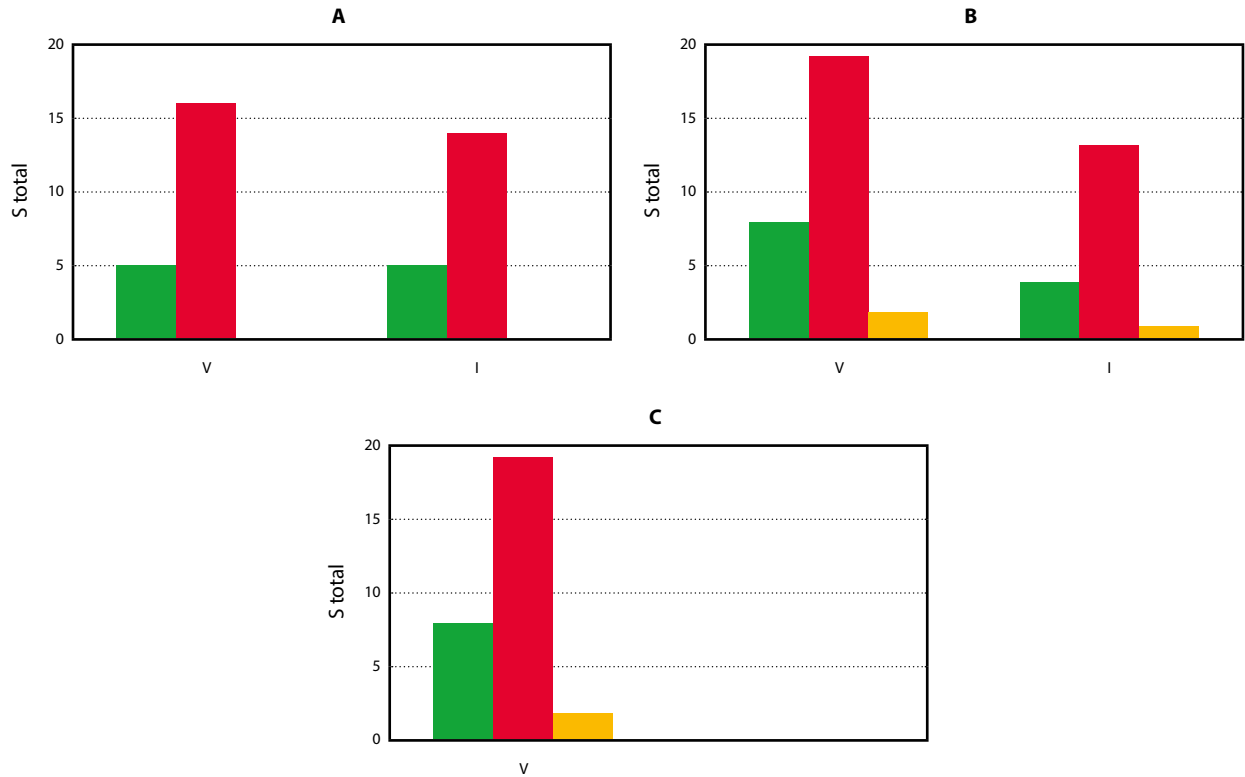


Gráfico 2. Riqueza de especies total (S total) según grupo filogenético: clorofita (color verde), rodofita (color rojo) y ocrofita (color amarillo) para cada sitio. **A**, El Cabito (La Paloma); **B**, Cerro Rivero (Punta del Diablo) y **C**, Cerro Verde (La Coronilla) y para **V**, verano e **I**, invierno.

	S	S clorofitas	S rodofitas	S ocrofitas
S	1	rs=0,60; p<0,001	rs=0,96; p<0,001	rs=0,28; p<0,05
S clorofitas		1	rs=0,40; p<0,05	Ns
S rodofitas			1	Ns
S ocrofitas				1

Tabla 3. Valores de correlación de Spearman entre la riqueza total de especies (S) y la riqueza de cada grupo filogenético (S clorofitas, S rodofitas y S ocrofitas).

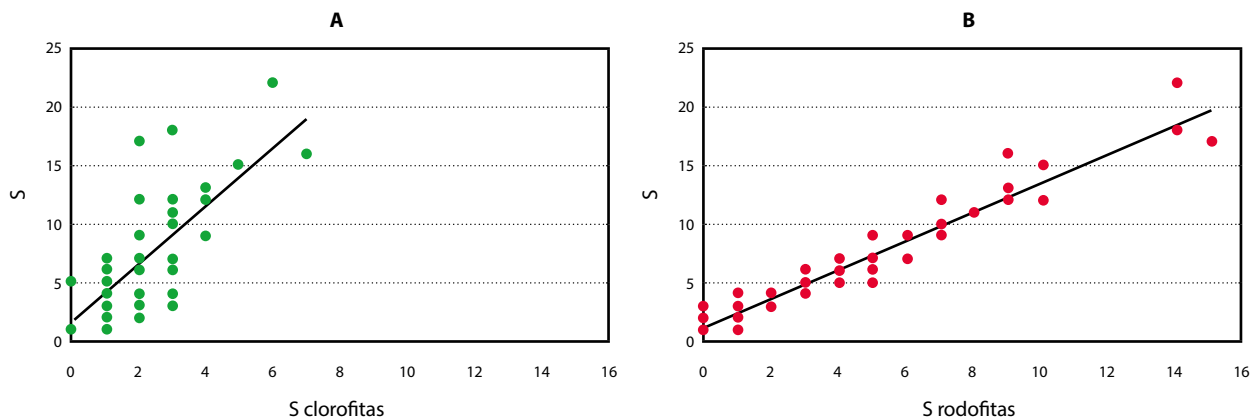


Gráfico 3. Relación y modelos lineales ajustados entre riqueza total de especies (S) y riqueza de los grupos filogenéticos **A** (verde), S clorofitas ($R^2=0,52$ $p<0,001$; $S=2,46 \cdot S_{clorofitas}+1,68$) y **B** (rojo), S rodofitas ($R^2=0,92$ $p<0,001$; $S=1,23 \cdot S_{rodofitas}+1,14$).

Frecuencia de ocurrencia de especies

El complejo *Ulva* spp. fue el más frecuente para todos los sitios y estaciones del año. Presentó una amplia distribución espacial y vertical, abarcando todas las subdivisiones litorales y zonas (supralitoral, intermareal y submareal), incluyendo las pozas de marea. En las pozas supralitorales se encontró un dominio del complejo *Ulva* spp. (morfortipo tubular) y especies del género *Cladophora*. En la zona intermareal expuesta se encontró una elevada frecuencia de *Ulva* spp. (morfortipo laminar), *Gymnogongrus griffithsiae*, *Porphyra/Pyropia* spp., *Hypnea musciformis* y *Polysiphonia* spp. En la zona menos expuesta del intermareal se encontraron con mayor frecuencia *Chondracanthus teedei* y *Grateloupia cuneifolia*; también se destacó la presencia del cordón de corallinas formado principalmente por *Corallina officinalis* y *Jania rubens*. Además, las pozas de la zona intermareal presentaron una elevada riqueza de especies, asociada a una mayor frecuencia del complejo *Ulva* spp. y especies coralináceas (*Corallina officinalis* y *Jania rubens*), destacándose asimismo la presencia de *Codium decorticans*. La zona submareal estuvo dominada principalmente por *Cryptopleura ramosa* y *Pterocladiaella capillacea*.

Biomasa de macroalgas

La biomasa seca total (kg/m²) de macroalgas fue mayor en verano para Cerro Rivero y El Cabito (Gráfico 4). Se estimó la biomasa total húmeda y seca para todos los sitios en conjunto y los valores hallados fueron mayores en verano (PH: 2,17 kg/m², PS: 0,80 kg/m²) que en invierno (PH: 0,98 kg/m², PS: 0,30 kg/m²).

Se encontró una relación lineal positiva entre el PS (g) y el PH (g) de macroalgas para todos los sitios en conjunto y ambas estaciones del año, ajustándose un modelo para estimar el PS a partir del PH (Gráfico 5).

VARIABLES AMBIENTALES

La salinidad, la temperatura del aire y la temperatura del agua fueron mayores en verano (Gráfico 6A y 6B y Tabla 4). La temperatura del aire en el muestreo de verano varió entre 21,6 °C y 25,3 °C mientras que en el invierno varió de 17,5 °C a 21,1 °C (Tabla 4). La temperatura del aire y la temperatura del agua presentaron una relación lineal positiva ($R^2=0,70$, $p<0,001$; $T_{\text{aire}} = 1,35 \cdot T_{\text{agua}} - 10,94$). La turbidez no tuvo diferencias significativas entre estaciones del año y presentó una importante variabilidad (Gráfico 6C) (Tabla 4).

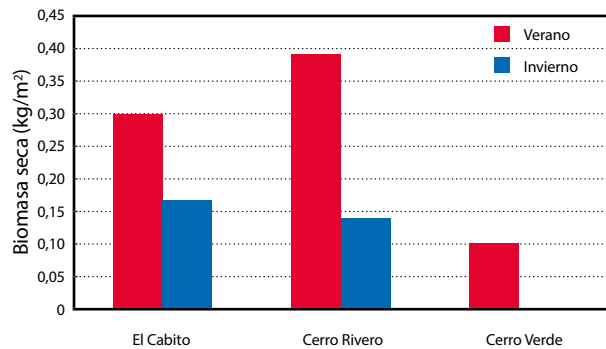


Gráfico 4. Biomasa total seca de macroalgas (kg/m²) para cada sitio (El Cabito, Cerro Rivero y Cerro Verde) y estación del año.

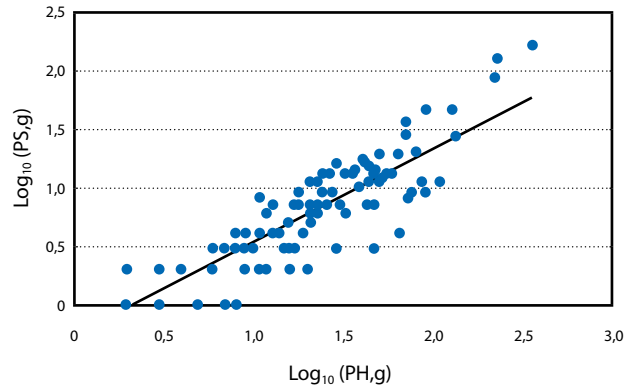


Gráfico 5. Relación y modelo ajustado entre el peso húmedo ($\log_{10}(PH+1)$) y el peso seco ($\log_{10}(PS+1)$) de la comunidad de macroalgas combinando los sitios y ambas estaciones del año ($R^2=0,78$ $p<0,05$; $\log_{10}(PS+1)=0,80 \cdot \log_{10}(PH+1) - 0,27$).

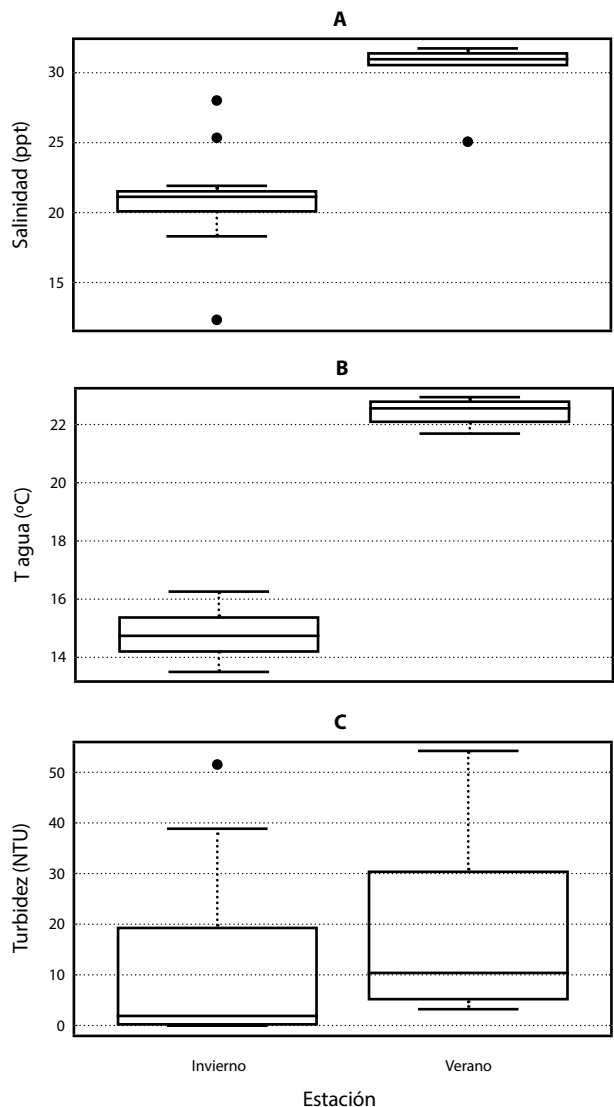


Gráfico 6. Boxplot de variables ambientales de: **A:** temperatura del agua (°C); **B:** salinidad (ppt) y **C:** turbidez (NTU), para cada estación del año (verano e invierno). En todos los casos la línea horizontal oscura representa la mediana de los datos, el rectángulo representa el 1er y el 3er cuartil y la línea vertical punteada representa el rango de distribución.

Variable	Estación del año (verano e invierno)		Zonas (supralitoral, intermareal y submareal)	
	Media	Varianza	Media	Varianza
Salinidad	LRT= 12,99; p<0,001	LRT= 1,09; p=0,29	LRT= 2,82; p=0,24	LRT=0,78; p= 0,67
Temperatura del aire	LRT=10,2; p<0,001	LRT= 0,14; p= 0,71	LTR=0,935087; p=0,63	LRT=5,0; p=0,16
Temperatura del agua	LRT= 28,0; p<0,001	LRT= 2,11; p=0,15	LRT= 0,54; p=0,77	LRT= 0,77; p=0,68
Turbidez	LRT=0,68; p= 0,41	LRT= 0,075; p= 0,78	LRT=5,75; p= 0,056	LRT= 3,43; p=0,18

Tabla 4. Resultados de las pruebas LRT comparando variables ambientales entre estaciones del año y zonas.

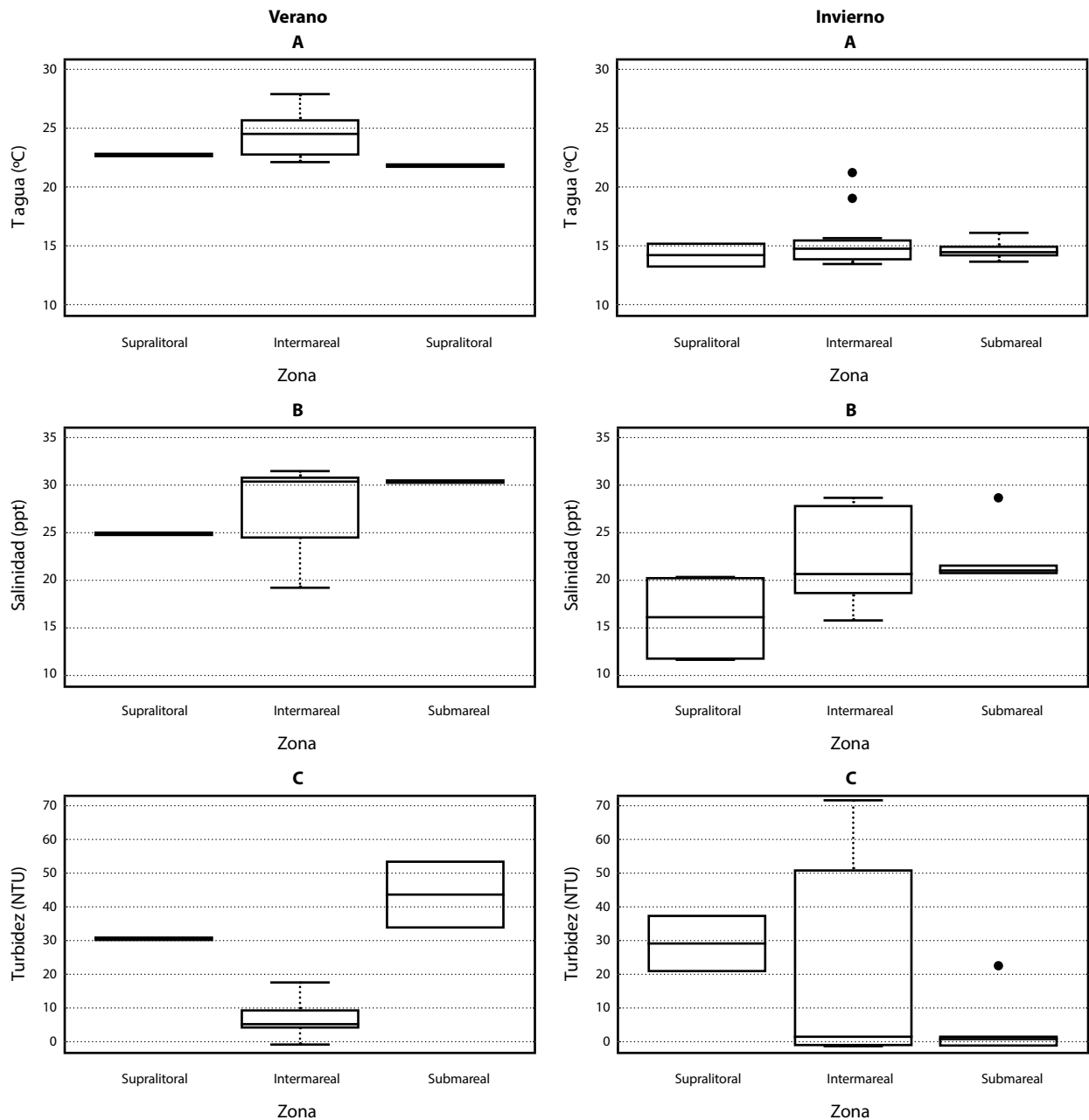


Gráfico 7. Boxplot de variables ambientales del agua: **A:** temperatura (°C); **B:** salinidad (ppt), y **C:** turbidez (NTU) para cada zona (supralitoral, intermareal y submareal) y según la estación del año (verano e invierno). En todos los casos la línea horizontal oscura representa la mediana de los datos, el rectángulo representa el 1er y el 3er cuartil y la línea vertical punteada representa el rango de distribución.

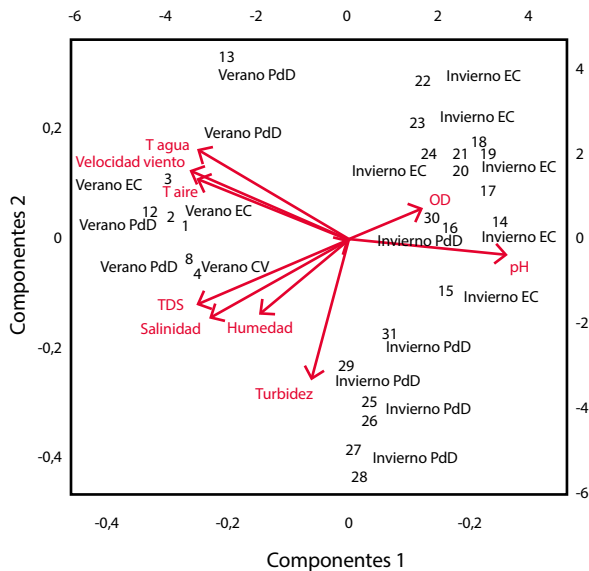


Gráfico 8. Diagrama biplot del análisis de componentes principales incluyendo con números y letras todos los sitios (Puna del Diablo: PdD, El Cabito: EC y Cerro Verde: CV) y transectas muestreadas en ambas estaciones del año (invierno y verano). En flechas se incluyen las variables ambientales medidas en aire y agua incluyendo: temperatura del aire (Taire, °C); intensidad del viento (m/s); temperatura del agua (Tagua, °C); salinidad (ppt); turbidez (NTU); pH y oxígeno disuelto (OD, mg/L).

Se observó que para todas las variables abióticas del agua analizadas la zona intermareal presentó una mayor variabilidad con respecto a las demás zonas (Gráfico 7 y Tabla 4). Si bien se observaron algunas tendencias, como el aumento de la salinidad desde la zona supralitoral hacia el submareal, no se observaron diferencias significativas (Gráfico 7 y Tabla 4).

Finalmente, el ACP mostró que las variables más relevantes para explicar las diferencias en las condiciones ambientales de los distintos sitios fueron la temperatura del agua, la salinidad y la turbidez. Con base en estas variables los sitios se organizaron principalmente en función de la estación del año. Los muestreos de verano e invierno fueron distintos en la mayoría de las variables. El verano fue más cálido, con más viento y mayor salinidad, mientras que el invierno fue más frío y presentó mayores valores de pH y oxígeno disuelto en el agua. La turbidez del agua tuvo un comportamiento distinto: se ubicó en forma perpendicular al gradiente estacional y fue más alta en Cerro Rivero durante el invierno que en los demás sitios. Asimismo, en verano los sitios se diferencian menos entre sí que en invierno, cuando principalmente la turbidez y en menor grado la salinidad se organizaron a lo largo de un gradiente de aguas más claras (El Cabito) a más turbias (Cerro Rivero). Para el sitio El Cabito se observaron además diferencias entre transectas y un cambio en la turbidez con la distancia a la costa.

Discusión

En este trabajo se realizó un relevamiento de la riqueza y composición de especies así como de la biomasa total de macroalgas en puntas rocosas de la costa atlántica de Uru-

guay. Estos sitios se diferenciaron en términos topográficos, geomorfológicos, en grado de presión antrópica y estado de conservación, entre otros. Los principales resultados indicaron que el verano fue la estación del año con mayor biomasa y riqueza de especies, principalmente en Cerro Rivero. A su vez, esta estación presentó fundamentalmente rodofitas y clorofitas. Cerro Rivero y Cerro Verde presentaron mayor riqueza de especies en comparación con El Cabito; estas diferencias entre sitios podrían estar principalmente asociadas a mayor heterogeneidad del sustrato (pozas de marea), con diferencias más claras en verano que en invierno. La menor alteración por actividades antrópicas para el caso de Cerro Verde podría ser un factor que contribuya a la riqueza. Esta localidad se encuentra dentro de un área protegida, donde la comunidad de macroalgas es considerada «objeto focal asociado» a dos objetos focales de conservación de su plan de manejo: las islas y puntas rocosas y la tortuga verde (MVOTMA, 2014).

El número de especies registradas en este estudio (36 taxones) alcanzó el 50% del total de las especies registradas por Coll y Oliveira (1999) (72 especies) cuyo trabajo abarcó varios puntos de la costa de Montevideo, Canelones, Maldonado y Rocha. Estos autores incluyeron las tres localidades muestreadas en este trabajo, aunque no detallaron los sitios, y observaron una mayor riqueza para el departamento de Rocha frente al resto de las zonas analizadas (Coll y Oliveira, 1999). Si bien el número de especies identificadas en nuestro caso fue menor al registrado por estos autores, los taxones observados en este trabajo serían los representativos para la zona en términos de biomasa. De hecho, Coll y Oliveira (1999) consideraron muestras colectadas a lo largo de varios años, así como también especies microscópicas y epífitas (aproximadamente 10 especies menores a 1 cm de altura del talo, de las cuales cinco eran epífitas). En este estudio no fueron considerados aquellos talos menores a 1 cm de altura por lo que la riqueza total podría estar subestimada. La futura evaluación de las especies identificadas a nivel de género y el uso de herramientas moleculares para análisis taxonómicos incrementaría el número de taxones registrados en este estudio.

En este trabajo la mayor riqueza de especies estuvo asociada al grupo de las rodofitas (58,3%), seguido por clorofitas (30,6%), mientras que las ocrofitas estuvieron poco representadas (11,1%). Las proporciones fueron similares a las registradas por Coll y Oliveira (1999) (57%; 33,3% y 9,7%, respectivamente) y a otros estudios realizados en la región que también mostraron una mayor proporción de especies de rodofitas con respecto a los demás grupos (Brasil: Figueiredo, et al., 2009; Argentina: Liuzzi, et al., 2011; Brasil: Portugal, et al., 2016). La temperatura es una de las principales variables moduladoras de la riqueza de cada grupo filogenético en distintas latitudes. El aumento de la temperatura actúa favoreciendo a las rodofitas frente a los demás grupos filogenéticos en términos de diversidad; este grupo, además, suele presentar estructuras que les brindan protección frente a disturbios (por ejemplo, herbivoría) como es en el caso de las coralináceas o géneros con talos duros o cuerosos (por ejemplo, *Chondracanthus*, *Gymnogongrus*, *Pterocladia*, entre otros) (Zhuang, 2006; Liuzzi, et al., 2011; Harley, et al., 2012; Keith, et al., 2014; Holloway-Adkins, et al., 2015; Pellizzari, et al., 2017).

La mayor riqueza de especies encontrada en verano en Cerro Rivero y Cerro Verde, en comparación con El Cabito, estuvo asociada al tipo de sustrato y a una mayor heterogeneidad espacial representada principalmente por un mayor número y diversidad de pozas. Según Steneck y

Dethier (1994), los ambientes que están menos expuestos a situaciones de disturbios como la remoción por el oleaje o herbivoría o estrés ambiental como la desecación y exposición a la luz solar facilitan el crecimiento y el desarrollo de una mayor biomasa de macroalgas. En este sentido, la mayor riqueza de especies encontrada en las pozas de marea podría verse asociada a que generan microhábitats más protegidos y menos expuestos a situaciones de disturbio, favoreciendo de esta forma el crecimiento de un mayor número de especies.

Se registraron por primera vez para Uruguay dos especies: *Grateloupia turuturu* y *Dasya* sp. (ambas rodofitas). *Grateloupia turuturu* es una especie exótica invasora originaria del océano Pacífico (Acevedo, et al., 2015), que fue introducida accidentalmente en la última década hacia el Atlántico suroccidental y se ha reportado en las costas de Santa Catarina en 2015 (Acevedo, et al., 2015). *Dasya* sp. es un género que actualmente cuenta con aproximadamente 81 especies y se encuentra ampliamente distribuido en mares subpolares, templados y tropicales (Guiry y Guiry, 2017), y que fue registrada por primera vez en Uruguay en el invierno en El Cabito y en Cerro Rivero en el año 2016.

Las zonas intermareal y supralitoral se caracterizaron por una gran variabilidad de las condiciones ambientales del agua (temperatura, salinidad y turbidez) en comparación con la zona submareal. Esto es debido a su mayor exposición al oleaje y evaporación, lo cual genera cambios de temperatura y salinidad por mezcla de aguas con distintas características, así como también cambios en los niveles de turbidez por la suspensión de sedimento por acción de las olas (Schiel, et al., 2006; Holloway-Adkins, et al., 2015; Pellizzari, et al., 2017). Los ambientes más expuestos a disturbios suelen presentar dominancia de algunos organismos tolerantes como es el caso de algunas especies del género *Cladophora* spp. y *Ulva* spp. (clorofita) (Steneck y Dethier, 1994; Holloway-Adkins, et al., 2015; Portugal, et al., 2016; Pellizzari, et al., 2017). Este fue el caso de El Cabito, un ambiente con menor número de pozas y sustrato más expuesto, donde se encontró alta abundancia del complejo *Ulva* spp. Además de las características del sustrato, este sitio es el que presenta mayor presión antropogénica durante el verano, generando aún más disturbios por remoción de biomasa o favoreciendo el crecimiento del complejo *Ulva* spp. a través del incremento de los nutrientes (Portugal, et al., 2016).

Las especies que se encontraron dominando en todos los sitios y en ambas estaciones del año fueron especies del complejo *Ulva* spp. (clorofita) (Tabla 2). Se caracterizan por un ciclo de vida corto, de 2 a 3 meses, que incluye las fases de colonización, desarrollo y crecimiento (Steneck y Dethier, 1994; Holloway-Adkins, et al., 2015; Pellizzari, et al., 2017). Son especies cosmopolitas y con amplia distribución espacial, incluyendo el supralitoral (expuestas a la desecación), el intermareal (expuestas a la acción de las olas) y zonas del submareal con mayor profundidad y escasa luz solar (Steneck y Dethier, 1994; Santelices, et al., 2009; Holloway-Adkins, et al., 2015; Pellizzari, et al., 2017). Esto explicaría la elevada frecuencia de aparición de estas especies en todas las profundidades, microhábitats y sitios muestreados para ambas estaciones del año. Algo similar se encontró para las especies *Corallina officinalis* y *Jania rubens* (rodofitas), aunque en zonas más profundas o un poco más estables (por ejemplo, pozas de marea). Estas se caracterizan por un talo calcáreo que les proporciona protección frente a los disturbios (por ejemplo, la herbivoría) (Steneck y Dethier, 1994; Pellizzari, et al., 2017). Este rasgo les permitiría crecer y desarrollarse en

una variedad de ambientes y condiciones, lo cual coincide con lo hallado en este trabajo, donde las especies coralíneas se encontraron con una gran distribución espacial, desde ambientes expuestos del intermareal a ambientes más protegidos del submareal o pozas de marea.

Al comparar la frecuencia de ocurrencia de las especies en relación a las zonas (supralitoral, intermareal y submareal) encontramos una distribución similar a la zonación descrita por Maytía y Scarabino (1979) para las puntas rocosas de Uruguay. Estos autores indican que la presencia ocasional de *Nemalion* sp. en zona alta del intermareal se vincula al agua retenida entre los cirripedios *Chthamalus bisinuatus* y a especies del complejo *Ulva* spp. Para estos autores la zona menos expuesta del intermareal está dominada por *Pterocladia capillacea* y la zona submareal es definida por la presencia de *Codium* sp. arraigado conjuntamente con especies coralíneas como *Corallina officinalis* y *Jania rubens*, lo cual coincide con lo hallado en este estudio.

Las rodofitas siguieron el patrón de la riqueza total, al igual que las clorofitas, con algunas excepciones como la ausencia de diferencias en la riqueza en El Cabito entre invierno y verano. Esto podría estar asociado a la mayor tolerancia de las especies de clorofitas a los cambios ambientales del agua (temperatura, salinidad y turbidez) y del aire (temperatura, intensidad del viento) (Santelices, et al., 2009; Keith, et al., 2014). La baja riqueza de especies de algas pardas registradas (cuatro taxones) coincide con la hallada en estudios anteriores para Uruguay (siete taxones) (Coll, 1976; Coll y Oliveira, 1999). Esto podría deberse a que las ocofitas están mayormente asociadas a latitudes mayores donde predominan aguas con menor temperatura y baja turbidez a lo largo de todo el año (Santelices, et al., 2009; Liuzzi, et al., 2011; Keith, et al., 2014).

Las diferencias en la estructura y heterogeneidad del sustrato estuvieron ligadas a las características geológicas de cada sitio, ya que Cerro Rivero y Cerro Verde comparten la misma unidad geológica (Complejo Granítico Santa Teresa), mientras que El Cabito corresponde a metasedimentos de fondo marino de la Formación Rocha (Basei, et al., 2013; Blanco, et al., 2014). Si bien la heterogeneidad del sustrato fue un factor clave en determinar la estructura comunitaria, su efecto fue solo notorio en verano, ya que en invierno para El Cabito y Cerro Rivero se encontró la misma riqueza de especies (18 especies). Esto indicaría que la temperatura tiene un rol preponderante y el incremento de la riqueza asociada a diferencias en la heterogeneidad de sustrato ocurre a mayores temperaturas, como ha sido observado en otros trabajos (Zhuang, 2006).

Se encontró una relación lineal positiva entre el peso seco y el peso húmedo de las muestras de macroalgas colectadas. El modelo ajustado a esta relación permitiría estimar el peso seco a partir del húmedo, el cual es necesario para realizar cálculos de biomasa de macroalgas. Aplicar el modelo ajustado podría ser muy útil para futuros estudios, ya que disminuiría el trabajo de laboratorio evitando realizar el secado de las muestras.

Conclusiones

Este trabajo permitió retomar una línea de investigación poco transitada en las últimas dos décadas en Uruguay. Fue posible por primera vez realizar un registro estacional de la riqueza de especies de macroalgas, analizando su abundancia y distribución en tres sitios con diferentes características de la

costa atlántica uruguaya. Los principales resultados muestran que las rodofitas son el grupo con mayor diversidad, seguido de las clorofitas y finalmente las ocofitas; las especies más dominantes son el complejo *Ulva* spp. (clorofita) y las especies *Cryptopleura ramosa*, *Jania rubens* y *Polysiphonia* spp (rodofitas). El verano fue la estación del año con mayor biomasa y riqueza de especies, principalmente rodofitas y clorofitas, lo que indica que la temperatura es un factor importante en determinar la composición de la comunidad de macroalgas. En verano, la heterogeneidad del sustrato y potencialmente las actividades antrópicas pasarían a ser los principales factores moduladores. Cerro Rivero y Cerro Verde presentaron una mayor riqueza de especies en comparación con El Cabito, lo cual puede estar principalmente asociado a características del sustrato y a la menor alteración por actividades antrópicas, principalmente para Cerro Verde, ya que se encuentra dentro de un área protegida donde las macroalgas están asociadas a los objetos focales de conservación.

A partir de los resultados obtenidos se espera contribuir a incrementar la información actual disponible sobre la temática y realizar en el futuro un monitoreo continuo de macroalgas en Uruguay. Esto aportaría al análisis de aspectos de ecología y a la creación de una línea de base para el manejo, la evaluación del impacto ambiental de megaemprendimientos y del avance de especies invasoras y el análisis de escenarios en relación al cambio climático.

Reconocimientos

Al programa PAIE-CSIC (Universidad de la República), PE-DECIBA Geociencias (Uruguay) y al proyecto CSIC i+d 197-2016 que financiaron este trabajo. A las estudiantes Victoria Vidal y Soledad Pascuariello, a Paula Laporta y guardaparques del SNAP (Manuel Barreneche y Dante Roibal), a Alejandro Fallabrino, a voluntarios de Karumbé, a Paula Laens y a Matías Morales por su colaboración en los muestreos. A DINARA y Karumbé por toda su colaboración y préstamo de materiales e instalaciones. Agradecemos también a Graciela Fabiano por su apoyo general a lo largo del desarrollo de este estudio, así como a las especialistas de Brasil y Argentina, Franciane Pellizzari, Michelle Silva, Paulo Horta y Paula Raffo por su apoyo y aporte bibliográfico.

Referencias

- Acevedo, C. A. A. D., Cassano, V., Júnior, P. A. H., Baista, M. B. y de Oliveira, M. C., 2015. Detecting the non-native *Grateloupia turuturu* (Halymeniales, Rhodophyta) in southern Brazil. En: *Phycologia*, 54(5), pp.451-454.
- Basei, M.A.S., Sánchez Bettucci, L., Peel, E. y Muzio, R., 2013. Geocronología U-Pb LA-ICP-MS en circones del complejo granítico Santa Teresa, terreno Punta del Este. En: Sociedad Uruguaya de Geología. *VII Congreso Uruguayo de Geología*, 2013. Montevideo, Uruguay (13-15 de noviembre de 2013). Montevideo: SUG.
- Brazeiro, A.I., Borthagaray, A.I. y Giménez, L., 2006. Patrones geográficos de diversidad bentónica en el litoral rocoso de Uruguay. En: Menafrá, R., Rodríguez-Gallego, L., Scarabino, F. y Conde, D., eds., 2006. *Bases para la conservación y el manejo de la costa Uruguaya*. Montevideo: Vida Silvestre. pp.171-178.
- Campos, E.J.D., Piola, A.R., Matano, R.P. y Miller, J.L., 2008. Plata: A synoptic characterization the southwest Atlantic shelf under influence of the Plata River and Patos Lagoon outflows. En: *Cont. Shelf Res.*, 28, pp.1551-1555.
- Carlton, J.T. y Geller, J.B., 1993. Ecological roulette: the global transport of nonindigenous marine organisms. En: *Science*, 261, pp.78-82.
- Coll, J.F., 1976. *Algas marinhas bentônicas do Uruguai*. São Paulo: Universidade de São Paulo, Depto. de Botânica. (Tesis de Doctorado).
- Coll, J.F., 1979. *Catálogo de algas citadas para el Uruguay*. Montevideo: SOHMA-ORCYT (UNESCO).
- Coll, J.F. y Oliveira, E.C., 1999. The benthic marine algae of Uruguay. En: *Bot. Mar.*, 42, pp.129-135.
- Demicheli, M. y Scarabino, F., 2006. Invertebrados bentónicos de La Paloma (Rocha, Uruguay). En: Menafrá, R., Rodríguez-Gallego, L., Scarabino, F. y Conde, D., eds., 2006. *Bases para la conservación y el manejo de la costa Uruguaya*. Montevideo: Vida Silvestre. pp. 523-534.
- Figueiredo, M. A. D. O., Horta, P. A., Pedrini, A. D. G. y Nunes, J. M. D. C., 2009. Benthic marine algae of the coral reefs of Brazil: a literature review. En: *Oecologia Australis*, 12(2), pp.258-269.
- Guiry, M.D. y Guiry, G.M., 2017. *AlgaeBase. World-wide electronic publication* [En línea]. Galway: National University of Ireland. [Consulta: 15 de abril de 2017]. Disponible en: <http://www.algaebase.org>
- Hareau, A., 1984. Ficoflora marina bentónica del Depto. De Montevideo (Uruguay). Punta Mansa a Punta Brava. En: *Contrib. Depto Oceanogr.*, 1(4), pp.1-9.
- Hareau, A. y Osorio, H.S., 1983. Ficoflora marina bentónica del Dep.Montevideo entre Punta Mansa y Punta Brava. En: *Res Com Jorn C Nat Montevideo*, 3, pp.1-2.
- Hareau, A. y Silva, S., 1984a. Contribución a la ficoflora marina bentónica de Montevideo, Uruguay. En: *Comunicaciones Botánicas del Museo de Historia Natural de Montevideo*, 4(65).
- Hareau, A. y Silva, S., 1984b. Resultados del primer relevamiento de la ficoflora bentónica de Isla Gorriti (Uruguay). En: *Contrib Depto Oceanogr (FHC) Montevideo*, 1(6).
- Harley, C. D., Anderson, K. M., Demes, K. W., Jorve, J. P., Kordas, R. L., Coyle, T. A. y Graham, M. H., 2012. Effects of climate change on global seaweed communities. En: *Journal of Phycology*, 48(5), pp.1064-1078.
- Holloway-Adkins, K.G. y Hanisak, M.D., 2015 Macroalgal community within a warm temperate/subtropical biogeographic transition zone in the western Atlantic Ocean. En: *Bull Mar Sci*, 91, pp.295-319.
- Howe, M.A., 1931. Notes on the algae of Uruguay. En: *Bull. Torrey Bot Club*, 52, pp.605-610.
- Hurd, C.L., Harrison, P.J., Bishof, K. y Lobban, C.S., 2014. *Seaweed ecology and physiology*. 2a ed. Cambridge: Cambridge University Press.
- Keith, S.A., Kerswell, A.P. y Connolly, S.R., 2014. Global diversity of marine macroalgae: environmental conditions explain less variation in the tropics. En: *Global Ecology and Biogeography*, 23, pp.517-529.
- Kerswell, A. P., 2006. Global biodiversity patterns of benthic marine algae. En: *Ecology*, 87(10), pp.2479-2488.
- Kruk, C., Martínez, A., Nogueira, L., Alonso, C. y Calliari, D., 2015. Morphological traits variability reflects light limitation of phytoplankton production in a highly

- productive subtropical estuary (Río de la Plata, South America). En: *Marine Biology*, 162(2), pp.331-341.
- Liuzzi, M. G., López Gappa, J. y Piriz, M.L., 2011. Latitudinal gradients in macroalgal biodiversity in the Southwest Atlantic between 36° and 55° S. En: *Hydrobiologia*, 673(1), pp.205-214.
- López-Mendilaharsu, M., Estrades, A., Caraccio, M.N., Calvo, V., Hernandez, M. y Quirici, V., 2006. Biología, ecología y etología de las tortugas marinas en la zona costera uruguaya. En: Menafra, R., Rodríguez-Gallego, L., Scarabino, F. y Conde, D., eds., 2006. *Bases para la conservación y el manejo de la costa Uruguaya*. Montevideo: Vida Silvestre. pp. 247-257.
- Maytía, S. y Scarabino, V., 1979. Las comunidades del litoral rocoso del Uruguay: zonación, distribución local y consideraciones biogeográficas. En: UNESCO, 1979. *Memorias del seminario sobre Ecología Bentónicas y Sedimentación de la Plataforma Continental del Atlántico Sur*. Montevideo: UNESCO, ORCYT. pp. 149-160.
- Méndez, H., 1983. Florula de chlorophytas bentónicas de «La Paloma», Departamento de Rocha (ROU). En: *Res Com Jorn C Nat Montevideo*, pp.33-34.
- MTOP, PNUD y UNESCO, 1980. *Conservación y mejora de playas: URU 73.007*. Montevideo: UNESCO.
- MVOTMA, 2014. *Objetos focales de conservación en el área protegida Cerro Verde e Islas de La Coronilla*. Montevideo: SNAP/DINAMA. 25p.
- Oliveira, E.C., Horta, P.A., Emancio, E. y Anna, C.L.S., 2001. Algas e angiospermas marinhas bêmicas do litoral brasileiro. En: Ministério do Meio Ambiente, org., 2001. *Macrodiagnóstico da zona costeira do Brasil, RJ*. Río de Janeiro: Ministério do Meio Ambiente.
- Pellizzari, F. y Reis, R.P., 2011. Seaweed cultivation on the Southern and Southeastern Brazilian Coast. En: *Brazilian Journal of Pharmacology*, 21(2), pp. 305-312.
- Pellizzari, F., Vélez-Rubio, G. M., Cristine-Silva, M. y Carranza, A., 2016a. The seaweeds *Myriogloea major* Asensi (Chordariaceae, Phaeophyceae) and *Gayralia oxysperma* (Kützting) KL Vinogradova ex Scagel et al.(Ulvophyceae, Chlorophyta): a case of range extension in the Southwestern Atlantic Ocean?. En: *Marine Biodiversity*, 46(4), pp.853-860.
- Pellizzari, F.M., Silva, C., Silva, M., Medeiros, E.A., Oliveira, M.C., Yokoya, N.S., Rosa, L.H. y Colepicolo, P., 2017. Diversity and spatial distribution of seaweeds in the South Shetland Islands, Antarctica: an updated database for environmental monitoring under climate change scenarios. En: *Polar Biol.*, 40(8), pp.1671-1685.
- Pivel, M., 2009. *Reconstrução da hidrografia superficial do Atlântico Sul Ocidental desde o Último Máximo Glacial a partir do estudo de foraminíferos planctônicos*. São Paulo: Universidade de São Paulo. (Tese de Doutorado).
- Pinheiro, J., Bates, D., DebRoy, S., Sarkar, D. y Core Team, R., 2016. *nlme: Linear and nonlinear mixed effects models* [En línea]. R package version 3.1-127. [s.l.]: [s.n.]. [Consulta: 6/2/2016] Disponible en: <http://CRAN.R-project.org/package=nlme>
- Portugal, A.B., Carvalho, F.L., Carneiro, P.B.M., Rossi, S. y Soares, M.O., 2016. Increased anthropogenic pressure decreases species richness in tropical intertidal reefs. En: *Mar. Environ. Res.*, 120, pp.44e54. <http://dx.doi.org/10.1016/j.marenvres.2016.07.005>.
- Sanches, P.F., Pellizzari, F. y Horta, P.A., 2016. Multivariate analyses of Antarctic and sub-Antarctic seaweed distribution patterns: an evaluation of the role of the antarctic circumpolar current. En: *Journal of Sea Research*, 110, pp.29-38.
- Santelices, B., Bolton, J.J. y Meneses, I., 2009. Marine algal communities. En: Witman, J.D. y Roy, K., eds., 2009. *Marine macroecology*. Chicago: University of Chicago Press.
- Santelices, B. y Hommersand, M., 1997. *Pterocladia*, a new genus in the Gelidiaceae (Gelidiales, Rhodophyta). En: *Phycologia*, 36, pp.114-119.
- Scarabino, V., Maytía, S. y Cachés, M., 1975. Carta bionómica del departamento de Montevideo. I. Niveles superiores del sistema litoral. En: *Comunicaciones a la Sociedad Malacológica del Uruguay*, 4(31- 32), pp.177-288.
- Scarabino, F., Zelaya, D., Orensanz, J.M., Ortega, L., Defeo, O., Schwindt, E., Carranza, A., Zaffaroni, J.C.; Martínez, G.; Scarabino, V. y Garcia-Rodríguez, F., 2016. Cold, warm, temperate and brackish: Bivalve biodiversity in a complex oceanographic scenario (Uruguay, southwestern Atlantic). En: *American Malacological Bulletin*, 31(2), pp.284-301.
- Schaffelke, B. y Hewitt, C.L., 2007. Impacts of introduced seaweeds. En: *Botanica Marina*, 50, pp.397-417.
- Schiel, D.R., Wood, S.A., Dunmore, R.A. y Taylor, D.I., 2006. Sediment on rocky intertidal reefs: Effects on early post-settlement stages of habitat-forming seaweeds. En: *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 331, pp.158-172.
- Smale, D.A., Kendrick, G.A. y Wernberg, T., 2010. Assemblage turnover and taxonomic sufficiency of subtidal macroalgae at multiple spatial scales. En: *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 384, pp.76-86.
- Steigleder, K., 2015. *Estrutura das comunidades de macroalgas no mesolitoral rochoso do Atlântico Sudoeste Central (26°S -34°S)*. Rio Grande: Universidad Federal Rio Grande, Rio Grande. (Tesis de Maestría).
- Steneck, R.S. y Dethier, M.N., 1994. A functional group approach to the structure of algal dominated communities. En: *Oikos*, 69, pp.476-498.
- Taylor, W.R., 1939. Algae collected by the «Hassler», «Albatross» and Schmitt expeditions. II. Marine algae from Uruguay, Argentina, the Falkland Islands, and the Strait of Magellan. En: *Papers of the Michigan Academy of Sciences, Arts and Letters*, 24, pp.127-164, Plates 1-7.
- Taylor, W.R., 1960. *Marine algae of the eastern tropical and subtropical coasts of the Americas*. Michigan: Univ. Michigan Press.
- Uruguay. Decreto 285/011, de 11 de agosto de 2011. *Diario Oficial*, 22 de agosto de 2011, No. 28.291, p. 451A.
- Vélez-Rubio, G.M., Estrades, A., Fallabrino, A., Tomás, J., 2013. Marine turtle threats in Uruguayan waters: insights from 12 years of stranding data. En: *Mar Biol* 160, pp.2797-2811.
- Vélez-Rubio, G.M., Cardona, L., Martínez Souza, G., López-Mendilaharsu, M., González-Paredes, D., Carranza, A. y Tomás, J., 2016. Ontogenetic dietary changes of green turtles (*Chelonia mydas*) in the temperate South-Western Atlantic. En: *Marine Biology*, 163(57).
- Wahl, M. ed., 2009. *Marine hard bottom communities: patterns, dynamics, diversity, and change*. Berlín: Springer. (Ecological Studies, 206).
- Wiens, J.J. y Donoghue, M.J., 2004. Historical biogeography, ecology and species richness. En: *Trends in Ecology and Evolution*, 19, pp.639-644.



- Williams, S.L. y Smith, J.E., 2007. A global review of the distribution, taxonomy, and impacts of introduced seaweeds. En: *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 38, pp.327-59.
- Wynne, M.J., 2011. A checklist of benthic marine algae of the tropical and subtropical western Atlantic: third revision. En: *Nova Hedwigia Beiheft*, 140.
- Zhuang, S., 2006. Species richness, biomass and diversity of macroalgal assemblages in tidepools of different sizes. En: *Marine Ecology Progress Series*, 309, pp.67-73.

Potencial del efluente de los parques geotermales del Sistema Acuífero Guaraní para la calefacción de invernáculos

Potential of the Guaraní's Aquifer System geothermal parks effluent for the heating of greenhouses

Ramos, Julián Andrés (1); Blanco, Carlos Nicolás (1); Gamazo, Pablo (1); Saravia, Celmira (2); de Souza, Romina (2); de los Santos, Jorge (3); Betancur, Oscar (4); Ferreira, Álvaro (5)

(1) Departamento del Agua, Centro Universitario Regional Litoral Norte sede Salto, Universidad de la República, Salto, Uruguay.

(2) Facultad de Agronomía, Centro Universitario Regional Litoral Norte sede Salto, Universidad de la República, Salto, Uruguay.

(3) Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay.

(4) Facultad de Agronomía, Centro Universitario Regional Litoral Norte sede Paysandú, Universidad de la República, Paysandú, Uruguay.

(5) Campo Azul, Salto, Uruguay.

Contacto: jramos@unorte.edu.uy

RECIBIDO: 9/9/2017 – APROBADO: 10/11/2017

Resumen

La energía geotérmica disponible en Uruguay es de baja entalpía y se asocia al área de confinamiento del Sistema Acuífero Guaraní, al noroeste del país. Los principales usos del agua termal son el recreacional y la balneoterapia, los cuales generan un efluente que es vertido al ambiente con altas temperaturas. En este trabajo se evaluó el uso del efluente para la calefacción de invernáculos y se presentan los balances térmicos de invernáculos con y sin aporte de calefacción. A su vez, se calcula el ahorro energético obtenido frente a un sistema de calefacción convencional. De acuerdo a los resultados, el poder contar con energía geotérmica de baja entalpía para calefaccionar invernáculos representa un ahorro de energía eléctrica de 4,46 kWh/m² o de 0,61 l/m² de gasoil en el mes de máxima demanda energética. La investigación permitió dilucidar la oportunidad de una acción que se viene esbozando como atenuante en el control de heladas y que permite mejorar la calidad de la fruta de tomate, reduciendo el impacto ambiental por el vertido directo del agua termal en los cursos de agua.

Palabras clave: Geotermia, calefacción, invernáculos, tomate.

Abstract

In Uruguay, the availability of low enthalpy geothermal energy is associated with the area where the Guaraní Aquifer System is confined, in the northwest of the country. The main uses of thermal water are recreational and balneotherapy, which generate an effluent with high temperatures that is discharged to the environment. In this article we evaluate the use of this effluent for the heating of greenhouses and present the thermal balance of greenhouses with and without heating. In addition, the energy obtained from the effluent is compared to conventional heating system. Results show that the greenhouses heated with low enthalpy geothermal energy represent an electrical energy saving of 4,46 kWh/m² or 0,61 l/m² of diesel in the month of maximum energy demand. We also elucidate the opportunity of an action that has been outlined for frost controlling, improving tomato fruit quality and reducing the environmental impact of the thermal effluent on the environment.

Keywords: Geothermal, heating, greenhouses, tomato.

Introducción

La energía geotérmica disponible en Uruguay es de baja entalpía y se asocia al área donde se halla el Sistema Acuífero Guaraní, al noroeste del país. Por gradiente geotérmico, 3 °C de aumento cada 100 metros de profundidad, se produce un aumento de la temperatura del agua del acuífero, la cual alcanza la superficie a través de perforaciones infrabasálticas

con hasta 30 °C por encima de la media de pozos someros. La perforación infrabasáltica de mayor temperatura a boca de pozo se encuentra en Salto, pertenece a OSE y alcanza los 49 °C. Según Bossi et al. (2011), la explotación con pozos puede alcanzar caudales cercanos a los 800 m³/h y, por lo tanto, podría cubrir necesidades de abastecimiento público, riego, consumo en fábricas, secado de grano, amortiguación de heladas, entre otros usos. Cernuschi (2014) explica que

este recurso geotermal podría presentar usos directos que significarían un ahorro de energía eléctrica de otras fuentes.

Hoy, el recurso geotermal en Uruguay solo tiene aplicaciones recreativas y de balneoterapia. Estas actividades producen un efluente que es vertido a los ríos cercanos, tras un recorrido variable para su enfriamiento. Previo al enfriamiento se constata que la temperatura del agua se encuentra entre 30 y 40 °C. Este rango de temperaturas es aplicable a la calefacción de especies vegetales bajo protección (López, et al., 2000).

El tomate es el principal cultivo hortícola de Uruguay, tanto en volumen físico (53,6% del total de las hortalizas en la zafra 2012-2013), como económico. Su producción se desarrolla principalmente en la zona de Salto y Bella Unión, en un área de 1,38 km² (206 productores) en la zafra 2012-2013, con una producción de 19.044 toneladas, mientras que en el sur se cultivan 0,73 km² (236 productores), en Montevideo y Canelones, con una producción de 7.705 toneladas (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca, 2013).

En el norte del país este cultivo se hace contra estación, aprovechando ventajas comparativas por factores naturales y los buenos precios que se pueden obtener por la producción fuera de su época normal de fructificación (Barboza, 2008).

El tomate (*Lycopersicon esculentum*, Mill.) pertenece a la familia de las Solanáceas. Es una planta de origen americano, de la zona de Perú, Ecuador, propia de climas cálidos. Es una especie de ciclo estival indiferente al fotoperíodo, cuya temperatura óptima varía con el estado fenológico y que crece mejor con temperatura variable que con temperatura constante (Calvert, 1966). Después del trasplante, los óptimos de temperatura son desde 18-22 °C para el día y 15-17 °C para la noche. Una temperatura por debajo de 12 °C ralentiza el crecimiento y aparecen síntomas de deterioro. Temperaturas bajo 10 °C causan efectos negativos sobre la floración, reduciendo el cuajado de los frutos (Benacchio, 1982) y produciendo la muerte de tejidos si la temperatura es menor a 0 °C.

Cuando la temperatura del aire es inferior o igual a 0 °C, los productores a menudo utilizan el término helada. Según Snyder et al. (1987) y Kalma et al. (1992), se pueden definir dos tipos de heladas: advectiva y radiativa. La primera se asocia a la entrada de grandes masas de aire frío y a una temperatura en la mayoría de las ocasiones por debajo de 0 °C, incluso durante el día. En las heladas por radiación la disminución de la temperatura se produce debido a la pérdida de energía por intercambio radiante durante las noches despejadas y sin presencia de viento (FAO, 2004). En Uruguay durante la estación invernal muy frecuentemente se producen heladas por radiación que pueden generar daños muy severos en producciones hortifrutícolas. Para poder contrarrestar los efectos de las heladas existen técnicas de protección que se pueden clasificar en métodos pasivos y activos (Kalma, et al., 1992). Los primeros son utilizados con fines preventivos y son usados normalmente para un período largo de tiempo. Los segundos son considerados como temporales y requieren el uso intenso de energía o trabajo, o de ambos. En la producción hortícola del norte de Uruguay, para el control de heladas son mayormente utilizados los métodos activos. Dentro de estos se pueden mencionar varias técnicas, por ejemplo: estufas, ventiladores, aspersores, riego de superficie, e incluso uso de helicóptero. De estas técnicas, la más utilizada en Uruguay son los aspersores, que se instalan sobre el techo de los invernaderos para generar una delgada capa de hielo que al formarse libera calor evitando que dentro del invernáculo la temperatura baje de 0 °C.

La calefacción de invernáculos, con diferentes fuentes de energía, ha sido estudiada por diversos autores, quienes concluyen que el aporte de energía a los cultivos contribuye a la precocidad y al incremento de la producción (Sainato, et al., 1999; Iriarte, et al., 2002; López, et al., 2000). Otero (1982) realizó en Salto un ensayo sobre fitoreguladores en la inducción del cuajado del tomate y halló que la calefacción del invernáculo con agua termal es el factor que más aumentó la precocidad de las variedades.

La posibilidad de contar con un predio con efluentes termales y con superficie suficiente para realizar una experiencia a escala real motivó la presentación de un proyecto al Fondo Sectorial de Energía de la Agencia Nacional de Investigación e Innovación (ANII). El proyecto tuvo como fin central utilizar efluentes de los parques termales para calefacción de invernáculos. El objetivo de este trabajo es mostrar la experiencia realizada y transmitir los principales resultados obtenidos.

Materiales y métodos

La investigación fue llevada a cabo en inmediaciones de las termas de Daymán, al suroeste de la ciudad de Salto, Uruguay, en un terreno cedido por la Curia Eclesiástica de Salto aledaño a la perforación termal de la Intendencia. Este terreno tiene una superficie suficiente para atender varias actividades relacionadas con el uso directo de estas aguas, entre las que se cuentan las piscinas del hotel y del camping, y un proyecto de piscicultura. La topografía natural del terreno posibilita la captación y conducción por gravedad de los efluentes de las piscinas termales.

En el predio se construyeron dos invernáculos de 21 x 24 m, orientados en dirección E-O, con altura central de 4 m y lateral de 2 m. La estructura se conformó con madera de eucalipto y cobertura de polietileno térmico de 150 µm. En el compartimento al este de cada invernáculo se sembró la variedad de tomate americano de ciclo largo Elpidia.

Las plántulas de tomate se trasplantaron en tresbolillo cada 0,2 m y la conducción se realizó con el sistema holandés de hilo vertical, en forma similar a lo adoptado por los productores de la zona.

Para el sistema de riego se empleó riego localizado con cinta con emisores a 0,20 m con un caudal de 1,5 l por emisor y una presión operativa de 7 mca.

El tratamiento fitosanitario se realizó con productos orgánicos. Como medida preventiva se colocó sobre los canchales de polietileno negro de 30 µm de espesor para evitar el crecimiento de especies vegetales no deseadas que pudieran competir con el cultivo por recursos como la radiación y los nutrientes. También se instalaron mallas anti-áfidos en todo el perímetro del cultivo de tomate para evitar el ingreso de insectos desde el exterior y reducir al mínimo posible las aplicaciones de control.

Para llevar a cabo el control de heladas se instalaron aspersores sobre el techo de los invernáculos. Mediante un sistema automático dotado de sensores de temperatura, los aspersores se accionaban una vez que la temperatura del aire alcanzaba los 2 °C. Este criterio se utilizó para evitar que se congelara el agua dentro de los caños de distribución. Los aspersores eran alimentados con aguas de pozos someros con una temperatura próxima a los 20 °C.

En uno de los invernáculos se incorporó un sistema de calefacción que utilizaba como fuente de energía el efluente

termal y el otro se utilizó de referencia. López et al. (2000) explican que al aplicar calor en la base del cultivo se aumenta la temperatura del suelo y la del invernáculo aprovechando el movimiento convectivo del aire. El elemento conductor del calor en este caso es el aire, que proporciona un aumento rápido de la temperatura, debido a su baja inercia térmica, y se enfría de igual forma cuando deja de actuar el sistema de calefacción. Teniendo en cuenta este último aspecto, se diseñó el sistema de calefacción de 6 tubos de PE de 16 mm de diámetro por 21 m de longitud por cantero, que fueron dispuestos sobre el suelo en torno a las líneas de cultivo y a través de los cuales se hizo circular agua a temperaturas de entre 30 y 40 °C, proveniente de efluentes termales del hotel Posta del Daymán.

En la Figura 1 se pueden visualizar los canteros N°3 correspondientes al invernáculo de tomate sin calefacción (ITSC) y al invernáculo de tomate con calefacción (ITCC), respectivamente.

En cada invernáculo se instalaron estaciones meteorológicas automáticas (EMAs) modelo HOBO U30-NRC, de la firma Onset Computer Corp, con sensores de temperatura y humedad del aire a 0,5, 1,0 y 1,5 m, sobre un asta ubicada entre los canteros. Para el exterior se utilizaron los registros de temperatura y humedad del aire, velocidad del viento y radiación de una estación meteorológica automática con los sensores ubicados a 1,5 m de altura. Los registros se realizaron cada 10 minutos.

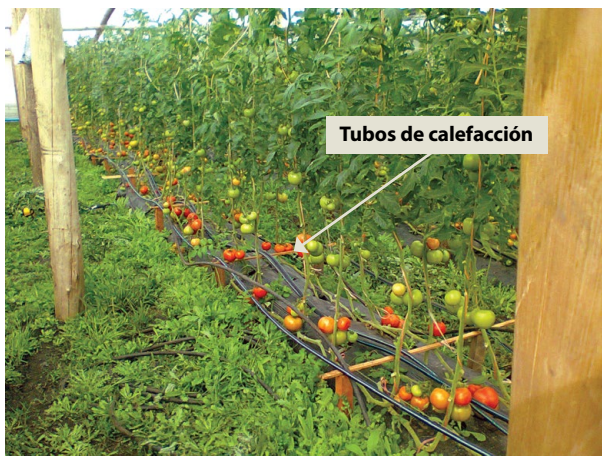


Figura 1. Cantero N° 3 del ITSC (arriba), y cantero N° 3 del ITCC (abajo).

Para el diseño del sistema se adoptó el procedimiento de cálculo publicado por Valera et al. (2008), en el cual se considera el mayor ahorro y eficiencia en la instalación de calefacción de invernáculos.

Partiendo de las necesidades térmicas del tomate se adoptaron los siguientes parámetros de diseño:

- Temperatura mínima interior: 12 °C
- Temperatura mínima exterior: 3 °C
- Renovación horaria de 0,75
- Caudal de agua termal: 3 m³/h
- Radiación incidente: 0 W/m²

Se adoptó como nula la radiación incidente debido a que el balance se efectuó para cada invernáculo durante la noche, o sea, en la condición más desfavorable.

Se realizó el balance energético para cada invernáculo, evaluado diariamente entre las 20 y las 8 hs, y se calculó el valor del flujo calórico perdido (Q_{per}) cada 10 min a partir de los datos registrados por las EMAs, tanto para el ITCC como para el ITSC. En cada invernáculo se resolvió la Ecuación 1:

$$Q_{per} = Q_{cc} + Q_{ren} + Q_{evap} + Q_{sue} + Q_r \quad [Ec. 1]$$

Las direcciones de los diferentes flujos calóricos se observan en la Figura 2.

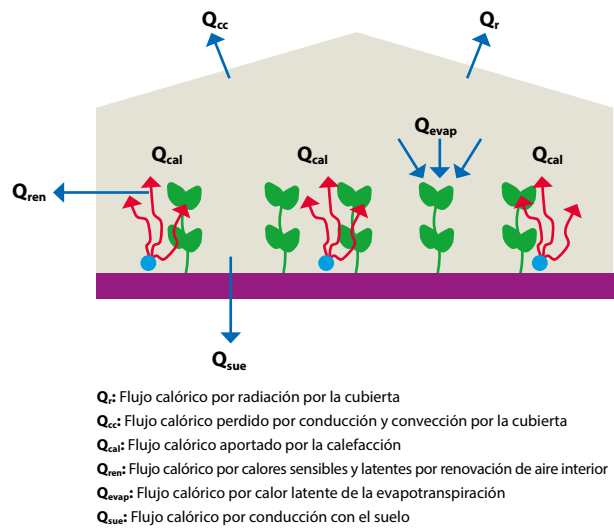


Figura 2. Flujos calóricos en un invernáculo (modificada de Varela, et al., 2008).

El flujo calórico por radiación de la cubierta se obtuvo a partir de la Ecuación 2.

$$Q_r = S_c \times \sigma \times \tau_{ter} \times [\epsilon_{atm} \times T_{atm}^4 - \epsilon_{ter} \times T_c^4] \quad [Ec. 2]$$

donde S_c es la superficie de suelo cubierta, σ es la constante de Stefan-Boltzman, τ_{ter} es el coeficiente de transmisión del material de cubierta para la radiación solar, ϵ_{atm} es la emisividad de la atmósfera, T_{atm} corresponde a la temperatura de emisión de energía de la atmósfera, ϵ_{ter} es la emisividad del material de cubierta para la radiación térmica y T_c es la temperatura absoluta de la cubierta.

El flujo calórico perdido por conducción y convección por la cubierta se obtuvo a partir de la Ecuación 3.

$$Q_{cc} = S_d \times K_{cc} \times (t_i - t_e) \quad [\text{Ec. 3}]$$

donde S_d es la superficie desarrollada de la cubierta del invernadero, K_{cc} es el coeficiente global de pérdidas de calor por conducción-convección, t_i la temperatura interior y la t_e corresponde a la temperatura exterior. Las temperaturas fueron expresadas en grados Celsius.

El flujo calórico por calores sensible y latente por renovación del aire interior se obtuvo a partir de la Ecuación 4.

$$Q_{ren} = V_{inv} \times R/3600 \times \rho \times [c_{pa} \times (t_i - t_e) + \lambda_o \times (x_i - x_e) + c_{pv} \times (x_i \times t_i - x_e \times t_e)] \quad [\text{Ec. 4}]$$

donde V_{inv} es el volumen del invernadero, R es la tasa de renovación de aire debido a la infiltración a través de la estructura, ρ es la densidad del aire, c_{pa} el calor específico del aire, λ_o es el calor latente de vaporización, x_i y x_e la humedad absoluta del interior y exterior, respectivamente, y c_{pv} es el calor específico del vapor recalentado. Las variables t_i y t_e fueron definidas con antelación.

El flujo calórico por calor latente de la evapotranspiración se despreció, pues el balance se realizó durante la noche. Durante las horas nocturnas la transpiración de las plantas es nula debido al cierre estomático, y la evaporación del suelo es ínfima debido a la cobertura de polietileno negro de 30 μm de los canteros.

El flujo de calórico por conducción con el suelo se obtuvo a partir de la Ecuación 5.

$$Q_{sue} = K_s \times S_c \times (t_i - t_s)/p \quad [\text{Ec. 5}]$$

donde K_s es el coeficiente de intercambio térmico a través del suelo, t_s la temperatura del suelo del invernadero y p la profundidad a la que estima la diferencia de temperatura.

Las constantes expresadas en las fórmulas anteriores se extrajeron de la publicación de Valera et al. (2008).

La potencia, o flujo calórico suministrado por el sistema de calefacción al ITCC cada 10 min, se obtuvo resolviendo la Ecuación 6:

$$P = Q_{alm} + Q_{per\ ITCC} - Q_{per\ ITSC} \quad [\text{Ec. 6}]$$

donde:

- P : Potencia suministrada por el sistema de calefacción al ITCC.
- Q_{alm} : Flujo calórico almacenado por el aire del ITCC por aumento de temperatura del aire respecto del ITSC.
- $Q_{per\ ITCC}$: Flujo calórico total perdido en el ITCC
- $Q_{per\ ITSC}$: Flujo calórico total perdido en el ITSC

La energía mensual aportada al ITCC por el sistema de calefacción se obtuvo a partir de la Ecuación 7.

$$E = \sum P_i \times 10 \text{ min} \quad [\text{Ec. 7}]$$

donde P_i es la potencia instantánea calculada anteriormente.

Para el análisis de producción de tomate se utilizó el procedimiento Mixed del paquete del programa SAS®. El efecto

día de cosecha fue considerado como el factor de medidas repetidas. Se consideró la estructura de autocorrelación entre observaciones repetidas en un mismo cantero a través del tiempo, según un modelo autorregresivo de orden 1.

En el análisis no se tuvieron en cuenta el primer y el último cantero de cada invernáculo por el efecto borde.

Resultados

A continuación se presentan los resultados obtenidos en el balance energético calculado de abril a octubre de 2014, evaluado diariamente entre las 20 y las 8 hs. En la Tabla 1 se muestran los resultados obtenidos de potencia aportada al ITCC.

Mes	Potencia kW	
	Máxima	Media
Abril	7,96	3,68
Mayo	9,83	2,72
Junio	11,23	5,94
Julio	9,06	5,65
Agosto	7,90	3,51
Setiembre	5,50	1,50
Octubre	3,80	0,79

Tabla 1. Potencias (máxima y media, kW) suministradas al ITCC para el periodo de abril a octubre de 2014.

El intercambiador de calor fue dimensionado para proveer al invernáculo la potencia máxima de 9,68 kW. Puede observarse que en junio la potencia de diseño fue excedida, lo que podría atribuirse a que el caudal circulante en ese momento superó el caudal de diseño.

En la Tabla 2 se presenta la energía mensual aportada durante el mismo período, la energía eléctrica equivalente que proporcionaría un equipo de calefacción eléctrico con un rendimiento de 0,95 y los litros de combustible (gasoil) necesarios si se utiliza un quemador con rendimiento igual a 0,60.

Mes	Energía provista	Energía eléctrica	Litros de gasoil
Abril	1147,10	1207,47	165,77
Mayo	945,48	995,24	136,63
Junio	2137,00	2249,47	308,82
Julio	2049,20	2157,05	296,13
Agosto	1010,70	1063,89	146,05
Setiembre	540,86	569,33	78,16
Octubre	243,32	256,13	35,16

Tabla 2. Energía (kWh) suministradas al ITCC, equivalente eléctrico y litros de gasoil ahorrados.

En la Tabla 3 se presenta la cantidad de horas por mes en las que se registraron temperaturas en cada invernáculo iguales o inferiores a 10 °C (umbral seleccionado por el efecto depresivo sobre la floración) para cada año de ensayo (de Souza, et al., 2014).

Mes	Cantidad de horas		% de horas del mes	
	ITSC	ITCC	ITSC	ITCC
Abril	64,8	7,2	8,7	1,0
Mayo	101,3	45,6	13,6	6,1
Junio	213,6	88,0	28,7	11,8
Julio	200,2	118,8	26,9	15,9
Agosto	159,2	106,8	21,4	14,3
Setiembre	51,0	35,2	6,8	4,7

Tabla 3. Horas con temperatura igual o inferior a 10 °C para cada mes de evaluación del cultivo en 2014.

Como se puede observar, el invernáculo calefaccionado siempre tuvo menos horas con temperaturas por debajo del umbral seleccionado.

Producción

La producción de tomate se separó por categorías según el diámetro de cada fruto: especial ($\varnothing > 9$ cm), primera ($\varnothing > 8$ cm), segunda ($\varnothing > 7$ cm) y tercera ($\varnothing > 6,5$ cm). Se registró en cada cosecha el peso (kg) total de cada cantero por categoría en el periodo que abarca de junio a octubre. De acuerdo a los resultados, en el primer mes se constataron diferencias significativas ($p < 0,001$). En dicho mes la productividad fue superior en ITCC respecto a ITSC (3,3kg /m² vs 1,2 kg /m²), lo que evidencia una mayor precocidad en el invernáculo calefaccionado. Vale destacar que las diferencias entre los tratamientos, a favor del ITCC, se dieron en las categorías primera y segunda, que tienen mayor valor comercial. Esto demostraría la precocidad producida por el efecto de la calefacción, resultado que coincide con la bibliografía (Sainato, et al, 1999). La precocidad evidenciada en ITCC con respecto a ITSC podría deberse, además de a la energía aportada, a la menor cantidad de horas que estuvo cada cultivo por debajo de 10 °C, temperatura que, según Benacchio (1982), puede ser considerada como la que tiene influencia en la viabilidad de las flores.

La calefacción como atenuante del efecto de heladas sobre el cultivo

Luego de concluido el proyecto, en 2015 se continuó con la investigación, pues se contaba con la infraestructura para llevarla a cabo. Ese año, al igual que en los anteriores, se instalaron sobre los invernáculos aspersores para combatir las heladas. Durante un evento de helada registrado en la madrugada del 19 de junio, el automatismo que accionaba la bomba para que se activaran los aspersores no funcionó, lo que ocasionó daños importantes en el ITSC. El 85 % de las plantas del ITSC se vieron afectadas, mientras que en el ITCC solo se vieron afectadas las plantas que se encontraban en los bordes. En la

Figura 3 se observan los daños producidos sobre las plantas del ITSC y el estado de las plantas del ITCC. Las fotografías fueron tomadas la semana siguiente al evento. Se entiende que el daño sobre las plantas fue atenuado en el ITCC debido a que la temperatura interna registrada en su interior siempre se encontró por encima de 0 °C (Gráfico 1). A pesar de que la diferencia de temperatura interna entre los dos invernáculos fue mínima cuando se registraron las temperaturas más bajas, fue suficiente para que en el ITCC no se produjeran mayores problemas con el cuajado de los frutos, a diferencia de lo que sucedió en el ITSC, donde se perdió prácticamente por completo la floración. Estas diferencias tuvieron consecuencias importantes sobre la producción en las siguientes semanas.

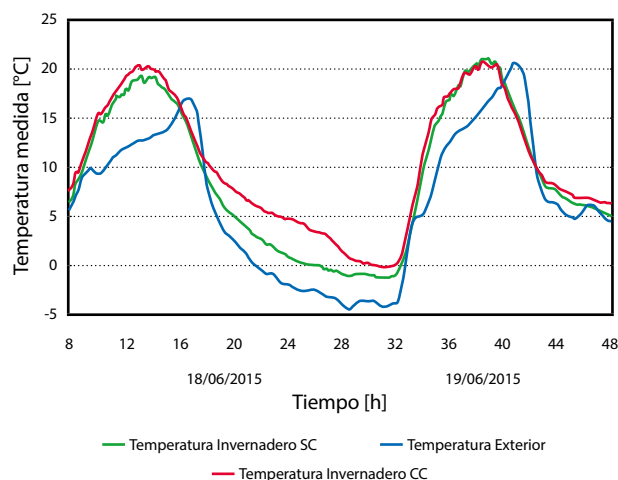


Gráfico 1. Registro de temperatura exterior e interior a los ITSC e ITCC durante la helada del 19/06/2015.



Figura 3. Plantas con daño visible (ITSC) (arriba) y plantas sin daño visible (ITCC) (abajo).

Discusión

En primer lugar, la ejecución del proyecto «Utilización de la energía geotérmica para calefacción de invernáculos» permitió completar una investigación en la temática de usos directos de la geotermia de baja entalpía en Uruguay.

En segundo lugar, se observó un incremento en calidad y cantidad en la producción de tomates en el ITCC respecto del ITSC tradicional, pese a lo reducido que fue el período de investigación.

El reuso del recurso geotermal contribuye a la disminución del impacto ambiental generado por este antes de su volcado, pues se reduce su temperatura.

El proyecto permitió dilucidar la oportunidad de una acción que se viene esbozando como atenuante en el control de heladas y como seguro aporte al incremento de producción fuera de estación de especies agrícolas, extensible a especies florales.

Reconocimientos

A la Agencia Nacional de Investigación e Innovación, convocatoria del Fondo Sectorial Energía (2011) FSE_1_2011_1_6148, por aprobar y apoyar financieramente la investigación. Asimismo, a la Fundación Universitaria Regional norte, al Pbro. José María García Gerolami, a los Sres. Miguel Burgos, Amaro Flores, Stella Maris Errecart, Jovana Vilches, Sixto Moneta y Eduardo Tenca, por haber permitido, colaborado y acompañado el desarrollo de la investigación.

Referencias

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. y Smith, M., 1998. *Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements* [En línea]. Roma: FAO. (FAO Irrigation and Drainage paper, 56). [Consulta: marzo de 2013]. Disponible en: http://www.academia.edu/download/40878584/Allen_FAO1998.pdf
- Barboza R., 2008. *El sector hortícola del litoral norte uruguayo: oportunidades y desafíos*. Montevideo: Cooperación Unión Europea-Uruguay, Ministerio de Industria, Energía y Minería.
- Benacchio, S., 1982. *Algunas exigencias agroecológicas en 58 especies de cultivos con potencial de producción en el Trópico Americano*. Maracay: FONAIAP-CNIA.
- Bossi, J., Caggiano, A. y Oliveira, R., 2011. *Manual didáctico de Geología para estudiantes de Agronomía* [En línea]. Montevideo: Universidad de la República. ISBN: 978-9974-0-0763-5. [Consulta: 30 de junio de 2014]. Disponible

- en: http://www.cse.edu.uy/sites/www.cse.edu.uy/files/documentos/CSE-Fagro_Caggiano_2011-06-29-lowres.pdf.
- Calvert, A., 1966. Requerimientos de temperatura en plantas jóvenes de tomate. En: *Horticultura*, 4, pp.12-17.
- de Souza, R., Saravia, C., Ramos, J., Blanco, N., Bentancur, O., de los Santos, J., Cánepa, P. y Ferreira, A., 2014. Utilización de la energía geotérmica para calefacción de invernaderos de tomate (*Lycopersicon Esculentum*, Mill.). Resultados Preliminares. En: Asociación Argentina de Agrometeorología. *Resúmenes de la I reunión binacional Uruguay- Argentina de agrometeorología*. Piriápolis: A.A.D.A. pp.109-110. ISBN: 978-987-688-082-4.
- Cernuschi, F., 2014. Energía geotérmica: potenciales aplicaciones para la diversificación de la matriz energética de Uruguay. En: *Revista SUG*, 19, pp.1-14.
- FAO, 2004. *Protección contra las heladas: fundamentos, práctica y economía* [En línea]. Vol 1. Roma: FAO. [Consulta: 13 de julio de 2017]. Disponible en: www.fao.org/3/a-y7223s.pdf
- Iriarte, A., Bistoni, S. y Saravia, L., 2002. Modelo de predicción del comportamiento de colectores solares plásticos para calentamiento de sustratos en invernaderos. En: *Revista Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 6, pp.37-42, ISSN 0329-5184. [Consulta: marzo de 2013]. Disponible en: <http://www.cricyt.edu.ar/asades/modulos/averma/trabajos/2002/2002-t002-a007.pdf>
- Kalma, J.D., Laughlin, G.P., Caprio, J.M. y Hamer, P.J.C., 1992. *The bioclimatology of frost: its occurrence, impact and protection*. Berlin: Springer-Verlag. (Advances in Bioclimatology, 2).
- López, J., Lorenzo, P., Medrano, E., Sánchez-Guerrero, M., Pérez, J., Puerto, H. y Arco, M., 2000. *Calefacción de invernaderos en el sudeste español. Resultados*. Almería: Caja Rural de Almería.
- Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca - Dirección de Estadísticas Agropecuarias, 2013. *Anuario estadístico agropecuario 2013* [En línea]. Montevideo: MGAP. [Consulta: 10 de agosto de 2014]. Disponible en: http://www.mgap.gub.uy/Dieaanterior/Anuario2013/DIEA_Anuario_2013.pdf
- Otero, A., 1982. *Empleo de fitorreguladores en la inducción del cuajado del tomate*. Montevideo: [s.n.]. (Tesis de grado).
- Sainato, C., Landini, A., Landini, M., Mascarini, L. y Bottini, L., 1999. Requerimientos de calefacción de cultivos en invernadero de tomate y pimiento en distintas zonas de La Pampa húmeda, Argentina. En: *Agricultura Técnica CHILE*, 59(1), pp.55-66.
- Snyder, R.L., Paw, U.K.T. y Thompson, J.F., 1987. *Passive frost protection of trees and vines*. California: University of California. (Leaflet, 21429).
- Valera, D., Molina, F. y Álvarez, A., 2008. *Ahorro y eficiencia energética en invernaderos*. Madrid: UDA-CENER.

Hidrotratamiento catalítico de aceites vegetales para la producción de biocombustibles líquidos

Catalytic hydrotreating of vegetable oils for the production of liquid biofuels

Volonterio, Elisa (1); Bussi, Juan (2); Castiglioni, Jorge (2); Vieitez, Ignacio (1); Jachmanián, Iván (1).

(1) Derivados de la Industria Alimentaria, Departamento de Ciencia y Tecnología de Alimentos, Facultad de Química, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay.

(2) Laboratorio de Físicoquímica de Superficies, Departamento de Experimentación y Teoría de la Estructura de la Materia y sus Aplicaciones, Facultad de Química, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay.

Contacto: ijachman@fq.edu.uy

RECIBIDO: 4/9/2017 – APROBADO: 8/11/2017

Resumen

Se denomina hidrotratamiento al proceso consistente en el sometimiento de un material a alta temperatura y presión de hidrógeno en presencia de un catalizador adecuado. El hidrotratamiento ha cobrado creciente interés en el área de las energías renovables ya que hace posible convertir a biocombustibles biomasa de diferente origen. En particular, cuando una grasa o aceite es destinado a este tipo de proceso es posible su conversión a una mezcla de parafinas e isoparafinas aptas para la sustitución del gasoil. A este tipo de biocombustible líquido se lo ha denominado «biogasoil» (o «greendiesel»), y es una alternativa de superior calidad a la del biodiesel tradicional. En este trabajo se sometió el aceite de girasol de alto oleico a un proceso de hidrotratamiento en batch a 350 °C y 100 bar de H₂, en presencia de tres catalizadores diferentes: NiMo/Al₂O₃, PtO₂ y Pd/Al₂O₃. Luego de 4 horas de reacción los rendimientos medidos en porcentaje de hidrocarburos en el producto alcanzaron 89, 93 y 98 %, respectivamente. La composición de los productos obtenidos sugiere que el proceso transcurre mediante un mecanismo complejo que involucra procesos de hidrodeoxigenación, hidrodecarbonilación, hidrodecarboxilación y cracking.

Palabras clave: Biocombustibles, hidrotratamiento, hidrodeoxigenación, biogasoil.

Abstract

It is called «hydrotreating» the process comprising the exposure of a raw material to high temperature and high hydrogen pressure in presence of a convenient catalyst. Such process has gained interest in the field of the renewable energies because it can be used to convert biomasses from different origin into biofuels. Particularly, if an edible fat or oil is destined to this type of process a blend of paraffins and isoparaffins suitable for the substitution of fossil diesel fuels can be obtained. This type of liquid biofuels has been called «bio-gasoil» (or «greendiesel»), and is a renewable alternative to gasoil with a higher quality than traditional biodiesel.

In this work high oleic sunflower oil was processed in a batch reactor at 350 °C and 100 bar H₂, using three different catalyst: NiMo/Al₂O₃, PtO₂ and Pd/Al₂O₃. After 4 hs of reaction period yields of 89, 93 y 98 % (respectively) were achieved, determined as hydrocarbon concentration. Product composition suggests that conversion occurred through a complex mechanism involving hydrodeoxigenation, hydrodecarbonilation, hydrodecarboxilation and cracking.

Keywords: Biofuels, hydrotreating, hydrodeoxygenation, biogasoil.

Introducción

Es creciente a nivel mundial el interés por el desarrollo y el uso de fuentes más limpias y renovables de energía, motivado por varios factores como la variabilidad del precio del petróleo, la disminución de los recursos petrolíferos y la contaminación ambiental asociada a las emisiones de los combustibles fósiles y sus consecuencias, en particular en lo que refiere al calentamiento global. Las proyecciones sobre el crecimiento de la población y el constante aumento en la demanda de energía en el futuro establecen un escenario

muy comprometido, por lo cual resulta esencial encontrar alternativas a los combustibles fósiles capaces de satisfacer dicha demanda (Arun, et al., 2015).

Los triglicéridos, principal componente de las grasas y aceites comestibles de origen vegetal o animal, son una importante fuente renovable de energía y han sido utilizados con este fin de diferente manera, tanto sin modificar como convertidos químicamente a algún tipo de derivado (Huber, et al., 2006). El principal biocombustible derivado de las grasas y aceites comestibles es el biodiesel, producido mediante la transesterificación de un aceite vegetal o grasa animal con un

alcohol (usualmente metanol) en presencia de un catalizador químico (básico o ácido) para generar los ésteres metílicos de los ácidos grasos (FAME) y, como subproducto, glicerol.

Si bien la utilización del biodiesel como combustible en los motores de ignición por compresión ha sido una herramienta muy eficaz y conveniente para la sustitución de derivados de petróleo a nivel mundial, y tuvo, además, un impacto positivo sobre la matriz energética y productiva de Uruguay, presenta también varios inconvenientes. Estos se vinculan principalmente a la presencia de dobles enlaces en las cadenas hidrocarbonadas que lo constituyen, lo que le confiere a este material muy baja estabilidad oxidativa en comparación con el gasoil convencional. Además de limitar su vida útil y causar problemas en su almacenamiento, su baja estabilidad permite la generación de compuestos poliméricos que disminuyen su eficiencia como combustible, ocasionando depósitos en los filtros de combustible y en las boquillas de los inyectores de los motores (Kochetkova, et al., 2016).

Estos inconvenientes suelen ser contemplados en las normativas sobre calidad de biodiesel que establecen límites al grado de insaturación y, en consecuencia, al de las materias primas que pueden destinarse a la producción de este biocombustible (contenido de C18:3 < 12 %, contenido de poliinsaturados < 1 %, estabilidad oxidativa a 110 °C > 8 hs, Norma UNIT 1100:2014; Instituto Uruguayo de Normas Técnicas, 2014).

Adicionalmente, si se intenta mitigar estos fenómenos recurriendo a materias primas de alto grado de saturación (grasas animales, aceites de palmas tropicales, etcétera), de manera de mejorar la estabilidad oxidativa, el producto presentará elevadas temperaturas de fusión, con lo que se deterioran sus propiedades de flujo en frío.

Debido a esta problemática resulta conveniente buscar alternativas para transformar los triglicéridos a un biocombustible con diferente estructura química y propiedades mejoradas, más similares a las del diesel de petróleo (Kovacs, et al., 2011).

Una alternativa consiste en convertir los triglicéridos mediante el proceso conocido como «hidrotratamiento», que consiste en someter el aceite a alta temperatura y presión de H₂ en presencia de un catalizador adecuado (Vonotras y Papayannakos, 2014). Mediante este tipo de proceso es posible la remoción total del oxígeno de los triacilglicéridos para obtener una mezcla de parafinas e isoparafinas de punto de ebullición similar al del gasoil y propano como subproducto. A este otro tipo de biocombustible líquido se lo ha denominado «biogasoil» (o «greendiesel») (Hancsók, et al., 2007). Este biogasoil contiene una mezcla de alcanos lineales o ramificados y, si la hidrogenación de las cadenas hidrocarbonadas es completa, puede tener excelente estabilidad termo-oxidativa y alto número de cetano, entre otras ventajas (Kochetkova, et al., 2016).

La etapa más importante en la conversión catalítica de triacilglicéridos a biogasoil es la remoción del oxígeno, que sucede en forma consecutiva o simultánea a la hidrogenación de los dobles enlaces olefínicos. La remoción del oxígeno puede darse mediante tres tipos de reacciones: hidrodeoxigenación (HDO), decarbonilación (HDCn) o decarboxilación (HDCx), en orden decreciente de consumo de hidrógeno, esquematizadas en la Figura 1 para la conversión de trioleína. Las tres tienen en común que generan hidrocarburos y convierten al glicerol constituyente del triacilglicerol en propano, pero presentan características que las diferencian. La HDO es la única que mantiene el largo de cadena de los ácidos

grasos del material de partida, mientras que las otras dos lo reducen en una unidad, convirtiendo al carbono carboxílico en CO o CO₂ (Kovacs, et al., 2011). La HDO consume 15 moles de hidrógeno por mol de trioleína, tres de los cuales son consumidos por la saturación de los tres moles de ácido oleico y 12 en la deoxigenación de los tres enlaces éster, a la vez que genera seis moles de agua. Luego la HDCn consume menos hidrógeno que la anterior, produce menos agua y se caracteriza por generar CO, mientras que la HDCx es la que consume menos hidrógeno y se caracteriza por la generación de CO₂ y por no generar agua.

Si bien la HDO es la que permite un mayor rendimiento másico en hidrocarburos y, por lo tanto, una conversión más eficiente del material de partida, es la que requerirá la aplicación de una mayor presión de H₂ y un suministro eficiente del mismo a la superficie del catalizador (Hancsók, et al., 2013).

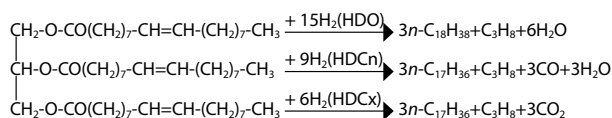


Figura 1. Esquema de las tres principales reacciones que pueden tener lugar en la conversión de un triglicérido (trioleína) en biogasoil mediante hidrotratamiento: hidrodeoxigenación (HDO), hidrodecarbonilación (HDCn), hidrodecarboxilación (HDCx).

Si bien las reacciones de la Figura 1 son las tres principales que ocurren durante el hidrotratamiento y contribuyen en la conversión de los triacilglicéridos a biogasoil, también pueden ocurrir otro tipo de fenómenos dadas las drásticas condiciones de reacción. La generación de agua en el medio de reacción puede promover reacciones de hidrólisis, dando lugar a la aparición de ácidos grasos libres, diacilglicéridos y monoacilglicéridos. Además, la alta temperatura y presión pueden desencadenar fenómenos de cracking que generan una gran diversidad de compuestos con largos de cadena inferiores a los del material de partida. Tampoco pueden descartarse en menor grado fenómenos de elongación, aromatización o ciclación, que pueden convertir el producto en una mezcla muy compleja de caracterizar. Finalmente, deben considerarse los fenómenos de isomerización que convierten las n-parafinas en iso-parafinas y que generalmente suelen promoverse porque la presencia de estas en el producto mejora notablemente sus propiedades en frío (Guo, et al., 2013).

El grado en el que se presenta cada fenómeno o mecanismo de conversión depende de las condiciones del proceso: temperatura, presión, características del reactor y naturaleza del catalizador; es posible favorecer un tipo determinado de proceso si se seleccionan convenientemente los parámetros operativos a utilizar (Arun, et al., 2015).

A diferencia de los ésteres metílicos de ácidos grasos, el biogasoil es un combustible libre de oxígeno capaz de superar los inconvenientes que presenta el biodiesel, lo que convierte al «hidrotratamiento» de triacilglicéridos en una alternativa muy atractiva (Kalnes, et al., 2007).

Además, el glicerol se convierte en propano, por lo que se evita la formación de la glicerina de baja calidad que se obtiene como subproducto del proceso de transesterificación propio del biodiesel, cuyo destino final suele ser un problema (Tsuji, et al., 2014).

En este trabajo se estudió el desempeño de tres catalizadores, dos derivados de metales nobles (PtO_2 y $\text{Pd/Al}_2\text{O}_3$) y uno comercial previamente sulfurado ($\text{S-NiMo/Al}_2\text{O}_3$), en el proceso de hidrotratamiento de aceite de girasol de alto oleico.

Materiales y métodos

Se utilizó como materia prima aceite de girasol alto oleico (HOSFO) disponible en el mercado local (COUSA S.A., Montevideo, Uruguay). El catalizador $\text{NiMo/Al}_2\text{O}_3$ fue suministrado por una empresa local, el H_2 (pureza = 99.999 %) se adquirió a Air Liquide Uruguay S.A. y los catalizadores PtO_2 (área superficial específica > 60 m^2/g) y $\text{Pd/Al}_2\text{O}_3$, así como los reactivos y solventes se adquirieron a Sigma-Aldrich (USA).

La sulfuración del catalizador $\text{NiMo/Al}_2\text{O}_3$ se realizó mediante el tratamiento en un reactor tubular sometido a un flujo continuo de hidrógeno y aumentando la temperatura gradualmente en etapas. Alcanzados los 180 °C, se comenzó a dosificar disulfuro de dimetilo (DMDS) como agente sulfurante y se continuó aumentando la temperatura hasta los 350 °C.

Todas las reacciones se realizaron en batch en un reactor Parr 4570 HP/HT de 250 mL (Figura 2), a 350 °C y 100 Bar de H_2 , mediante la carga del reactor con 100 g de HOSFO sobre el que se agregó el catalizador en diferentes porcentajes según el caso (de 0,5 a 5,0 % en base a la masa de aceite).

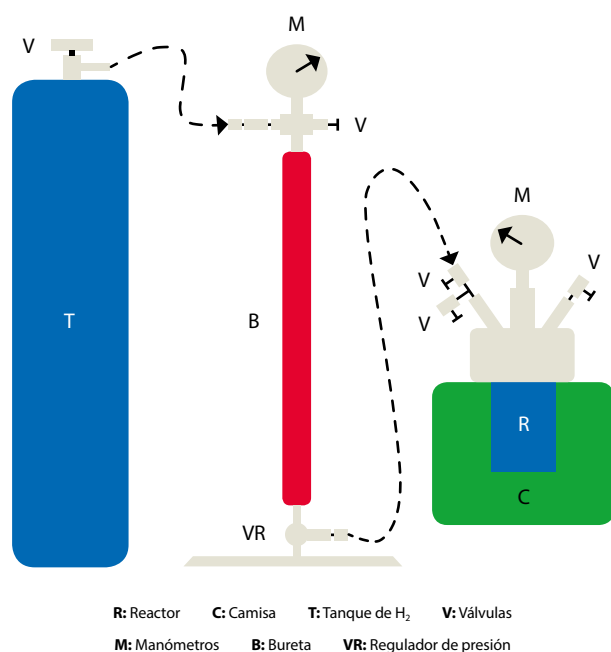


Figura 2. Esquema del equipamiento utilizado para las reacciones de hidrotratamiento.

Posteriormente el reactor se cerró, se purgó con H_2 , se presurizó hasta la mitad de la presión de trabajo, se activó el agitador (1700 rpm) y se comenzó a suministrar potencia eléctrica a la camisa calefactora. Una vez alcanzada la temperatura de operación (350 °C), se ajustó la presión del sistema a la presión de trabajo (100 Bar). La reacción se prolongó por períodos de 4 hs, durante los cuales se realizaron purgas regulares de gas desde el cabezal del reactor. Para la

realización de cada purga se cerró la válvula de ingreso de H_2 al reactor, de inmediato se abrió lentamente la válvula de purga permitiendo la salida de gas hasta que la presión descendió a 80 Bar, momento en el que se cerró esta válvula y se volvió a abrir la válvula de entrada, con lo cual el regulador de presión automáticamente permitió el ingreso de H_2 «fresco» al sistema hasta recuperar los 100 Bar de trabajo. Toda la operación, que insumió menos de 15 s, se repitió a intervalos de tiempo convenientes (cada 5 min durante la primera hora de reacción y luego cada 10 min), promediando una velocidad espacial de gas por hora (GHSV) comprendida entre 28 y 56 h^{-1} , respectivamente. Alternativamente, se realizaron corridas sin purga para comprobar el efecto de esta operación sobre la eficiencia del proceso.

Se realizaron tomas periódicas de muestras de la mezcla reaccionante durante el período de reacción y a su final; luego de silanizadas (MSTFA/Py) fueron analizadas por duplicado por cromatografía gaseosa en un equipo Shimadzu GC2010, equipado con inyector on-column y columna capilar OPTIMA-1TG (10m x 0,1 μm x 0,32 mm).

Resultados y discusión

Efecto de las purgas sobre la eficiencia del proceso

El Gráfico 1 muestra la concentración de los tres principales compuestos constituyentes de la mezcla de reacción cuando el HOSFO se procesó en tres etapas consecutivas de 2 hs de duración, cada una en presencia de 1 % de PtO_2 como catalizador, realizadas bajo diferentes regímenes de purgas. Estos compuestos son: los glicéridos totales (Gli), que incluye la suma de mono-, di- y triacilgliceroleros sin convertir, los hidrocarburos (HC) y los ácidos grasos libres (FFA).

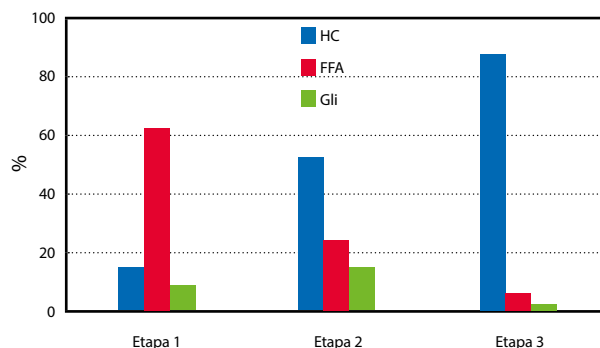


Gráfico 1. Composición de los productos obtenidos del hidrotratamiento del HOSFO a 350 °C y 100 Bar de H_2 con 1 % de PtO_2 como catalizador en tres etapas de 2 hs de duración cada una (la primera sin purgas de gas). HC (hidrocarburos), FFA (ácidos grasos libres), Gli (glicéridos).

Se observa que en la primera etapa, sin purgas de gas del sistema, se alcanzó una conversión a hidrocarburos (HC) de tan solo 15 % y se obtuvo un producto constituido mayoritariamente por ácidos grasos libres (FFA = 63,8 %) y, en menor proporción, por glicéridos (Gli) sin convertir (mono + di + triacilgliceroleros = 9,1 %). Sin embargo, cuando este producto

(con el catalizador usado en la etapa anterior) fue vuelto a procesar por 2 hs adicionales, pero realizando purgas regulares de gas desde el cabezal del reactor, la proporción de hidrocarburos se incrementó a 51 % y la de FFA disminuyó a 24 %. Finalmente, luego de la tercera etapa de proceso en idénticas condiciones, la proporción de hidrocarburos se incrementó aún más, alcanzando el 87 %, con la correspondiente disminución de los FFA a tan solo un 3 %. Estos resultados muestran que el proceso puede producir hidrocarburos eficientemente en este sistema batch en presencia de un catalizador muy activo como el PtO_2 , pero que para que esto sea posible es determinante la realización de purgas regulares de gas desde el cabezal del reactor.

Este efecto favorable de las purgas sobre el grado de conversión se puede explicar porque permiten retirar del reactor los posibles productos gaseosos generados por el proceso (H_2O , CO_2 , CO y C_3H_8) y sustituirlos con H_2 manteniendo elevada su presión parcial durante el periodo de reacción, favoreciendo por ambos efectos el desplazamiento de la reacción en el sentido de los productos.

La aplicabilidad de un catalizador que contiene un metal noble es muy limitada dado su elevado costo, motivo por el cual este trabajo se focalizó en estudiar la eficacia de un catalizador comercial de relativo bajo costo aplicado a este proceso.

Composición del sistema durante el período de reacción

El Gráfico 2 muestra la evolución durante el período de reacción de la concentración de los tres principales tipos de compuestos que participan del proceso para cada uno de los catalizadores utilizados.

En el caso de la reacción catalizada con PtO_2 (Gráfico 2a) se observa un descenso significativo de la concentración de glicéridos totales transcurridos los primeros 30 min de reacción, pasando del 100 % inicial a solo un 11,0 %. Este descenso se acompaña de la aparición de una cantidad importante de FFA, que alcanza el 63,0 %, y de una cantidad incipiente de HC (7,0 %). La elevada concentración de FFA a los 30 min de reacción resulta coherente con el rápido consumo inicial de glicéridos, lo que sugiere su rápida hidrólisis inicial. Esto es promovido posiblemente por la ocurrencia de procesos como la HDO y la HDCn, caracterizados por generar agua en el medio de reacción, necesaria para esta hidrólisis. Luego de este cambio drástico se observa que en las siguientes 3,5 hs de reacción se da la progresiva disminución de los FFA y el aumento de los HC, que continúan aumentando hasta constituir casi la totalidad del producto (93,4 %) al final del período de reacción.

En el caso de la reacción catalizada por otro catalizador constituido por un metal noble, el $\text{Pd}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (Gráfico 2b), se observa que la mezcla de reacción experimentó una evolución en su composición muy similar al caso anterior: rápido descenso de glicéridos, aumento inicial y posterior descenso de FFA e incremento gradual de HC. Sin embargo, se observan algunas diferencias que resultan llamativas y deben analizarse. En primer lugar, la pendiente al inicio de la curva de HC es muy superior en este caso, lo que indica una mayor velocidad inicial de generación de HC, cuya concentración alcanza al 48,6 % luego de media hora de reacción. Esta rápida generación de HC es posible a expensas de una más lenta generación de FFA, que alcanzan una concentración de solo 31,9 % a los 30 min de reacción (frente a 63,0 % en el caso anterior). La

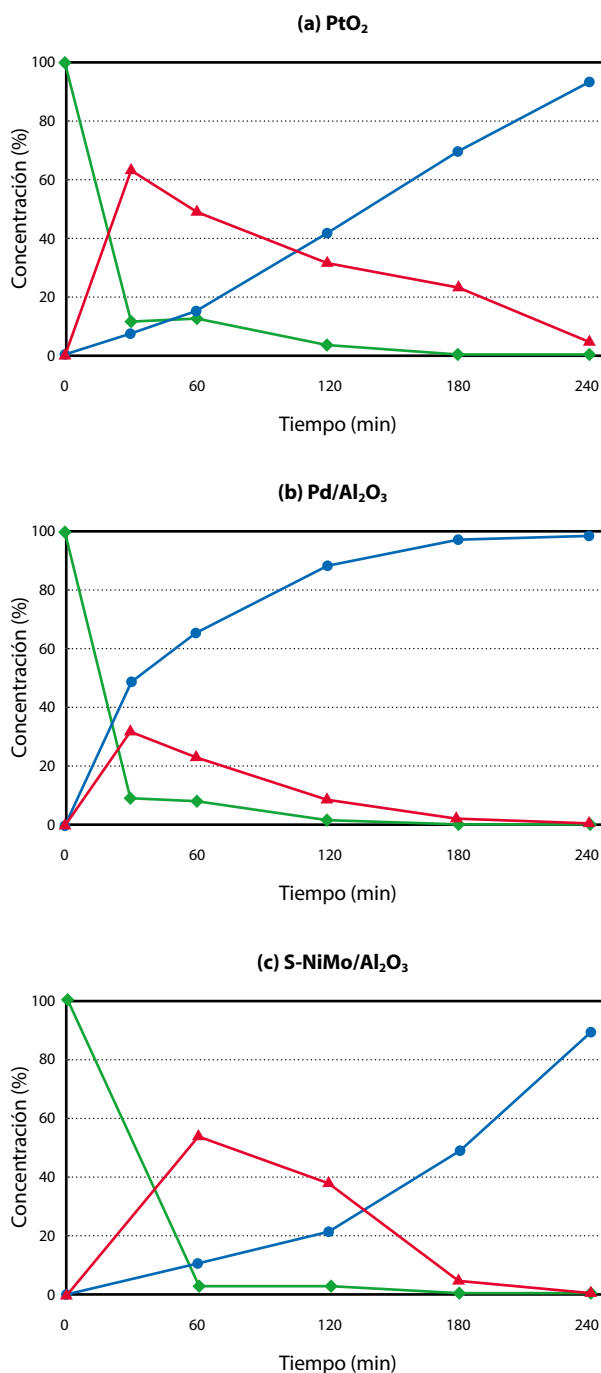


Gráfico 2. Variación de la concentración de glicéridos totales (♦), ácidos grasos libres (▲) e hidrocarburos (●) durante el hidrotratamiento de HOSFO a 350 °C y 100 Bar de H_2 catalizado por PtO_2 (a), $\text{Pd}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (b) y $\text{S-NiMo}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (c).

significativamente más lenta generación de FFA cuando la reacción se catalizó con $\text{Pd}/\text{Al}_2\text{O}_3$ frente a la verificada en la catálisis con PtO_2 sugiere diferencias importantes en el mecanismo de reacción. Como se mencionó anteriormente, la velocidad de generación de FFA depende de la eficiencia con que se genera el agua necesaria en el medio de reacción para que ocurra la hidrólisis de los glicéridos. Dado que las tres principales reacciones características del hidrotratamiento –HDO, HDCn e HDCx– generan diferente cantidad de agua

(6, 3 o 0 mol de agua por mol de triacilglicerol convertido, respectivamente), la menor generación de FFA en el caso del Pd/Al₂O₃ indicaría una menor prevalencia de los dos primeros procesos en este caso. La concentración de HC prácticamente alcanza su máximo a las 3,5 hs de reacción (96,8%), con un leve incremento a las 4 hs finales (98,0%).

Finalmente, en el caso de la catálisis con S-NiMo/Al₂O₃ (Gráfico 2c) la composición de la mezcla de reacción evoluciona siguiendo un patrón muy próximo al correspondiente a la catálisis con PtO₂: ambas muestran un nivel de FFA en el entorno del 50% luego de una hora de reacción y una velocidad inicial de generación de HC también similar. La concentración de HC alcanzada a las 4 hs de reacción con S-NiMo/Al₂O₃ fue de 89,4% y la alcanzada al mismo tiempo con PtO₂ fue de 93,4%. Si bien ambas fueron inferiores a la concentración de HC obtenida con Pd/Al₂O₃, en los dos casos luego de 4 hs de reacción la concentración aumenta con una elevada pendiente, por lo que puede suponerse que con un leve incremento en el período de reacción se hubiera alcanzado un producto constituido prácticamente en su totalidad por HC.

Composición de la fracción de hidrocarburos

El análisis por cromatografía gaseosa de la mezcla de reacción, además de aportar información sobre los tipos de compuestos que la constituyen (Gráfico 2), permite separar por número de carbono y cuantificar los diferentes componentes de la fracción de hidrocarburos.

El perfil de la fracción de hidrocarburos resulta interesante porque a partir de esta información se pueden determinar algunos parámetros para estimar el grado de participación en la conversión del HOSFO de los diferentes tipos de procesos que pueden ocurrir durante el hidrotratamiento. En efecto, como se mencionó anteriormente, si se considera que el HOSFO está constituido casi exclusivamente por ácidos grasos de 18 y 16 carbonos (96 y 4%, respectivamente), la presencia de los hidrocarburos C18 y C16 en el producto es indicativa de la ocurrencia de HDO. En cambio, la presencia de hidrocarburos C17 y C15 lo es para las reacciones de HDCn e HDCx, con la correspondiente pérdida de un carbono (Figura 1). Luego, la presencia de hidrocarburos más cortos, que no pueden

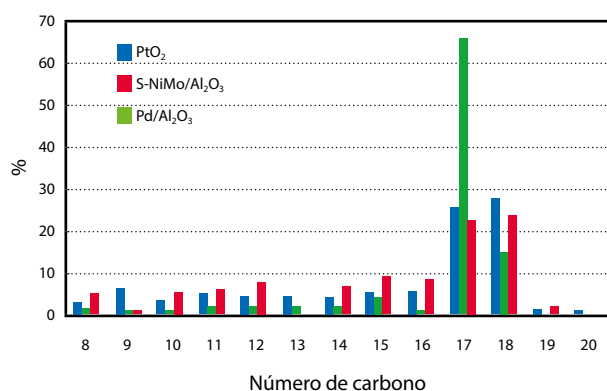


Gráfico 3. Composición de la fracción de hidrocarburos de largo de cadena de C8 a C20 de los productos finales obtenidos luego de 4 hs de hidrotratamiento del HOSFO, catalizado por PtO₂, Pd/Al₂O₃ y NiMo/Al₂O₃, a 350 °C y 100 bar de H₂.

explicarse por ninguno de los procesos anteriores, evidencia la ocurrencia de fenómenos de cracking capaces de generar productos de largo de cadena inferiores a C15.

El Gráfico 3 muestra la composición de la fracción de hidrocarburos en los productos finales obtenidos con cada catalizador luego de 4 hs de hidrotratamiento del HOSFO comprendiendo el rango de largos de cadena de C8 a C20. Se observa que la población de la fracción de hidrocarburos contiene una gran diversidad de largos de cadena, incluidos largos inferiores a C15 que demuestran la ocurrencia de cracking en alguna medida.

Sin embargo, en todos los casos los hidrocarburos C18 y C17 son los principales componentes de dicha fracción, lo que indica que tanto la HDO como la suma (HDCn+HDCx) fueron los procesos más favorecidos. La extraordinariamente alta concentración de C17 en el proceso catalizado por Pd/Al₂O₃ indica que la HDO se vio desfavorecida en este caso frente a la suma de los otros dos procesos. También con este catalizador los fenómenos de cracking fueron menos importantes, ya que generó el producto con el menor contenido de hidrocarburos cortos (< C15).

Además, se verificó la formación de alcanos de cadena más larga que las propias del material de partida (C19 y C20), lo que demuestra que se produjeron procesos de elongación de la cadena que podrían responder a la ocurrencia de procesos de síntesis de tipo Fischer-Tropsch (Studentschnig, et al., 2013).

Grado de participación de cada tipo de reacción en el proceso

El análisis de las muestras recogidas a diferente período de reacción permite determinar la variación en el perfil de la fracción de HC a lo largo del tiempo y estudiar cómo varió el grado de participación de cada reacción en el proceso global. Para esto resulta conveniente definir algunos parámetros que permitan realizar algunas estimaciones numéricas.

Si se considera que el contenido de hidrocarburos con el mismo largo de cadena que los ácidos grasos del material de partida (C16 y C18) es indicativo de la ocurrencia de HDO, el grado de participación de esta reacción en la conversión de los TAG (o FFA) a parafinas se puede estimar por la Ecuación 1:

$$\% HDO = 100 \frac{HC_{18} + HC_{16}}{(HC_{18} + HC_{16}) + (HC_{17} + HC_{15})} \quad [Ec. 1]$$

donde % HDO es el porcentaje de participación de la HDO en el proceso «total» de conversión del sustrato a parafinas y HC_i es el porcentaje del hidrocarburo de largo de cadena «i» en el producto.

De forma análoga, el porcentaje que representan las dos reacciones que se caracterizan por disminuir en un átomo de carbono el largo de las cadenas de los ácidos grasos de partida (HDCn + HDCx) se puede estimar a partir del contenido de hidrocarburos C15 y/o C17:

$$\% (HDCn + HDCx) = 100 \frac{HC_{17} + HC_{15}}{(HC_{18} + HC_{16}) + (HC_{17} + HC_{15})} \quad [Ec. 2]$$

o, lo que es lo mismo:

$$\% (HDCn + HDCx) = 100 - \%HDO \quad [Ec. 3]$$

Luego, dado que la existencia en el producto de hidrocarburos inferiores a C15 indica la ocurrencia de fenómenos de cracking, el porcentaje de cracking se puede estimar por el porcentaje de estos hidrocarburos en el total de este grupo de compuestos:

$$\% \text{Cracking} = 100 \frac{\sum_{i=8}^{i=14} HC_i}{\sum_{j=8}^{j=18} HC_j}$$

[Ec. 4]

El Gráfico 4 recoge los resultados obtenidos mediante la aplicación de las Ecuaciones 1, 2 (o 3) y 4 a las muestras obtenidas a diferente período de reacción durante el hidrotratamiento del HOSFO con cada tipo de catalizador.

En el caso de la catálisis con PtO₂ se observa que la HDO mantuvo un nivel de participación algo variable durante todo el proceso (Gráfico 4a), pero siempre por encima del 50 %. En este caso la ocurrencia de cracking fue mínima hasta los 120 min y comenzó a incrementarse a partir de ese tiempo.

En cambio, en la reacción catalizada con Pd/Al₂O₃ mostró un comportamiento muy diferente, con la suma (HDCn + HDCx), alcanzando un elevado porcentaje durante todo el período de reacción (Gráfico 4b), con niveles de participación de entre 90 y 80 %. Esto resulta coherente con el muy alto contenido de C17 en el producto final (Gráfico 3). Este comportamiento particular puede explicarse por la muy alta actividad de este catalizador, tal como lo indica la rápida aparición de HC al inicio del proceso (Gráfico 2b), ya que un catalizador muy activo puede conducir a una concentración de H₂ muy baja en su superficie, lo que repercutiría negativamente en la HDO, reacción que requiere mayor suministro de H₂.

Estos resultados también coinciden con trabajos previos que reportan una alta actividad para los catalizadores de paladio, tanto para la decarboxilación como para la decarbonilación de ácidos grasos (Immer y Lamb, 2010; Sari, et al., 2013).

Finalmente, el proceso catalizado con S-NiMo/Al₂O₃ transcurrió durante todo el período de reacción con un nivel de participación de HDO e (HDCn + HDCx) muy similar, próximo al 50 % (Gráfico 4c). El porcentaje de HC craqueado en este caso fue el mayor: 34 % de la fracción de hidrocarburos al final del período de reacción.

Estos resultados muestran diferencias significativas en la evolución del proceso con el tipo de catalizador y, en consecuencia, en la composición y propiedades de los productos. Asimismo, es claro que existe un compromiso entre grado de conversión a HC y la ocurrencia de cracking, ya que si bien un período no menor a 4 hs parece necesario para completar la conversión, en todos los casos la acumulación de producto craqueado comenzó a ser notoria a partir de las 2 hs de reacción.

Conclusiones

Los resultados obtenidos demostraron que el sistema diseñado y las condiciones de reacción elegidas fueron las adecuadas para alcanzar una conversión prácticamente completa del aceite de girasol de alto oleico a biogasoil en 4 hs. Asimismo, quedó demostrada la importancia de la realización de purgas de gas del sistema reaccionante durante todo el período de reacción, a los efectos de favorecer el rendimiento en hidrocarburos.

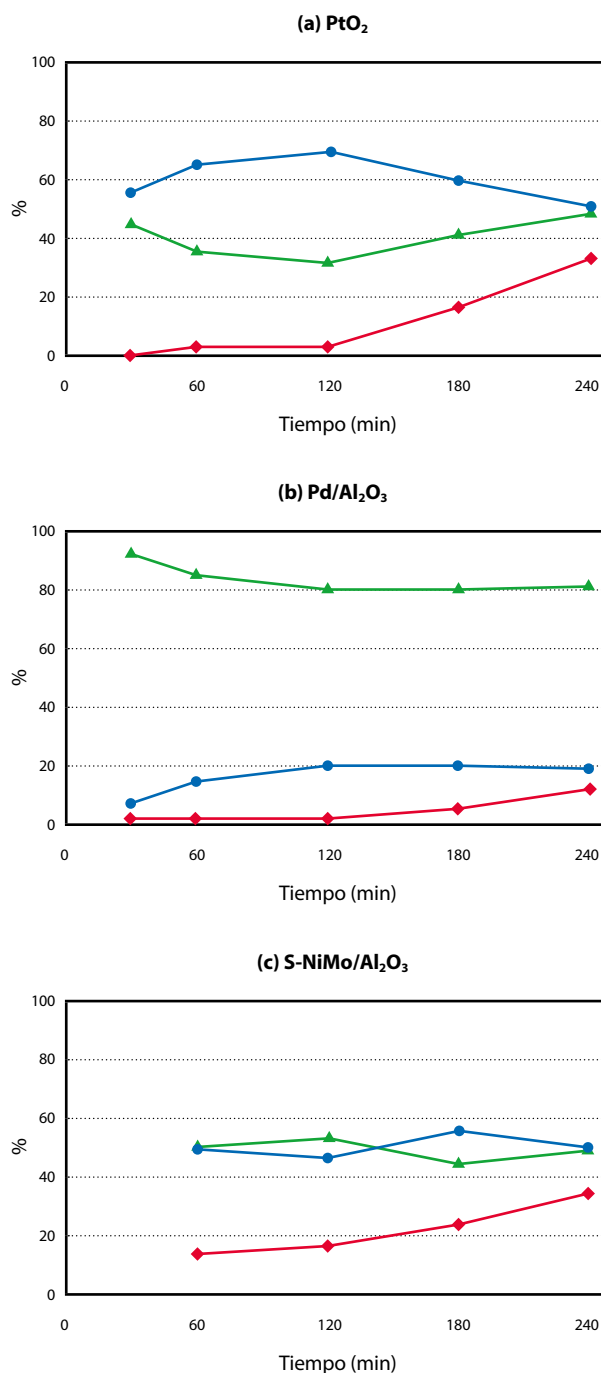


Gráfico 4. Participación de los mecanismos de HDO (●), HDCn + HDCx (▲) y cracking (◆) en el hidrotratamiento de HOSFO a 350 °C y 100 bar de H₂ catalizado por PtO₂ (a), Pd/Al₂O₃ (b) y S-NiMo/Al₂O₃ (c).

El perfil de hidrocarburos obtenido con todos los catalizadores mostró que en el hidrotratamiento participaron principalmente procesos de HDO, (HDCn + HDCx) y cracking, en diferente extensión según el caso.

El catalizador Pd/Al₂O₃, a diferencia de los otros dos, favoreció la ocurrencia de (HDCn + HDCx) y minimizó los fenómenos de cracking, permitiendo alcanzar un producto muy enriquecido en C17.

Los resultados obtenidos con el catalizador comercial S-NiMo/Al₂O₃ demuestran que puede resultar tan eficiente como

los catalizadores nobles en la catálisis del proceso de interés, lo que resulta muy atractivo dado su costo sensiblemente inferior.

Si bien en principio el producto obtenido puede ser utilizado como sustituto del gasoil convencional sin ningún proceso extra de purificación, los fenómenos de cracking deberán ser minimizados. Si esto no se logra, el producto se enriquece en hidrocarburos de cadena corta que corresponden a fracciones más livianas que las características de un combustible diesel (de C13 a C20). En este caso el producto debe ser fraccionado mediante un proceso de destilación antes de poder ser usado como combustible diesel, lo que obviamente elevaría su costo.

Reconocimientos

Los autores agradecen al Ing. Quím. Oscar Sánchez y al Ing. Quím. Sebastián Focaccio (ANCAP) por su colaboración con este trabajo, a la Agencia Nacional de Investigación e Innovación (ANII) por el apoyo financiero recibido para la ejecución del proyecto y por la beca de posgrado usufructuada por E. Volonterio y al Programa de Desarrollo de las Ciencias Básicas (PEDECIBA) por el apoyo financiero.

Referencias

- Arun, N., Sharma, R., Dalai, A., 2015. Green diesel synthesis by hydrodeoxygenation of bio-based feedstocks: Strategies for catalyst design and development. En: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 48, pp.240-255.
- Guo, L., Fan, Y., Bao, X., Shi, G. y Liu, H., 2013. Two-stage surfactant-assisted crystallization for enhancing SAPO-11 acidity to improve n-octane di-branched isomerization. En: *Journal of Catalysis*, 301, pp.162-173.
- Huber, G.H., Iborra, S. y Corma, A., 2006. Synthesis of transportation fuels from biomass: chemistry, catalysts, and engineering. En: *Chemical Reviews*, 106, pp.4044-4098.
- Hancsók, J., Eller, Z., Polczmann, G. y Varga, Z., 2013. Sustainable production of bioparaffins. En: *Chemical Engineering Transactions*, 35, pp.1027-1032.
- Hancsók, J., Krar, M., Magyar, S., Boda, L., Hollo, A. y Kallo, D., 2007. Investigation of the production of high cetane number bio gas oil from pre-hydrogenated vegetable oils over Pt/HZSM-22/Al₂O₃. En: *Microporous and Mesoporous Materials*, 101, pp.148-152.
- Immer, J.G. y Lamb, H.H., 2010. Fed-batch catalytic deoxygenation of free fatty acids. En: *Energy & Fuels*, 24, pp.5291-5299.
- Instituto Uruguayo de Normas Técnicas, 2014. UNIT 1100:2014: Biodiesel (b100). *Combustible para uso puro o en mezcla con destilados medios de petróleo - requisitos*. Montevideo: UNIT.
- Kalnes, T., Marker, T. y Shonnard, D.R., 2007. Green diesel: A second generation biofuel. En: *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, 5, pp.A48.
- Kochetkova, D., Blazek, J., Simacek, P., Stas, M. y Beno, Z., 2016. Influence of rapeseed oil hydrotreating on hydrogenation activity of CoMo catalyst. En: *Fuel Processing Technology*, 142, pp.319-325.
- Kovacs, S., Kasza, T., Thernes, A., Walhne Horvath, I. y Hancsók, J., 2011. Fuel production by hydrotreating of triglycerides on NiMo/Al₂O₃/F catalyst. En: *Chemical Engineering Journal*, 176-177, pp.237-243.
- Sari, E., Kimb, M., Salley, S. y Simon, K., 2013. A highly active nanocomposite silica-carbon supported palladium catalyst for decarboxylation of free fatty acids for green diesel production: correlation of activity and catalyst properties. En: *Applied Catalysis A: General*, 467, pp.261-269.
- Studentschnig, A., Schober, S. y Mittelbach, M., 2013. Conversion of crude palm oil into hydrocarbons over commercial raney nickel. En: *Energy & Fuels*, 27, pp.7480-7484.
- Tsuji, T., Ohya, K., Hoshina, T., Hiaki, T., Maeda, K., Kuramochi, H. y Osako, M., 2014. Hydrogen solubility in triolein, and propane solubility in oleic acid for second generation BDF synthesis by use of hydrodeoxygenation reaction. En: *Fluid Phase Equilibria*, 362, pp.383-388.
- Vonortas, A. y Papayannakos, N., 2014. Comparative analysis of biodiesel versus green diesel. En: *WIREs Energy and Environment*, 3, pp.3-23.

Caracterización de pigmentos extraídos de algas rojas de la Antártida para su posible uso en celdas solares del tipo DSSC

Characterization of dyes extracted from Antarctic red algae for their use in DSSC

De Bon, Micaela (1); Hurtado, Joaquín (1); Enciso, Paula (1); Armeli Minicante, Simona (2); Cerdá, María Fernanda (1)
(1) Laboratorio de Biomateriales, Facultad de Ciencias, Universidad de la República, UdelaR, Montevideo, Uruguay.
(2) Istituto di Scienze Marine (ISMAR-CNR), Consiglio Nazionale delle Ricerche, Venezia, Italia.

Contacto: fcerda@fcien.edu.uy

RECIBIDO: 5/9/2017 – APROBADO: 15/11/2017

Resumen

En este trabajo se realizó la extracción en medio acuoso de ficoeritrina proveniente de algas rojas de la Isla Rey Jorge. Las especies que mostraron mejores rendimientos de extracción fueron *Palmaria decipiens* y *Delesseria lancifolia*. Esta ficoeritrina mostró un comportamiento adecuado para su uso como sensibilizador en celdas de tipo DSSC (dye sensitized solar cells), con altos valores de absorbancia, buena estabilidad con la temperatura y adecuado potencial redox.

Palabras clave: Ficoeritrina, algas rojas, DSSC.

Abstract

In this work, the extraction of phycoerythrin of red algae from King George's Island was performed in aqueous media. Among analyzed, best extraction yields were obtained from *Palmaria decipiens* and *Delesseria lancifolia*. This phycoerythrin showed adequate characteristics to be used as sensitizer in DSSC (dye sensitized solar cells) with high absorbance values, good stability towards temperature and a satisfactory redox potential value.

Keywords: Phycoerythrin, red algae, DSSC.

Introducción

Las energías renovables son energías limpias que han cobrado gran relevancia en los últimos años y que hoy son un foco importante de investigación y desarrollo. Entre ellas, la energía solar es una fuente de energía muy promisoría que, además, no genera desechos o contaminantes. La producción de energía fotovoltaica se ha duplicado cada dos años desde 2002 y hoy es el sector energético que más rápidamente crece (Gao, et al., 2008; Cao, et al., 2009). Las celdas DSSC (*dye-sensitized solar cell*), o celdas de Grätzel, son una alternativa interesante frente a las celdas de silicio, debido a que permiten reducir costos de fabricación y obtener una eficiencia considerable (Enciso, et al., 2016; Enciso, et al., 2017). Estas celdas, sensibilizadas por colorantes, producen electricidad mediante un principio fotoelectroquímico, convirtiendo la energía lumínica en energía eléctrica.

Mucho se ha avanzado en el armado de las celdas de Grätzel desde su creación en la década de 1970 a la fecha; desde las primeras, de soporte líquido armadas usando clorofila como sensibilizador, hasta las actuales, sólidas y armadas con pigmentos sintetizados para optimizar su eficiencia, se ha logrado emparejar y superar el rendimiento de las más

antiguas pero más difundidas celdas tradicionales de silicio (Bisquert, et al., 2004).

Con el fin de aumentar la eficiencia de conversión energética, cuatro factores han sido estudiados en profundidad: el material semiconductor, el pigmento, la mezcla electrolito soporte/cupla redox (a esto se agregó en los últimos años el cambio del armado de las celdas con los electrolitos líquidos por el uso de materiales sólidos) y el material del contraelectrodo. Estos factores tienen suma relevancia en el armado de la celda, ya que su combinación incide en la posibilidad de llevar los valores de eficiencia de conversión energética al 14,7% reportado en 2015 en Japón (Kakiage, et al., 2015).

De los cuatro factores mencionados, el sensibilizador a usar es el que ha sido más estudiado y es el punto sobre el cual existe una mayor variedad en la literatura, ya que el pigmento permite explorar una mayor cantidad de posibilidades. La exploración exhaustiva de los pigmentos extraídos de productos naturales, y el diseño y fabricación de otros nuevos son las alternativas que pueden seguirse (Armeli Minicante, et al., 2015; Armeli Minicante, et al., 2016).

En estudios previos hemos evaluado el comportamiento de la ficocianina proveniente del alga *Spirulina* spp. y las antocianinas extraídas de la flor del ceibo (Enciso, et al.,

2017; Enciso, et al., 2016; Cerdá, et al., 2014; Enciso, et al., 2013; Enciso, et al., 2012), así como el uso de la mezcla de ficoeritrina y carotenos extraídos de algas rojas recolectadas en suelo Antártico (Enciso y Cerdá, 2016). En todos los casos hemos probado la eficacia del uso de esos pigmentos como sensibilizadores y obtenido distintos valores de eficiencia en celdas armadas con ellos.

La exploración del uso de pigmentos disponibles en la naturaleza posee un gran atractivo económico. Si bien tienen una eficiencia mucho menor a la máxima reportada para estas celdas, su disponibilidad y sencilla obtención los hace interesantes para países que, como Uruguay, buscan renovar su matriz energética sin disponer de grandes inversiones para lograr ese fin. De acuerdo a lo reportado en la bibliografía, con pigmentos naturales se ha logrado alcanzar excepcionalmente rendimientos del 3% (donde el grueso de los compuestos evaluados no alcanza al 1%), con costos de obtención muy bajos y con una buena estabilidad (Prabavathy, et al., 2017; Bhogaita, et al., 2016). Una celda basada en el uso de pigmentos naturales tiene un costo aproximadamente 1000 veces menor que las basadas en pigmentos sintéticos, donde el gasto asociado a la obtención de los colorantes naturales es prácticamente despreciable.

El objetivo principal de este trabajo es la extracción y caracterización del pigmento responsable del color rojo en algas provenientes de la Antártida. Este pigmento, la ficoeritrina, integrante de la familia de ficobiliproteínas, tiene características que lo hacen un buen candidato para ser usado en celdas DSSC (Isailovic, et al., 2004). De acuerdo a estudios previos existentes en la literatura, la ficoeritrina tiene una excelente capacidad de absorber la luz en la región visible del espectro, sumado a un potencial redox adecuado para ser usada como sensibilizador en celdas DSSC y una estructura química que permite su «anclaje» al semiconductor del fotoelectrodo (Ficner, 1993; Munier, et al., 2014). Sin embargo, los extractos obtenidos usando etanol a partir de algas como *Plocamium hookeri*, *Delesseria lancifolia* e *Iridaea obovata* han mostrado una alta concentración de clorofila respecto a la ficoeritrina, y redundaron en una muy baja eficiencia de conversión energética (0,03% promedio) (Enciso y Cerdá, 2016).

Las ficobiliproteínas actúan como pigmentos accesorios para la fotosíntesis en algas marinas de las Rhodophyceae, Cyanophyceae, Cryptophyceae y algunas Pirrophycea (Glazer, et al., 1982). Se encuentran organizadas en estructuras celulares, llamadas ficobilisomas, que están unidas en conjuntos regulares a la superficie exterior de los tilacoides. Las ficoeritrinas son solubles en agua y están compuestas de subunidades α , β y γ , cada una de las cuales consiste de una apoproteína y uno o más tipos de grupos prostéticos tetrapirrólicos de cadena abierta unidos mediante enlaces covalentes a los residuos específicos de cisteína de las apoproteínas. Estos son los cromóforos. Las subunidades α , β y γ son muy disímiles, de 17 kDa, 19 kDa y 30 kDa, respectivamente (Isailovic, et al., 2004).

Los cromóforos dan un color característico a cada ficobiliproteína: rojo a la ficoeritrina, azul brillante a la ficocianina y verde azulado a la aloficocianina.

En este trabajo se buscó realizar una mejor caracterización de la ficoeritrina proveniente de algas rojas de la Antártida, usando un extracto purificado para tal finalidad. Los extractos fueron obtenidos a partir de *Palmaria decipiens* y *Delesseria lancifolia*. Los estudios se centraron en aquellas características que las hacen utilizables como sensibilizadores del fotoelectrodo en celdas DSSC.

Materiales y métodos

Las algas fueron recolectadas en la Isla Rey Jorge durante enero de 2017. En la Base Científica Antártica Artigas fueron lavadas con agua Milli Rho y secadas bajo corriente de aire caliente, y acondicionadas para su traslado a nuestro laboratorio en Montevideo, donde se conservaron en freezer.

Para los trabajos de extracción, 1 g de muestra fue trozado y colocado en un mortero con 25 mL de agua Milli Q (18,2 M Ω). Posteriormente la muestra fue centrifugada.

La purificación de la ficoeritrina se realizó con columna Sephadex G-25, usando agua como solvente de elución.

El proceso de purificación fue controlado por espectrofotometría visible y cromatografía en capa delgada (TLC), usando placas de sílica gel sobre aluminio (SIGMA ALDRICH) y la mezcla butanol/acético (9/1) como fase móvil.

La estabilidad con la temperatura fue evaluada en el rango 30 a 85 °C, siguiendo el comportamiento del espectro visible de la muestra.

Luego se siguió la estabilidad en el tiempo, trabajando a temperaturas constantes (0, 40, 50 y 70 °C).

La caracterización redox se llevó a cabo utilizando electrodos serigrafados descartables de la compañía DROPSSENS, usando Au como material del electrodo de trabajo y contraelectrodo. El potencial del pseudo electrodo de referencia fue de $E = 0,234$ V vs. SHE. La velocidad de barrido utilizada fue de 50 mV/s.

Las medidas en el espectro visible fueron realizadas en un equipo SPECORD 200 Plus de Analytic-Jena, en el rango 400–800 nm.

Por último, se armaron celdas usando la ficoeritrina extraída como sensibilizador, usando electrodos de FTO/TiO₂ (DYESOL, 0,7 cm²) y FTO/Pt (SOLARONIX) con electrolito 50 mM yoduro/tri yoduro en acetonitrilo (SOLARONIX). Las curvas J-V fueron medidas con un equipo CHI 604E, en condiciones de oscuridad y bajo irradiación usando un simulador solar ABET (1 sun, 1.5 AM).



Figura 1. Algas depositadas en las costas de la Isla Rey Jorge, a orillas del Pasaje de Drake (izquierda). Ficoeritrina separada durante el proceso de purificación usando columna de exclusión, a partir de extracto obtenido de *Palmaria decipiens* (derecha).

Resultados y discusión

La purificación de las muestras fue seguida por TLC. En los casos analizados, el extracto inicial, obtenido al mezclar en mortero la muestra de alga con agua, mostraba la presencia de un compuesto, con un $R_f = 0,97$ para *Palmaria decipiens* y $R_f = 0,94$ para *Delesseria lancifolia*. Luego del pasaje por la columna de exclusión, se observaba solamente la presencia de ficoeritrina ($R_f = 0$).

En la Figura 1 se puede observar cómo se ven estas algas en su entorno natural en la Isla Rey Jorge y como luce la ficoeritrina purificada dentro de una columna Sephadex.

El espectro visible de las muestras analizadas mostró la presencia de ficoeritrina-R, si bien tenían características levemente diferentes según el alga de partida (Gráfico 1).

Como se explicó anteriormente, la ficoeritrina está formada por subunidades α , β y γ . La subunidad γ es un péptido que funciona como *linker*. Se presenta como hexámeros $(\alpha\beta)_6\gamma$ que contienen ficoetrobilina (PEB) y ficourobilina (PUB) (Ficner, 1993; Isailovic, et al., 2004; Liu, et al., 2009; D'Agno, et al., 1994). La subunidad α contiene dos cromóforos PEB, la subunidad β contiene dos cromóforos PEB y un cromóforo PUB y la subunidad γ contiene cuatro cromóforos PUB.

Los monómeros $(\alpha\beta)$ son la unidad básica de ensamblado a partir de la cual se desarrollan diferentes tipos de formas de agregación, dando lugar a trímeros $(\alpha\beta)_3$ y hexámeros $(\alpha\beta)_6\gamma$.

En el espectro de absorbancia, los picos a 565 y 540 nm pueden asignarse a PEB, y el de 498 nm al PUB. La cantidad de subunidades γ puede variar entre algas, y eso afecta el espectro observado.

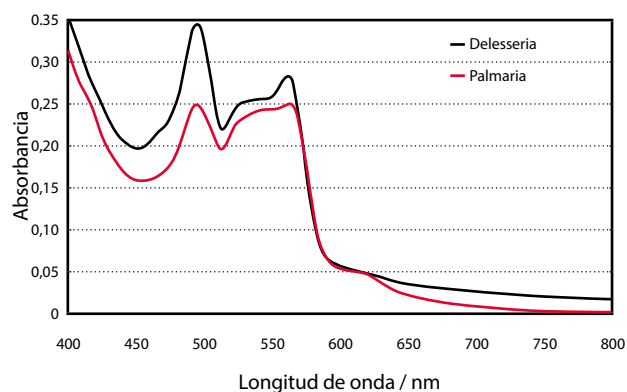


Gráfico 1. Espectro de absorbancia obtenido para muestras de *Palmaria decipiens* y *Delesseria lancifolia* antes de su purificación.

Estos monómeros, trímeros y hexámeros se presentan en equilibrio, y se pueden transformar unos en otros. Esto puede modificar las propiedades de la ficoeritrina, lo cual trae como consecuencia una dependencia con su estado de agregación.

Este comportamiento se aprecia claramente en los cambios medidos al evaluar la estabilidad con la temperatura de trabajo. En especial al considerar que la estabilidad frente a la desnaturalización de PEB y PUB es reportada como diferente (Isailovic, et al., 2004).

Para muestras purificadas obtenidas a partir de las algas mencionadas, el perfil de estabilidad térmico mostrado en el Gráfico 2 difiere levemente según el alga del cual provienen. En el caso de *Delesseria* muestra dos puntos de inflexión, a 47

y 60 °C, mientras que para el caso de *Palmaria* se detecta uno solo a 60 °C. Esta inflexión señala el punto en que la concentración de ambas especies presentes es idéntica, asumiendo el modelo termodinámico de la fisicoquímica por el cual solo dos especies pueden estar en equilibrio al mismo tiempo.

La estabilidad térmica se evaluó a tres longitudes de onda de trabajo: 497, 539 y 565 nm, y se observó una tendencia clara solamente al trabajar a 565 nm.

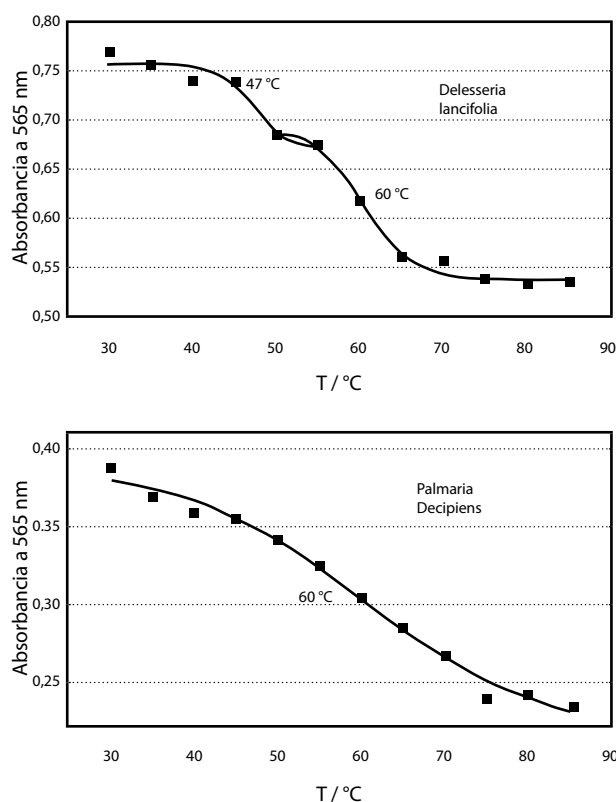


Gráfico 2. Perfiles de estabilidad térmica medidos a 565 nm para extractos purificados de *Palmaria decipiens* y *Delesseria lancifolia*.

Si la ficoeritrina es sometida a un agente desnaturante físico, como la temperatura, sufre un proceso de desnaturalización. Este proceso, de acuerdo al modelo termodinámico, puede esquematizarse como:



donde N es la proteína al estado nativo, y D es su forma desnaturalizada.

En este caso, la constante correspondiente al equilibrio puede plantearse como:

$$K_{eq} = \frac{[D]}{[N]}$$

Conociendo los confómeros que forman la ficoeritrina, se puede suponer entonces que en el Gráfico 2 la primera transición para *Delesseria* podría corresponder a la conversión del hexámero en subunidades γ y monómeros $(\alpha\beta)$, y la segunda, al paso del monómero a las subunidades que lo conforman, que posteriormente se desnaturalizan.

El estudio de estabilidad con la temperatura es primordial, ya que una celda fotovoltaica se verá expuesta a los rayos del sol, lo cual puede provocar un aumento de temperatura en ella. De todas formas, y por tratarse de celdas cuyo objetivo final es usarlas en territorio antártico, en este caso se colocarían dentro de la habitación y no alcanzarían nunca temperaturas tan altas como las evaluadas.

Otro punto de interés es que, más allá de la especie presente o la conversión observada, el estado final alcanzado cuando se logra una completa desnaturalización de la proteína no implica una pérdida total del color. Esto se observa claramente en el Gráfico 2, donde a pesar de estar la proteína en su forma desnaturalizada la absorbancia medida tiene un valor de casi el 60 % del valor inicial. Puede postularse entonces que, aun desnaturalizada, la ficoeritrina sigue teniendo capacidad de captar la luz en el rango visible del espectro, por lo cual sigue siendo una buena candidata a ser usada como sensibilizador del foto ánodo.

Respecto a la estabilidad con el tiempo, se usó *Delesseria* para este estudio. En este caso, las muestras guardadas en heladera a 0 °C o a temperatura ambiente no muestran cambios en el correr de 60 días. En las muestras evaluadas a 40 y 50 °C, luego del transcurso de 2 horas, la absorbancia a 565 nm decae tan solo a un 80 % del valor inicial. Esto confirmaría que una vez perdida la conformación inicial de hexámeros, la proteína conserva una gran capacidad de absorber la luz a 565 nm, mostrando un monómero muy estable.

En los estudios realizados a 70 °C, donde el monómero se desnaturaliza, la absorbancia medida cae rápidamente, alcanzando un 80 % de su valor inicial a tan solo 15 minutos de transcurrido el experimento.

Por último, los extractos fueron caracterizados por voltamperometría cíclica (Gráfico 3). En este caso las muestras analizadas mostraron la presencia de tres importantes procesos de oxidación, particularmente para extractos analizados antes de purificar. Los picos de oxidación se detectaron a 0,9, 1,0 y 1,2 V.

De acuerdo a lo reportado en la bibliografía, el pico a 0,9 V puede ser atribuido a la clorofila *a*, que podría ser extraída en muy pequeña cantidad junto a la ficoeritrina. La técnica electroquímica es tan sensible que permite detectarla con facilidad (Enciso, et al., 2016; Enciso y Cerdá, 2016).

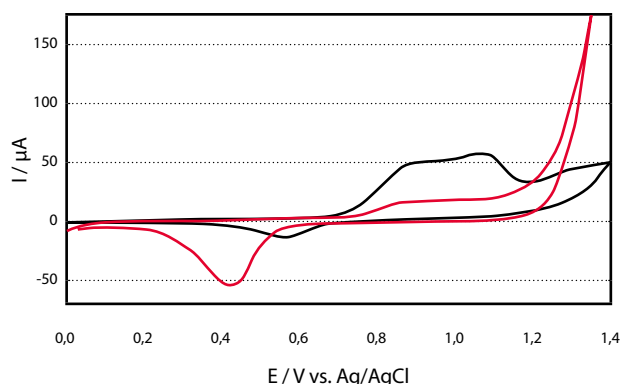


Gráfico 3. Perfil voltamperométrico obtenido para extracto de *Palmaria decipiens* en NaClO₄ 0,1 M sobre electrodo serigrafado de Au-pc a $v = 0,05 \text{ Vs}^{-1}$ (línea negra). Perfil obtenido para NaClO₄ 0,1 M en idénticas condiciones (línea roja).

Mientras tanto, los picos a 1,0 y 1,2 V pueden atribuirse a procesos de oxidación del grupo COOH de la proteína.

La adsorción de la proteína ocurre a través del grupo carboxílico y tiene lugar sobre superficies de oro a potenciales mayores a 0,4 V. Luego de adsorberse, y al continuar el barrido de potenciales hacia valores más altos, al llegar a un $E = 1,0 \text{ V}$ ocurre la oxidación del grupo y su desorción.

Un valor de potencial de oxidación positivo y mayor que 1 hace a la ficoeritrina sumamente atractiva para su aplicación en el foto electrodo, ya que al incidir la luz sobre él, esta proteína de color rojo tiene una capacidad muy alta de ceder sus electrones al TiO₂ del electrodo, comenzando así el ciclo de producción de electrones necesario para el funcionamiento de una celda DSSC.

En una última etapa se ensamblaron celdas DSSC usando la ficoeritrina obtenida por extracción de las algas. Las celdas sensibilizadas con la proteína proveniente de *Palmaria decipiens* fueron las que presentaron los mejores resultados.

En el Gráfico 4 se muestra el perfil de densidad de corriente en función del potencial medido para estas celdas. A partir de este perfil se obtienen los parámetros mencionados en la Tabla 1, donde J_{sc} se refiere a la densidad de corriente de corte, J_{mp} y V_{mp} a la densidad de corriente y el potencial en el punto de máxima potencia, respectivamente, y el V_{oc} es el potencial de corte. Por otra parte, FF hace referencia al *fill factor*, y η a la eficiencia de conversión medida bajo luz.

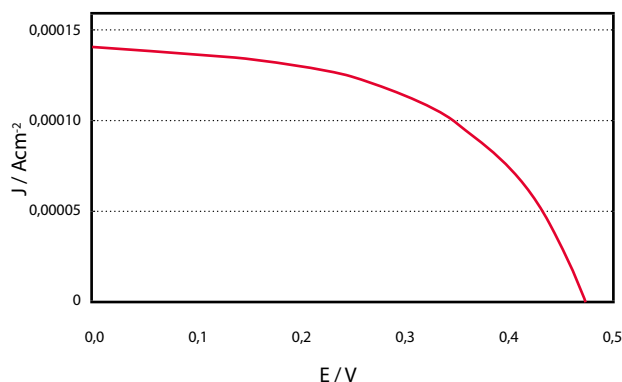


Gráfico 4. Perfil densidad de corriente (J) vs. potencial (E) obtenido para celdas armadas usando ficoeritrina extraída de *Palmaria decipiens* como sensibilizante.

$J_{sc} = 1.4E-4 \text{ A cm}^{-2}$	$J_{mp} = 1.0E-4 \text{ A cm}^{-2}$	$V_{oc} = 0,47 \text{ V}$	$V_{mp} = 0,35 \text{ V}$
FF = 0,53	$\eta = 0,035 \%$		

Tabla 1. Valores medidos en la caracterización de celdas ensambladas usando *Palmaria decipiens* como sensibilizador.

De acuerdo a los datos medidos, la eficiencia alcanzada es del 0,035 %. Una eficiencia muy baja pero reproducible, lo cual muestra celdas capaces de funcionar con el pigmento extraído.

Conclusiones

Los extractos de ficoeritrina obtenidos a partir de *Palmaria decipiens* y *Delesseria lancifolia*, aun sin purificar, muestran características adecuadas para su aplicación como sensibilizador en el foto ánodo de celdas DSSC. Entre ellas, el poseer un alto potencial de oxidación, sumado a una buena capacidad de absorción en el rango visible del espectro, y una adecuada estabilidad térmica.

El proceso de desnaturalización de la ficoeritrina empieza a ocurrir de forma apreciable a los 60 °C, temperatura que, si se consideran celdas que se usarán en la Antártida, no se alcanzará en condición ambiente. El estado final alcanzado cuando se logra una completa desnaturalización de la proteína no implica una pérdida total del color. Esto muestra que, incluso desnaturalizada, la ficoeritrina sigue teniendo la capacidad de captar la luz en el rango visible del espectro.

El uso de ficoeritrina como sensibilizador constituye un primer paso en la exploración de recursos antárticos para su aplicación en el uso de energías alternativas en esa zona. Contribuye, además, a la búsqueda de nuevos caminos para reducir el impacto ambiental derivado de la presencia humana en esa zona del planeta, ayudando a las nuevas generaciones a concientizarse sobre nuestra responsabilidad en el cuidado y los usos de los recursos disponibles en la tierra.

Reconocimientos

Los autores agradecen al Instituto Antártico Uruguayo, Lic. Ana Laura Machado, Sgto. Hebert Fleitas, S/o Luis Rodríguez y S/o Fabián Picos (buzos de la Base Artigas, Grupo de Buceo de la Armada), Martina Fernández, Lucila Hernández, Yessica Machado, Tomás Núñez, Marcos Gómez. A la ANII y al PEDECIBA-Química.

Referencias

Armeli Minicante, S., Ambrosi, E., Back, M., Barichello, J., Cattaruzza, E., Gonella, F., Scantamburlo, E. y Trave, E., 2016. Development of an eco-protocol for seaweed chlorophylls extraction and possible applications in dye sensitized solar cells. En: *Journal of Physics D: Applied Physics*, 49, pp.295601–295608.

Armeli Minicante, S., Citro, I., Morabito, M., Genovese, G. y Calogero, G., 2015. Algal pigments as dye sources in the solar photovoltaic technology. En: *Journal of Biological Research*, 88, pp.28.

Bisquert, J., Cahen, D., Hodes, G., Rühle, S. y Zaban, A., 2004. Physical chemical principles of photovoltaic conversion with nanoparticulate, mesoporous dye-sensitized solar cells. En: *Journal of Physical Chemistry B*, 108, pp.8106–8118.

Bhogaita, M., Shukla, A.D. y Nalini, R.P., 2016. Recent advances in hybrid solar cells based on natural dye extracts from Indian plant pigment as sensitizers. En: *Solar Energy*, 137, pp. 212–224.

Cerdá M.F. y Enciso P., 2014. Caracterización de las antocianinas de la flor de ceibo como sensibilizadores naturales para su uso en celdas fotovoltaicas. En: *INNOTEC*, 9, pp.91–96.

Cao, Y.M., Bai, Y., Yu, Q.J., Cheng, Y.M., Liu, S., Shi, D., Gao, F.F. y Wang, P., 2009. Dye-sensitized solar cells with a high absorptivity ruthenium sensitizer featuring a 2-(Hexylthio)thiophene conjugated bipyridine. En: *Journal of Physical Chemistry C*, 113, pp.6290–6297.

Chen, C.Y., Wang, M.K., Li, J.Y., Pootrakulchote, N., Alibabaei, L., Ngoc-le, C.H., Decoppet, J.D., Tsai, J.H., Grätzel, C., Wu, C.G., Zakeeruddin, S.M. y Grätzel M., 2009. Highly efficient light-harvesting ruthenium sensitizer for thin-film dye-sensitized solar cells. En: *American Chemical Society*, 3, pp.3103–3109.

D'Agnolo, E., Rizzo, R., Paoletti, S. y Murano E., 1994. R-phycoerythrin from the red alga *Gracilaria Longa*. En: *Phytochemistry*, 35, pp.693–696.

Enciso, P., Cabrerizo, F.M., Gancheff, J., Denis, P. y Cerdá, M.F., 2013. Phycocyanin as potential natural dye for its use in photovoltaic cells. En: *Journal of Applied Solution Chemistry and Modelling*, 24, pp.25–233.

Enciso, P. y Cerdá, M.F., 2016. Solar cells based on the use of photosensitizers obtained from Antarctic red algae. En: *Cold Regions Science Technology*, 126, pp.51–54.

Enciso, P., Decoppet, J.D., Grätzel, M., Wörner, M., Cabrerizo, F.M. y Cerdá, M.F., 2017. A cocksbur for the DSS cells: Erythrinacrista-galli sensitizers. En: *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 176, pp.91–98.

Enciso, P., Decoppet, J.D., Moehl, T., Grätzel, M., Wörner, M. y Cerdá M.F., 2016. Influence of the adsorption of phycocyanin on the performance in DSS cells: and electrochemical and QCM evaluation. En: *International Journal of Electrochemistry Science*, 11, pp.3604–3614.

Enciso, P., Minini, L., Álvarez, B. y Cerdá, M.F., 2012. Ensamblado de ficocianina sobre TiO₂ nanoestructurado para celdas fotovoltaicas. En: *INNOTEC*, 7, pp.69–74.

Ficner, R. y Huber, R., 1993. Refined crystal structure of phycoerythrin from *Porphyridium cruentum* at 0.23-nm resolution and localization of the subunit. En: *European Journal of Biochemistry*, 218, pp.103–106.

Gao, F., Wang, Y., Shi, D., Zhang, J., Wang, M.K., Jing, X.Y., Humphry-Baker, R., Wang, P., Zakeeruddin, S.M. y Grätzel, M., 2008. Enhance the optical absorptivity of nanocrystalline TiO₂ film with high molar extinction coefficient ruthenium sensitizers for high performance dye-sensitized solar cells. En: *Journal of American Chemical Society*, 130, pp.10720–10728.

Glazer, A.N., West, J.A. y Chan, C., 1982. Phycoerythrins as chemotaxonomic markers in red algae: a survey. En: *Biochemical Systematics and Ecology*, 10, pp.333–215

Isailovic, D., Li, H.W. y Yeung, E.S., 2004. Isolation and characterization of R-phycoerythrin subunits and enzymatic digests. En: *Journal of Chromatography A*, 1051, pp.119–130.

Kakiage, K., Aoyama, Y., Yano, T., Oya, K., Fujisawa, J.-I. y Hanaya, M., 2015. Highly-efficient dye-sensitized solar cells with collaborative sensitization by silyl-anchor and carboxy-anchor dyes. En: *Chemical Communications*, 51, pp. 15894–15897.

Liu, L.N., Su, H.N., Yan, S.G., Shao, S.M., Xie, B.B., Chen, X.L., Zhang, X.Y., Zhou, B.C. y Zhang, Y.Z., 2009. Probing the pH sensitivity of R-phycoerythrin: Investigations of active conformational and functional variation. En: *Biochimica et Biophysica Acta* 1787, pp.939–946.



Munier, M., Jubeau, S., Wijaya, A., Morançais, M., Dumay, J., Marchal, L., Jaouen, P. y Fleurence, J., 2014. Physicochemical factors affecting the stability of two pigments: R-phycoerythrin of *Grateloupia turuturu* and B-phycoerythrin of *Porphyridium cruentum*, En: *Food Chemistry*, 150, pp. 400-407.

Prabavathy, N., Shalini, S., Balasundaraprabhu, R., Velauthapillai, D., Prasanna, S. y Muthukumarasamy, N., 2017. Enhancement in the photostability of natural dyes for dye-sensitized solar cell (DSSC) applications: a review. En: *International Journal of Energy Research*, 41(10), pp. 1372-1396. DOI: 10.1002/er.3703.

Calibración de espirómetros por vía húmeda en el LATU y su adaptación a la ley de «alcohol cero»

Calibration of breath analyzers using wet bath simulators by LATU and its adaptation to «zero tolerance» DUI legislation

Silva, Ana I. (1); Ferrando, M^a Eugenia (2); Ferreira, Elizabeth (1)

(1) Departamento de Metrología Química, Laboratorio Tecnológico del Uruguay, LATU, Montevideo, Uruguay.

(2) Departamento de Metrología Química, Laboratorio Tecnológico del Uruguay, LATU (2016-2017), Montevideo, Uruguay.

Contacto: asilva@latu.org.uy

RECIBIDO: 11/9/2017 APROBADO: 15/11/2017

Resumen

En este artículo se presenta el trabajo del Departamento de Metrología Química para el desarrollo del servicio de calibración de espirómetros basado en la recomendación internacional de la Organización Internacional de Metrología Legal OIML R126:2012(E) (OIML, 2012), antes inexistente a nivel nacional. Se describe el origen de la necesidad de contar con el servicio, el desarrollo de Materiales de Referencia Certificados de etanol en agua como patrones químicos y los ensayos de validación del método. Asimismo, se mencionan los retos presentados por la ley de «alcohol cero» de entrada en vigencia en 2016 y los estudios complementarios necesarios para probar la aplicabilidad de los requisitos previstos en la recomendación.

Palabras clave: Espirómetro, calibración, validación, materiales de referencia.

Abstract

The following paper describes the work carried out by the Chemical Metrology Department to develop the first national breath analyser calibration service according to the recommendation from the International Organization of Legal Metrology, OIML R126:2012(E) (OIML, 2012). A detailed account of the different stages of this process is given, from method validation to the production of Certified Reference Materials of ethanol in water to be used as standards. In addition, a detailed description of the modifications introduced as a consequence of the «zero alcohol» law established in 2016 is presented, in order to demonstrate the applicability of the proposal to the requirements established in the recommendation.

Keywords: Breathalyzer, calibration, validation, reference materials.

Introducción

El consumo de alcohol (etanol) y su efecto adverso sobre la habilidad de conducir vehículos ha sido ampliamente estudiado y reportado (Dry, et al., 2012; Ogden, 2004; Watson, 2013; Elvik, 2009). Las secuelas de su consumo alteran el normal funcionamiento neurológico del individuo, aun con consumos muy bajos de alcohol, y aumentan exponencialmente con la dosis (OMS, 2015). La Organización Mundial de la Salud (OMS) establece como buena práctica la aplicación de legislación y fiscalización de la conducción bajo efectos del alcohol dado que representa un medio efectivo para la reducción de accidentes de tránsito asociados al consumo de alcohol (OMS, 2015). Los límites máximos de consumo de alcohol para conductores, expresado como concentración de alcohol en sangre, aplican desde hace 80 años; el primer antecedente es el de Noruega, en el año 1936 (Voas, 1990). Sin una tolerancia máxima explícita, la evidencia para el procesamiento de conductores bajo efecto del alcohol no puede ser más que conductual; esto puede ser subjetivo y ambiguo

y no constituye una base sólida para tomar acciones legales (Mann, 2001).

A partir del primer descubrimiento que relacionó la presencia de sustancias volátiles en sangre y su exhalación a través de los pulmones, se han realizado esfuerzos para aplicar este concepto al control del alcohol en sangre en el marco de la seguridad vial y laboral (Harger, 1950a; Zuba, 2008). Las ventajas de realizar análisis de aliento en lugar de análisis de sangre son varias: se obtienen resultados rápidamente, no es invasivo y los costos asociados son módicos (Vaz, et al., 2001). Por otro lado, las mediciones de alcohol en aliento requieren la cooperación activa del individuo evaluado, lo cual no siempre es posible, por lo que las mediciones en sangre son aún ampliamente utilizadas, tanto de forma comparativa, a solicitud del evaluado, como cuando no se consigue la cooperación activa (Pavlic, et al., 2006).

La exactitud de las mediciones de alcohol en aliento es crítica para poder asegurar sanciones justas y la seguridad de otros individuos, y depende estrechamente de la fuente de calibración utilizada para verificar el correcto funcio-

namiento de los instrumentos de medición (Vaz, et al., 2001). Según el vocabulario internacional de metrología (BIPM, 2012), la calibración de un instrumento refiere al establecimiento de «una relación entre los valores y sus incertidumbres de medida asociadas obtenidas a partir de los patrones de medida y las correspondientes indicaciones con sus incertidumbres asociadas». En términos simples, durante la calibración se compara la lectura de un instrumento contra un valor de referencia proveniente de un patrón trazable, y se determina la diferencia entre ellos, o el *error*. Esto no debe confundirse con el ajuste del instrumento, el cual busca minimizar dicho *error*.

La información obtenida en la calibración no es de utilidad sin la evaluación objetiva por parte del usuario del instrumento. A partir de esta información se debe definir si el desempeño del instrumento es adecuado al propósito, por ejemplo, comparando el error de medición con tolerancias obtenidas a partir de recomendaciones internacionales. A su vez, esta calibración muestra la situación puntual de un espirómetro, que puede variar en función del tiempo por deriva, desgaste, malfuncionamiento, entre otros factores, lo cual implica que el proceso de calibración y subsecuente evaluación de resultados debería realizarse periódicamente. La calibración de espirómetros puede realizarse de dos maneras: por vía «húmeda» o por vía «seca».

La calibración por vía «húmeda» se realiza mediante el uso de simuladores de soplo. Se basa en la ley de Henry: si una solución acuosa diluida de alcohol se pone en equilibrio con aire, la presión parcial del alcohol en la fase vapor es una función de la concentración de alcohol en la fase líquida y la temperatura del sistema (Dubowski, 1979). En este caso, los patrones de medida son soluciones de etanol en agua. En la calibración por «vía seca» se utilizan mezclas gaseosas de etanol en balance de nitrógeno. La única forma de asegurar que un patrón de medida es confiable es mediante su trazabilidad a las unidades del Sistema Internacional (SI) o referencias internacionales reconocidas. Esta confiabilidad se origina al vincular un resultado puntual con una referencia internacional a través de una serie de pasos ininterrumpidos. Esto, junto con comparaciones internacionales, lo hace comparable con otros resultados obtenidos análogamente, en otro momento, en otro lugar o por otro analista.

Además de brindar garantías tanto al evaluado como al fiscalizador, esta característica del resultado permite la armonización de criterios (por ejemplo, en los límites máximos de alcohol en sangre), a partir de estudios científicos de diversas procedencias, o recopilación de datos reales. La información generada a través del procesamiento estadístico de estos datos permite reafirmar políticas nacionales en seguridad vial o proporcionar evidencias en la adopción de nuevas.

Adicionalmente, existen recomendaciones internacionales desarrolladas por la Organización Internacional de Metrología Legal (OIML), las cuales establecen requisitos técnicos básicos para los analizadores y métodos de evaluación inicial y periódica de los mismos.

En Uruguay, en setiembre de 1994 el parlamento sancionó la ley 16.585 (Uruguay, 1994), que estableció un máximo de alcoholemia permitida para conductores de cualquier tipo de vehículos, 0,8 g/L, a excepción de los conductores de vehículos de pasajeros (CIPA, 2006). En 2007, la nueva legislación estableció una disminución gradual de la tolerancia máxima hasta 0,3 g/L, valor alineado a las buenas prácticas de seguridad vial de la OMS (OMS, 2015), que fue nuevamente modificada a

fin de 2015, cuando entró en vigencia la «tolerancia cero» de alcohol en tránsito (Uruguay, 2007).

Las últimas estadísticas nacionales reflejan una «tendencia al descenso en la cantidad de fallecidos anuales» (Unidad Nacional de Seguridad Vial, 2016a), acompañado de «un descenso del 23,1 % en espirometrías con presencia de alcohol en sangre en conductores que participaron en siniestros de tránsito» (Unidad Nacional de Seguridad Vial, 2016b).

En la publicación de la Comisión Coordinadora Intersectorial de Políticas de Alcohol (CIPA, 2006), la Junta Nacional de Drogas de Presidencia de la República definió al espirómetro como el instrumento que permite definir «responsabilidades civiles y/o penales para quien es medido (...) así como para quien solicita esa exploración». Con base en esto declaró necesario que el proceso de medición presente garantías a ambas partes, para lo cual la confirmación metroológica y la calidad de estos instrumentos es crucial.

En este marco, la Dirección de Metrología Científica e Industrial del Laboratorio Tecnológico del Uruguay (LATU), en su rol de diseminar la trazabilidad a las unidades del SI a través de la calibración, se planteó como objetivo el desarrollo del servicio de calibración de espirómetros, antes inexistente a nivel nacional. Para esto, desde 2013 el Área Orgánica dentro del Departamento de Metrología Química ha llevado a cabo las siguientes actividades: desarrollo del servicio de calibración de espirómetros por vía húmeda basado en la recomendación internacional OIML R126 (OIML, 2012) y según la Norma ISO/IEC 17025 (International Organization for Standardization, 2005) y producción de Materiales de Referencia Certificados de etanol en agua para la calibración de los espirómetros dentro de un Sistema de Gestión según la Guía ISO 34 (International Organization for Standardization, 2009) y la Norma ISO/IEC 17025 (International Organization for Standardization, 2005). Adicionalmente, con el advenimiento de la «tolerancia cero» se han realizado ensayos adicionales para dar sustento a la reglamentación de control de espirómetros en proceso de redacción.

Esta publicación se focalizará en el análisis de esas actividades y sus resultados.

Materiales y métodos

Preparación de Materiales de Referencia Certificados de etanol en agua

La fuente de trazabilidad para la calibración de espirómetros proviene de los patrones químicos que se utilicen. Para poder implementar este servicio fue preciso contar con grandes cantidades de Materiales de Referencia Certificados (MRC) de etanol en agua. En este sentido, el Departamento de Metrología Química implementó un Sistema de Gestión de Calidad según la Guía ISO 34 (International Organization for Standardization, 2009). Dentro de este marco, se prepararon cuatro lotes piloto de 9 a 19 unidades, sobre los cuales se realizaron estudios de homogeneidad, estabilidad acelerada (a 4 °C y 50 °C, emulando condiciones de transporte) y estabilidad a largo tiempo (vida útil), hasta 30 meses. Con base en esta información se prepararon lotes de 19 a 39 unidades que fueron caracterizados a partir de los datos de preparación gravimétrica y el análisis confirmatorio por cromatografía gaseosa (GC-FID con inyector Cool On-Column). La com-

petencia técnica para la determinación de etanol en agua y la preparación de MRCs fue evaluada durante una revisión de pares ejecutada en 2016, en la que expertos técnicos y de gestión de otros Institutos Nacionales de Metrología (INM) realizaron una auditoría en base a la Norma ISO/IEC 17025 (International Organization for Standardization, 2005) y la Guía ISO 34 (International Organization for Standardization, 2009). La documentación del Sistema de Gestión, junto con los hallazgos de esta auditoría, fueron presentados al Quality System Task Force (QSTF), del Sistema Interamericano de Metrología (SIM), en noviembre de 2016. En esta instancia se determinó que el Sistema de Gestión de la Calidad del Departamento de Metrología Química cumplía con los requisitos del Acuerdo de Reconocimiento Mutuo del Comité Internacional de Pesas y Medidas (CIPM). Adicionalmente, se participó con desempeño satisfactorio en una comparación clave (*key comparison* en inglés) para la determinación de etanol en agua (SIM.QM-K27), en la cual participaron otros INM de Latinoamérica, Europa, Asia y África. Esta evidencia recabada se presentará a fines de 2017 frente al Comité Consultativo de Cantidad de Materia (CCQM) del Bureau International de Pesas y Medidas (BIPM) para la declaración de las Capacidades de Medición y Calibración (CMC) en el apéndice C de la base datos de comparaciones clave del BIPM. En la Tabla 1 y Figura 1 se observan ejemplos de lotes de MRC de etanol en agua.

Código MRC	Fracción de masa de etanol (g/100g)	Incertidumbre certificación (g/100 g)
MRC.ORG.001 lote 002	0,05078	0,00030
MRC.ORG.002 lote 002	0,08132	0,00043
MRC.ORG.003 lote 003	0,10687	0,00042
MRC.ORG.004 lote 003	0,3729	0,0024

Tabla 1 Ejemplos de lote de Materiales de Referencia Certificados de fracción de masa de etanol en agua producidos en el LATU según Guía ISO 34:2009 (International Organization for Standardization, 2009).

Optimización y validación del método de calibración por vía húmeda

Método de calibración de espirómetros

Para la optimización y validación de la calibración de espirómetros por vía húmeda se utilizaron dos simuladores de soplo 10-4D (Guth Laboratories, Inc) conectados en serie, como se muestra en la Figura 2. Para los estudios de límites de detección y cuantificación se utilizó un sistema simple, donde solo se utiliza un simulador. Los sensores de temperatura son calibrados anualmente para verificar que su error no supere 0,1 °C, dada la alta dependencia de la partición del etanol entre la solución y la fase gaseosa con la temperatura. El suministro



Figura 1. Materiales de Referencia Certificados de fracción de masa de etanol en agua producidos en el LATU según Guía ISO 34:2009 (International Organization for Standardization, 2009).



Figura 2. Sistema de simuladores de soplo en serie para calibración de espirómetros en el LATU.

de aire para la simulación del aliento provino de cilindros de aire sintético comercial, y se controló por un flujímetro de división 0,1 L/min. Para las pruebas de optimización del método de calibración de espirómetros se utilizó un equipo con detección de celda de combustible (Alco-Sensor FST, Intoximeters, Inc.).

Cálculo de valor de referencia con simulador de soplo

A partir de la ecuación experimental propuesta por Harger (OIML, 2012), la relación entre la concentración de etanol en la solución acuosa (MRC) y el vapor generado por el simulador de soplo se rige por la Ecuación 1, mediante una constante de partición K_{HARGER} dependiente de la temperatura. A 34 °C, la temperatura estimada del aliento humano (Harger, et al., 1950b), la K_{HARGER} toma el valor indicado en la Ecuación 3.

$$C_{\text{vapor}} \left(\frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) = C_{\text{MRC}} \left(\frac{\text{g}}{\text{L}} \right) * K_{\text{HARGER}} \quad [\text{Ec. 1}]$$

$$K_{\text{HARGER}} = (0,0302T^2 + 0,1903T - 2,0576) \times 10^{-5}$$

[Ec. 2]

$$\text{A } 34^\circ\text{C: } K = 0,393 \times 10^{-3}$$

[Ec. 3]

La concentración de etanol en vapor (simulando el aire exhalado) se vincula con la concentración de etanol en sangre mediante la ley de Henry, donde K es el coeficiente de partición e indica cómo el alcohol se distribuye entre la fase líquida (sangre) y la fase gaseosa (aire alveolar). Este valor es tomado como referencia en la calibración.

$$C_{\text{sangre}} = C_{\text{vapor}} * K \quad [\text{Ec. 4}]$$

[Ec. 4]

Un valor de K de 2100 es considerado promedio para el sistema alcohol-sangre-aire alveolar *in vivo* (Harger, et al., 1950a). Esto significa que el contenido de etanol de 2100 mL de aire en un alvéolo será igual al contenido de alcohol de 1 mL de sangre que está en equilibrio con el aire a través de la membrana semipermeable del alvéolo.

Agotamiento de las soluciones de etanol en agua

Uno de los puntos más críticos de la calibración con simulador de sople es el agotamiento de la solución, el fenómeno por el cual la concentración de etanol en el vapor que emana desde el simulador de sople disminuye a medida que transcurren las mediciones. Para estudiar la influencia de este fenómeno se realizaron 40 mediciones en un sistema de dos simuladores de sople en serie, utilizando soluciones de etanol en agua preparadas gravimétricamente a cuatro fracciones de masa equivalentes a 0,4, 0,7, 0,9 y 3,9 gramos de etanol por litro de sangre: [C1], [C2], [C3] y [C4], respectivamente. A partir de estos datos se realizó un estudio de significancia de pendiente basado en el análisis estadístico para estudio de estabilidad según la Guía ISO 35:2006 (International Organization for Standardization, 2006), en la sección 8.3.1.

Para los n pares de datos (X, Y), donde X es el número consecutivo de indicación del espirómetro e Y el valor que toma dicha indicación, se estimó un modelo de regresión lineal que los vincula, donde la estimación de la pendiente y del intercepto se realizaron según las Ecuaciones 5 y 6, respectivamente. La desviación estándar de la pendiente se calculó según las Ecuaciones 7 y 8.

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}$$

[Ec. 5]

$$a = \bar{Y} - b\bar{X}$$

[Ec. 6]

$$s_b = \frac{s}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}}$$

[Ec. 7]

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - a - bX_i)^2}{n - 2}}$$

[Ec. 8]

Se considera que la pendiente (tendencia) no es significativa si $|b| < t_{0,95;n-2} * s_b$, donde t es el estadístico t de Student, con probabilidad de 0,95 y n - 2 grados de libertad.

Exactitud

Para evaluar la exactitud del método, se utilizaron soluciones de etanol en agua preparadas gravimétricamente (MRCs de producción interna) y se determinó el error para cada nivel. Además, se analizaron dos Materiales de Referencia Certificados del Instituto Metrológico Nacional de Brasil (INMETRO). La diferencia obtenida entre el promedio de las indicaciones del espirómetro (n=5) y el valor de referencia, calculado según la Ecuación 4, fue utilizado como estimador de sesgo del método (Ecuación 9) y la desviación estándar relativa de las indicaciones, como estimador de repetibilidad (Ecuación 10).

$$\text{Sesgo} = \overline{\text{Indicaciones}} - \text{Valor de referencia}$$

[Ec. 9]

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

[Ec. 10]

Límite de detección y cuantificación

Para determinar el límite de detección y cuantificación de la medición con espirómetro se prepararon gravimétricamente soluciones de etanol en agua en el rango de fracción de masa de 0,005 a 0,05 g/100 g, lo que equivale a un rango de concentración de etanol en sangre de 0,04 a 0,41 g/L (se asume que la densidad para estas soluciones es igual a la correspondiente a 0,05 g/100g). Estas soluciones fueron cargadas al simulador de sople en configuración «simplex», y luego del tiempo de estabilización se tomaron lecturas (n=15) a cada nivel.

Interferencias fisiológicas

Se analizó la respuesta del espirómetro frente a acetona, metanol e isopropanol de acuerdo a lo establecido en la OIML R126 (pruebas de influencia fisiológica). Para el análisis de respuesta frente a acetona, se preparó volumétricamente una solución acuosa de concentración 0,15 g/L equivalente a 0,5 mg/L en vapor, considerando una constante de K_{HENRY} para el sistema solución acuosa/vapor liberado por simulador de sople de 365:1 según bibliografía (NHTSA, 1985). En cuanto al análisis de metanol e isopropanol, se preparó gravimétricamente una curva de calibración a tres niveles para cada alcohol: etanol, metanol e isopropanol. Se analizaron las soluciones mediante espirómetro con detector de celda de combustible y se graficaron los resultados. Se compararon las pendientes entre dichas curvas.

Resultados y discusión

Optimización y validación del método de calibración por vía húmeda

Agotamiento

El agotamiento de las soluciones de etanol en agua utilizadas en los simuladores de sople puede explicarse por el arrastre preferencial del etanol en la fase gaseosa mediante la corriente de aire sintético que atraviesa la solución. En condiciones no controladas esta disminución afecta la concentración de etanol en vapor a la salida. Los resultados se pueden apreciar en el Gráfico 1. Como se muestra en la Tabla 2 se observó que la tendencia a la disminución de los valores es significativa para las concentraciones [C2] y [C3], si bien la diferencia máxima fue considerablemente mayor para [C4]. Esto sugiere que cuanto mayor fue la concentración de ensayo, el agotamiento ocurrió más rápidamente. Si bien el agotamiento de las soluciones se pudo evidenciar por esta tendencia, la diferencia máxima fue menor al Error Máximo Permissible (EMP) para los niveles de ensayo. Como herramienta de control de calidad, se implementó una evaluación del agotamiento tomando una medida con el espirómetro de control entre espirómetros a calibrar.

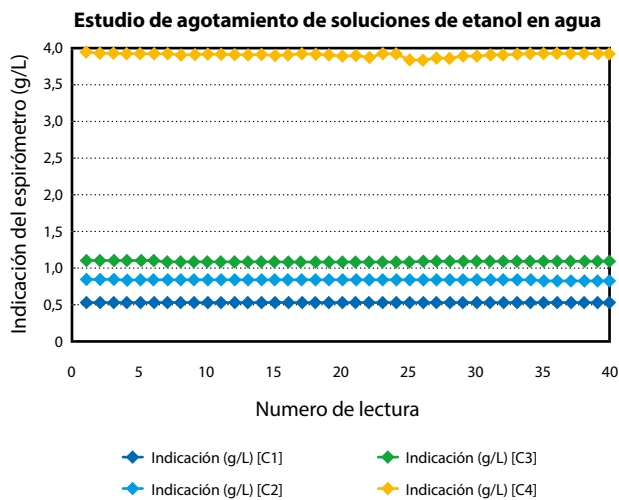


Gráfico 1. Estudio de agotamiento de las soluciones de etanol en agua a [C1], [C2], [C3] y [C4] en sistema en serie.

Nivel	b	s _b	s _b [*] t _{0,95;n-2}	Rango (g/L)	¿Tendencia significativa?	EMP (g/L)
[C1]	-0,00006	0,00005	0,00009	0,01	NO	0,042
[C2]	-0,00048	0,00007	0,00013	0,03	SÍ	0,042
[C3]	-0,00026	0,00007	0,00013	0,02	SÍ	0,044
[C4]	-0,00041	0,00034	0,00068	0,11	NO	0,154

Tabla 2. Análisis de significancia de la pendiente para el estudio de agotamiento de las soluciones de etanol en sistema en serie.

Exactitud

En las Tablas 3 y 4 se muestran los resultados obtenidos en los estudios de exactitud utilizando MRCs tanto de producción interna (LATU) como externa (INMETRO).

C _{sangre} (g/L)	0,4183	0,6698	0,8803	3,0701
Nº Lectura	Lectura (g/L)	Lectura (g/L)	Lectura (g/L)	Lectura (g/L)
1	0,42	0,66	0,88	3,06
2	0,41	0,67	0,87	3,05
3	0,41	0,66	0,88	3,06
4	0,42	0,68	0,88	3,06
5	0,42	0,67	0,88	3,08
\bar{x}	0,416	0,668	0,878	3,062
s	0,006	0,008	0,005	0,011
sesgo	-0,002	-0,002	-0,002	-0,008
U _{sesgo} ^o (k=2)	0,008	0,011	0,009	0,027
EMP	0,042	0,042	0,044	0,154
S _{máx.}	0,014	0,014	0,015	0,051

Tabla 3. Resultados del estudio de exactitud con Materiales de Referencia Certificados de etanol en agua de producción interna (LATU). Datos de Error Máximo Permissible (EMP) y S_{máx.} (igual a EMP/3) obtenidos de OIML R126 :2012 (E) (OIML, 2012) 5.2.1 (verificación inicial).

C _{sangre} (g/L)	0,4197	0,8801
Nº Lectura	Lectura (g/L)	Lectura (g/L)
1	0,41	0,89
2	0,41	0,88
3	0,40	0,88
4	0,40	0,88
5	0,40	0,89
\bar{x}	0,404	0,884
s	0,006	0,006
sesgo	-0,016	0,004
EMP	0,042	0,044
S _{máx.}	0,014	0,015

Tabla 4. Resultados del estudio de exactitud con Materiales de Referencia Certificados de etanol en agua de otro Instituto Nacional de Metrología (INMETRO). Datos de Error Máximo Permissible (EMP) y S_{máx.} (EMP/3) obtenidos de OIML R126 :2012 (E) (OIML, 2012) 5.2.1 (verificación inicial).

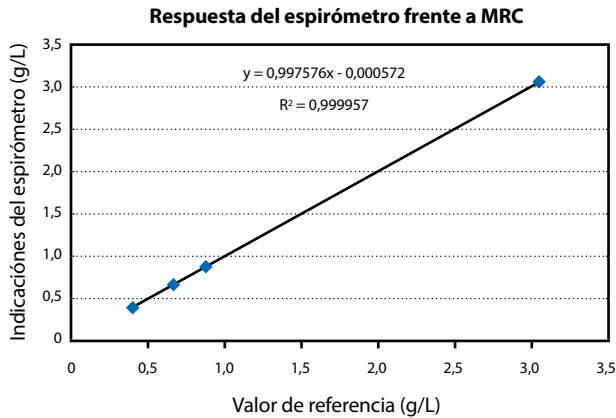


Gráfico 2. Relación entre la respuesta del espirómetro y el valor de referencia a partir de MRCs de producción interna (LATU).

Para que este método de calibración sea adecuado al propósito es necesario detectar el cumplimiento de los EMP y $S_{máx.}$, de acuerdo a la OIML R126 (OIML, 2012). A partir de los datos obtenidos en el estudio de exactitud se puede apreciar que para todas las concentraciones, el sesgo y la desviación estándar fue menor a la mitad de los EMP y $S_{máx.}$ a sus correspondientes concentraciones. Esto aplica de igual forma si se utilizan los MRC del LATU o INMETRO (Tablas 1 y 2). En el Gráfico 2 se observa la correlación entre los valores de referencia y las lecturas, con pendiente igual a 1 y una linealidad de respuesta buena ($R^2 > 0,9999$).

Límite de detección y cuantificación

Con el advenimiento de la tolerancia cero para el consumo de alcohol en el tránsito es importante verificar el desempeño de los equipos de fiscalización a niveles aún más bajos. Las mediciones de ausencia absoluta representan un desafío metrologógico, ya que a este nivel se debe considerar la incertidumbre de medición. Una posible estrategia es el enmascaramiento de las indicaciones por debajo de la mínima lectura confiable. Otra estrategia es considerar como una lectura diferente de cero aquella que supere el error instrumental. En este caso, para el cumplimiento de los requisitos de la recomendación OIML R 126 (OIML, 2012), los espirómetros en uso tienen un error máximo permisible de 0,063 g/L. Según esta estrategia, se podría considerar una lectura positiva de espirometría aquella que supere este EMP. En el estudio de límite de detección y cuantificación se buscó evaluar el desempeño de cuantificación cerca del EMP para equipos en uso.

En la Tabla 5 y el Gráfico 3 se presentan los resultados obtenidos para el estudio de límite de detección y cuantificación.

Los resultados permiten evidenciar que la mínima concentración de prueba a la cual el espirómetro responde fue 0,073 g/L (en sangre), mientras que en la concentración de prueba por debajo de este valor la respuesta fue nula. Adicionalmente, por encima de este nivel la desviación estándar y el error cumplieron los requisitos de exactitud necesarios ($EMP/2$ y $S_{máx.}/2$), lo cual evidenció un buen desempeño de cuantificación. Este resultado implica que durante medidas en tránsito este espirómetro no indicaría una lectura mayor a cero en el rango en el cual se pondría en duda si la lectura «es o no» cero gramos de alcohol por litro de sangre.

w_{Et} (g/100g)	C_{sangre} (g/L)	\bar{x} (g/L)	s (g/L)	Error
0,0051	0,042	0,00	0,00000	-0,042
0,0069	0,057	0,00	0,00000	-0,057
0,0089	0,073	0,07	0,00000	-0,003
0,0109	0,090	0,08	0,00352	-0,008
0,0128	0,105	0,10	0,00000	-0,005
0,0162	0,133	0,13	0,00458	-0,006
0,0276	0,228	0,22	0,00000	-0,008
0,0393	0,324	0,31	0,00488	-0,011
0,0508	0,419	0,41	0,00000	-0,009

Tabla 5. Resultados del ensayo de límite de detección y cuantificación. \bar{x} es el promedio de las lecturas, s la desviación estándar de las 15 lecturas.

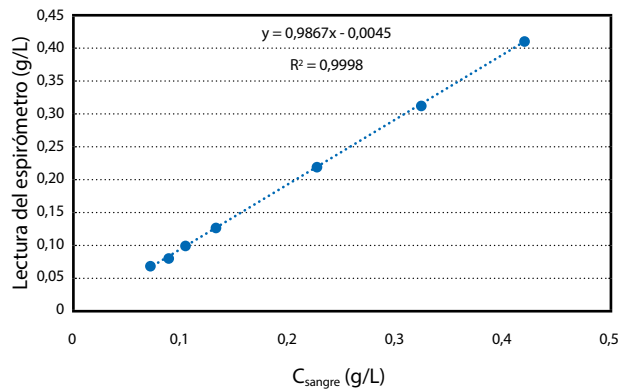


Gráfico 3. Relación entre la respuesta del espirómetro y el valor de referencia para estudio de límite de detección y cuantificación.

Interferencias fisiológicas

La ausencia de interferencias es un requisito importante para la correcta implementación del límite reglamentario de cero gramo de alcohol por litro de sangre. Para comprobar esto se estudió la respuesta del espirómetro frente a los potenciales interferentes más comunes: acetona, metanol e isopropanol.

Acetona

Según la publicación de NHTSA (NHTSA, 1985), las personas propensas a generar cuerpos cetónicos, por ejemplo aquellas en ayunos prolongados o con diferentes grados de diabetes, pueden presentar un valor promedio de cantidad de acetona expirada de 0,3 mg/L, la cual podría ser una interferencia en el análisis de etanol en aliento según se ha reportado anteriormente (Crawford, et al., 2011). En este sentido, la recomendación OIML R 126 (OIML, 2012) introduce pruebas de influencia fisiológica en las que los espirómetros son evaluados utilizando una concentración de 0,5 mg/L de acetona en vapor, el cual se puede analizar por «vía seca» utilizando mezcla de gases, o por «vía húmeda» con simuladores de soplo. Para esto es necesario contar con la constante de partición

de acetona entre la solución acuosa y el vapor generado por simulador de sople; este valor se reporta como 365:1 en la publicación de la NHTSA (NHTSA, 1985).

La solución de prueba de acetona fue cargada en el simulador de sople y se tomaron 10 lecturas con el espirómetro, indicando para todas las réplicas 0,00 g/L de sangre. La falta de respuesta de este tipo de detector (celda de combustible) implica que a una concentración de acetona en vapor exhalado superior a la que pudiese encontrarse en personas propensas a producción endógena de acetona (0,4 mg/L de acetona en vapor), no provocaría una interferencia o falso positivo durante las espirometrías.

Metanol e isopropanol

En vista de que la Ley 18.191 (Uruguay, 2007) dictamina en su artículo 45 la inhabilitación de conductores que posean «concentración de alcohol en sangre» superior a 0,0 g/L, la presencia de metanol e isopropanol no puede definirse como un falso positivo, ya que estarían incluidos dentro de la definición de «alcohol» y presentan un efecto embriagante. No obstante, es necesario evaluar si la sensibilidad del espirómetro frente a metanol e isopropanol no supera la del etanol, de lo contrario, frente a la presencia de concentración en sangre de metanol y/o isopropanol, la señal del espirómetro podría ser diferente a cero, incluso cuando la concentración de etanol se encontrara por debajo del límite de detección estudiado.

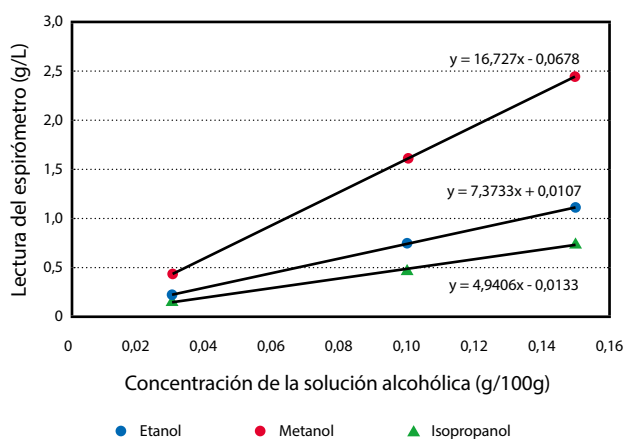


Gráfico 4. Respuesta del espirómetro para curvas de calibración de soluciones de etanol, metanol e isopropanol.

Etanol		Metanol		Isopropanol	
W _{Et} , g/100 g	\bar{x} (g/L)	W _{Met} , g/100 g	\bar{x} (g/L)	W _{Isop.} , g/100 g	\bar{x} (g/L)
0,030	0,23	0,030	0,44	0,030	0,13
0,100	0,76	0,100	1,59	0,100	0,49
0,150	1,11	0,150	2,45	0,150	0,73

Tabla 6. Respuesta del espirómetro frente a soluciones acuosas de etanol, metanol e isopropanol de diferentes concentraciones. \bar{x} : promedio de las indicaciones del espirómetro.

A partir de los resultados de las mediciones (Tabla 6, Gráfico 4) es posible concluir que el espirómetro con

detector de celda de combustible presentó sensibilidad a metanol e isopropanol además de etanol. Dados los dos pasos de partición que gobiernan el análisis de alcohol en aliento, se definen dos coeficientes que los describen: F_1 para la partición del alcohol entre solución acuosa y vapor, y F_2 para la partición del alcohol entre sangre y el aire alveolar, los cuales no han sido reportados para metanol e isopropanol. Es posible observar que la respuesta del espirómetro fue mayor para metanol que para etanol y este fue a su vez mayor que para isopropanol, de acuerdo a las pendientes de las respectivas curvas de calibración. Suponiendo que $F_{1,2 \text{ metanol}}$ y $F_{1,2 \text{ isopropanol}}$ son independientes de la concentración, como sucede para etanol en este rango, es posible inferir directamente que el detector mostró mayor sensibilidad para metanol (2,2 veces) y menor que para isopropanol (0,67 veces). Esto podría significar que para cantidades equivalentes de etanol y metanol en aliento la señal del espirómetro podrá verse exacerbada e inducir un sesgo positivo cuando se lo compare contra el resultado de un análisis en sangre. No obstante, la bibliografía indica la presencia natural de metanol en el aire exhalado a concentraciones bajas —0,21 a 0,70 $\mu\text{g/L}$ según Jones (1985)—, lo cual equivaldría a una máxima lectura de 0,003 g/L en sangre si se suponen los factores de conversión de etanol y el factor adicional de 2 determinado experimentalmente. Por lo tanto, en situaciones de salud normal la señal producida por la presencia de metanol no superaría la tolerancia de 0,063 g/L. En el caso particular del isopropanol, se han reportado casos de personas bajo dietas de muy bajas calorías que generarían cantidades significativas de acetona que se metaboliza a isopropanol por reducción (Jones, et al., 2007), el cual en este caso daría una señal dependiendo de su concentración. En casos en los que exista esta posibilidad, el análisis cromatográfico confirmatorio diferenciaría ambos alcoholes y eliminaría la fuente de error.

Conclusión

Este artículo describe la validación de un servicio de calibración de espirómetros y la producción de Materiales de Referencia Certificados de etanol en agua para este propósito. El equipo ensayado muestra un límite de detección y cuantificación que permite la medición confiable de pruebas de espirometría positivas, es decir, una lectura por encima del error máximo permisible para espirómetros en uso según la OIML R126 (OIML, 2012). Las pruebas de interferencias fisiológicas demuestran que la presencia en cantidades típicas de acetona, metanol e isopropanol en aliento no generarían una señal por encima del EMP del espirómetro. Cabe destacar que los estudios fueron realizados sobre un espirómetro particular con detección de celda de combustible. Estos resultados no son necesariamente extrapolables a otras tecnologías.

Reconocimientos

Al Departamento de Metrología Legal del LATU, por la colaboración. A los compañeros del Departamento de Metrología Química, en especial Ramiro Pérez y Simone Fajardo, por la revisión y el apoyo. A colaboradores del área orgánica actuales y pasados, por la realización de los ensayos.

Referencias

- BIPM, 2012. *JCGM 200:2012 Vocabulario internacional de metrología conceptos fundamentales y generales, y términos asociados*. 3a ed. Sèvres Cedex: BIPM.
- CIPA, 2006. *Implicancias y riesgo del consumo de alcohol en los individuos asociado a su comportamiento en el tránsito*. Montevideo: Presidencia de la República- Junta Nacional de Drogas.
- Crawford, T.V., McGrowder, D.A. y Rawlins, J.M., 2011. An assessment of falsely convicted type 1 diabetics in jamaica by using the breathalyzer test. En: *Journal of Clinical and Diagnostic Research*, 5(3), pp.448-451.
- Dubowski, K., 1979. Breath-alcohol simulators: scientific basis and actual performance. En: *Journal of Analytical Toxicology*, 3(5), pp.177-182.
- Elvik, R., 2009. *The handbook of road safety measures*. 2a ed. Bingley: Emerald Group Publishing Limited.
- Harger, R., Forney, R.B. y Barker, H.B., 1950a. Estimation of the level of blood alcohol from analysis of breath. En: *Journal of Laboratory and Clinical Medicine*, 36(318), pp.107-121.
- Harger, R., Raney, B.B., Bridwell, E.G. y Kitchel, M.F., 1950b. The partition ratio of alcohol between air and water, urine and blood; estimation and identification of alcohol in these liquids from analysis of air equilibrated with them. En: *Journal of Biological Chemistry*, 183, pp.197-213.
- International Organization for Standardization, 2005. *ISO/IEC 17025: Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y de calibración*. Ginebra: ISO.
- International Organization for Standardization, 2006. *ISO Guide 35: Reference materials - General and statistical principles for certification*. Ginebra: ISO.
- International Organization for Standardization, 2009. *Guía ISO 34: Requisitos generales para la competencia de productores de materiales de referencia*. Ginebra: ISO.
- Jones, A., 1985. Excretion of low-molecular weight volatile substances in human breath: focus on endogenous ethanol. En: *Journal of Analytical Toxicology*, 9(6), pp.246-250.
- Jones, A. R. y Rössner, S., 2007. False-positive breath-alcohol test after a ketogenic diet. En: *International Journal of Obesity*, 31(3), pp.559-561.
- Dry, M.J., Burns, N., Nettelbeck, T., Farquharson, A.L. y White, J.M., 2012. Dose-related effects of alcohol on cognitive functioning. En: *PLoS ONE*, 7(11).
- Mann, R., 2001. The effects of introducing or lowering legal per se blood alcohol limits for driving: an international review. En: *Accident Analysis and Prevention*, 33, pp.569-583.
- NHTSA, 1985. *DOT HS 806 The likelihood of acetone interference in breath alcohol measurement*. Virginia: NHTSA.
- Ogden, E., 2004. Effects of alcohol and other drugs on driver performance. En: *Traffic Injury Prevention*, 5, pp.185-198.
- OIML, 2012. *OIML recommendation R126. Evidential breath analyzers*. Paris: OIML.
- OMS, 2015. *Global status report of road safety*. Ginebra: OMS.
- Pavlic, M., Grubwieser, P., Brandstätter, A., Libiseller, K. y Rabl, W., 2006. A study concerning the blood/breath alcohol conversion factor Q: Concentration dependency and its applicability in daily routine. En: *Forensic Science International*, 158(2-3), pp.149-156.
- Unidad Nacional de Seguridad Vial, 2016a. *Informe anual siniestralidad vial 2016*. Montevideo: UNASEV.
- Unidad Nacional de Seguridad Vial, 2016b. *Informe espirometrías positivas desde que rige el alcohol cero para conducir*. Montevideo: UNASEV.
- Uruguay. Ley N° 16.585, de 22 de setiembre de 1994. *Diario Oficial*, 3 de octubre de 1994, p. 9A.
- Uruguay. Ley N° 18.191, de 18 de noviembre de 2007. *Diario Oficial*, 28 de noviembre de 2007, No.27.373, p. 398A.
- Vaz, D., Castanheira, I., Fino, H y Van der Veen, A., 2001. Breath analyzers: implementation of traceability in Portugal. En: *OIML Bulletin*, XLII(2), pp.9-13.
- Voas, R., 1990. Drunk driving enforcement, adjudication, and sanctions in the United States. En: Wilson, R., 1990. *Drinking and driving: advances in research and prevention*. New York: Guildford Press. pp.116-158
- Watson, B., 2013. The impact of drink driving laws. En: Miller, P. M. *Interventions for addiction. Comprehensive addictive behaviors and disorders*. Vol. 3. New York: Elsevier. pp.697-707
- Zuba, D., 2008. Accuracy and reliability of breath alcohol testing by handheld electrochemical analysers. En: *Forensic Science International*, 178,(2-3), e29-e33

Estudio de características vinculadas al procesamiento textil en lanas del Consorcio Regional de Innovación en Lanasy Ultrafinas

Evaluation of characteristics related to textile processing in wool from the Regional Consortium of Innovation in Ultrafine Wools

Pérez, Víctor (1); Bonner, Martín (1); Montossi, Fabio (2); Ramos, Zully (3); Sacchero, Diego (4); De Barbieri, Ignacio (2)
(1) Departamento de Textiles, Lana Bruta, Tops y Cueros, Laboratorio Tecnológico del Uruguay, LATU, Montevideo, Uruguay.
(2) Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria, INIA, Tacuarembó, Uruguay.
(3) Consorcio Regional de Innovación en Lana Ultrafina, CRILU, Tacuarembó, Uruguay.
(4) Laboratorio de Fibras Textiles, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, INTA, Bariloche, Argentina.

Contacto: vperez@latu.org.uy

RECIBIDO: 5/9/2017 – APROBADO: 20/11/2017

Resumen

El objetivo de este trabajo fue tipificar las características vinculadas al procesamiento textil en lanas producidas en establecimientos del Consorcio Regional de Innovación en Lanasy Ultrafinas (CRILU), para determinar si se adecuan a los estándares textiles internacionales de calidad para este tipo de fibra. En dos zafras (2015-2016 y 2016-2017) se analizaron 354 lotes (478.200 kg) de lana para determinar de forma objetiva –según normas de ensayo y regulaciones de la International Wool Textile Organisation (IWTO)–, las características que influyen en el precio, el uso final y el comportamiento textil. En promedio, el diámetro de la fibra fue 17,9 y 18,2 micras (método air flow), la base lana 64,6 y 65,5 %, la base materia vegetal 0,5 % en ambas zafras, el largo de mecha 85,6 y 91,8 mm, la resistencia de la mecha 36,3 y 34,8 N/kTex y el amarillamiento 9,5 y 9,3 unidades CIE, respectivamente, para cada zafra. En conclusión, se corroboró la adecuación de las lanas obtenidas a las demandas de los mercados internacionales más exigentes, lo que indica una exitosa difusión y transferencia de la genética animal y del paquete tecnológico para la producción de lanas finas de alta calidad.

Palabras clave: Merino, diámetro de fibra, resistencia de mecha, largo de mecha, amarillamiento.

Abstract

The aim of this study was to typify the characteristics related to textile processing in wools produced in farms of the Regional Consortium of Innovation in Ultrafine Wool (CRILU) to ascertain if they conform to the international industrial quality standards for this type of fiber. In two harvest seasons (2015-2016 and 2016-2017) 354 lots of wool (478.200 kg) were tested in order to determine, following the International Wool Textile Organisation (IWTO) Test Methods and Regulations, the characteristics that influence the price, end use and textile behaviour. Mean fibre diameter was 17,9 and 18,2 microns (air flow method), wool base 64,6 and 65,5 %, vegetable matter base 0,5 % in both seasons, staple length 85,6 and 91,8 mm, staple strength 36,3 and 34,8 N/kTex, and yellowness 9,5 and 9,3 CIE units, respectively, for each harvest season. In conclusion, the conformity of the obtained wools to the demands of the tougher international markets was validated, indicating a successful diffusion and transference of animal genetics and of the technological package for the production of high quality' fine wools.

Keywords: Merino, fibre diameter, staple strength, staple length, yellowness.

Introducción

Las lanas de diámetro promedio menor a 24,5 micras tienen como principal destino el sector vestimenta, el cual utiliza el 60 % de las lanas producidas a nivel mundial (Cottle, 2010). En este segmento de la producción de lana, el desafío es la fabricación de prendas livianas, suaves al tacto, que se puedan utilizar todo el año, directamente sobre la piel, y disponibles en estilos informales (Swan, 2010). En particular, este es

un segmento del mercado de lujo, de prestigio y alto valor, conformado principalmente por lanas con diámetros de fibra menores a las 19 micras (Rowe, 2010). Australia, que produce el 90 % de la lana destinada a vestimenta en el mundo, desde la década de 1990 a la actualidad ha realizado profundos cambios en el perfil de diámetro de la fibra de su zafra lanera (AWTA, 2016), con un crecimiento tanto en volumen como en porcentaje de las lanas menores a 19,5 micras, en un contexto de disminución de la producción de lana del país.

Las propiedades textiles de la fibra de lana influyen o determinan el precio de comercialización, la utilización posterior y la performance textil de la lana (Botha y Hunter, 2010). Dentro de las propiedades más relevantes de la lana sin procesar se destacan el diámetro de la fibra, el rendimiento y el contenido vegetal, seguidos en relevancia por el largo y la resistencia de mecha, el punto de ruptura bajo tensión y el color. El estudio de cinco zafra laneras en Australia (2008-2013), en el que se incluyeron como variables las propiedades textiles y también las de mercado, indica que el diámetro de la fibra es la variable más importante y la que explica el 64 % en la variación del precio de la lana vellón (Nolan, 2014). Dentro de las propiedades textiles de la fibra, otras variables que influyeron significativamente en la variación de precio fueron la resistencia y largo de mecha, el contenido vegetal y el estilo.

En Australia, para las zafra 2008 a 2013, en una muestra de lana (vellón, barriga y pedazos) donde el 55 % era inferior a 20,4 micras, entre el 46 y 51 % presentó largos de mecha entre 70 y 90 mm. En cuanto a la resistencia de la mecha, entre el 65 y 76 % alcanzó valores superiores a 28 N/kTex (Nolan, 2014). En el sur de Argentina, en un análisis de cinco zafra de lana Merino de aproximadamente 20 micras, los valores de resistencia de la mecha fueron de entre 29 y 34 N/kTex con un largo de fibra de 85 mm (Mueller, et al., 2013).

En Uruguay, durante los últimos 16 años se han desarrollado tres proyectos de alcance nacional (Montossi, et al., 2013) que han contemplado y favorecido cambios en la producción y calidad de las lanas finas en el sector primario de la cadena agroindustrial. En particular, en el marco del Proyecto Merino Fino del Uruguay y del Consorcio Regional de Innovación en Lanias Ultrafinas (CRILU), se ha realizado una fuerte producción y difusión de animales que genéticamente producen lanas menores a 19 micras en el sector comercial (De Barbieri, et al., 2015a). Paralelamente, algunos trabajos experimentales indican la posibilidad de producir sustentablemente en pasturas naturales del Uruguay lanas finas de excelente calidad, de acuerdo a los estándares industriales más exigentes (De Barbieri, et al., 2014ab, 2015b). Sin embargo, la información objetiva es muy escasa sobre la calidad de las lanas producidas a nivel comercial en las majadas que han participado de estos proyectos.

A nivel experimental ha sido posible producir en Uruguay lanas finas que se adecuan a los estándares de calidad industriales. Nuestra hipótesis es que si la genética y el paquete tecnológico utilizado a nivel experimental ha sido transferido exitosamente al sector primario involucrado en proyectos de innovación, la mayoría de las lanas finas producidas comercialmente pueden adecuarse a los estándares industriales de calidad para este tipo de fibra de lujo.

El objetivo de este trabajo fue tipificar las características vinculadas al procesamiento textil en lanas producidas en establecimientos participantes del Consorcio Regional de Innovación en Lanias Ultrafinas.

Materiales y métodos

Estrategia de muestreo

En 2015 participaron del estudio 37 establecimientos, que representaron una producción total de 209.870 kg de lana; en 2016 fueron 40, que representaron una producción total de 268.330 kg de lana, todos ellos participantes del CRILU y

distribuidos en todo Uruguay. En 2015 se muestrearon 1143 fardos de lana integrados en 171 lotes, mientras que en 2016 fueron 1476 fardos de lana integrados en 183 lotes. Cada establecimiento definió, de acuerdo a su estrategia productiva y empresarial, el momento de esquila para cada lote de animales (por ejemplo, ovejas en invierno, preparto y borregos en primavera). En la primera zafra analizada, el período de crecimiento de lana fue de 365 días, la temperatura media diaria fue 18,4 °C y las precipitaciones totales 1178 mm, mientras que durante la segunda, el período de crecimiento fue de 369 días, la temperatura media diaria fue 17,2 °C y las precipitaciones totales 1672 mm.

La cosecha de lana fue realizada por empresas de esquila acreditadas «grifa verde», de acuerdo a lo establecido en las normas para el acondicionamiento de lanas del Secretariado Uruguayo de la Lana (SUL) (SUL, 2004). En cada establecimiento, dentro de cada año y momento de esquila, se tomaron muestras de calado y de puño de la lana vellón. El muestreo de caladuras siguió las regulaciones de la International Wool Textile Organisation (IWTO) referentes a los ensayos de rendimiento y finura (IWTO, 2011a) y al ensayo de color (IWTO, 2007a), y el muestreo de lana en mecha siguió un protocolo interno basado en las regulaciones de la IWTO para extracción de mechas (IWTO, 2007b). Los muestreos fueron realizados por personas capacitadas que actuaron como representantes acreditados del Laboratorio Tecnológico del Uruguay (LATU), según lo indican las correspondientes regulaciones de la International Wool Textile Organisation.

Análisis en laboratorio

Una vez extraídas e identificadas las muestras fueron enviadas por los representantes acreditados al Laboratorio de textiles, lana bruta, tops y cueros del LATU, laboratorio acreditado para los métodos aplicados según la Norma ISO 17025 por UKAS del Reino Unido, y laboratorio licenciado por la International Wool Textile Organisation. Una vez en el laboratorio, las muestras de caladuras fueron procesadas de acuerdo al método de ensayo IWTO 19 (IWTO, 2012a). En síntesis, este método requiere: mezclado de la muestra original del lote, submuestreo, lavado, centrifugado, secado, submuestreo para análisis, determinación de extraíbles en etanol, determinación de insolubles en álcalis y determinación de cenizas. En base a los resultados de estos ensayos se calculó la base lana y base materia vegetal.

Luego, sobre la lana lavada en el laboratorio se aplicó el método de ensayo IWTO 28 (IWTO, 2013). Este método incluye: acondicionamiento de la muestra en ambiente estandarizado definido por la norma IWTO 52 (IWTO, 2006), cardado de la muestra, lectura de dos especímenes de ensayo en dos airflows independientes y obtención de resultados de diámetro de la fibra.

Sobre el remanente de la muestra de lana lavada y cardada (incluyendo los especímenes utilizados para la medición en airflow, según lo indica el punto 6.4.1.2 de la norma IWTO 12), se aplicó a continuación el método de ensayo IWTO 12 (IWTO, 2012b). Este método incluye: acondicionamiento de la muestra en ambiente estandarizado definido por la norma IWTO 52 (IWTO, 2006), minicoreo, lectura en Laserscan de cuatro submuestras de al menos 2000 fibras, combinación de lecturas y obtención de resultados de diámetro de la fibra y coeficiente de variación del diámetro.

Variable	Borrego		Capón		Oveja		Total	
	2015	2016	2015	2016	2015	2016	2015	2016
Base lana (%)	64,4	64,9	65,3	64,5	64,4	66,0	64,6	65,5
Base materia vegetal (%)	0,5	0,5	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Diámetro de fibra (μ)	16,3	16,5	18,1	18,2	18,3	18,8	17,9	18,2
CV. diámetro de fibra (%)	21,4	21,6	21,6	21,2	21,3	20,9	22,1	21,8
Largo de mecha (mm)	84,8	88,4	89,6	92,5	84,5	92,6	85,6	91,8
Resistencia de mecha (N/kTex)	31,8	34,8	36,1	39,2	37,7	33,8	36,3	34,8
Luminosidad	69,9	70,6	68,0	69,8	70,5	68,8	69,8	69,3
Amarillamiento	9,1	9,2	9,4	9,3	9,7	9,4	9,5	9,3

Tabla 1. Propiedades textiles de la lana cosechada según año de evaluación por categoría animal y para el total de la lana.

Del mismo modo, sobre la muestra cardada se realizó la determinación del color siguiendo el método de ensayo IWTO 56 (IWTO, 2014). En este método se carda la muestra, se acondiciona según lo establecido en la Norma IWTO 52 (IWTO, 2006) y se realiza la determinación de la luminosidad y amarillamiento (valores Tristimulus X, Y, Z, determinados en un equipo de geometría 45°/0°, con iluminante D65 y observador a 10°).

Una vez recibidas en el laboratorio, las muestras de lana entera fueron submuestreadas siguiendo el método de ensayo IWTO 7 (IWTO, 2011b). Como producto del submuestreo se obtuvieron 60 mechas individuales que fueron acondicionadas y enviadas al Laboratorio de fibras textiles del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria de Bariloche, Argentina. Sobre estas mechas se aplicó el método de ensayo IWTO-30-07 (IWTO, 2007c) para la determinación de la resistencia y largo de mecha y proporción de mechas que rompen en el medio de la mecha. Este laboratorio está acreditado según la Norma ISO 17025 por el Organismo Argentino de Acreditación (OAA) para dicho ensayo.

Análisis de la información

El primer análisis fue orientado a realizar una tipificación de las características relacionadas al procesamiento textil de toda la lana cosechada en cada año de evaluación y de acuerdo a cada categoría animal esquilada. En cada establecimiento, el número de lotes y cantidad de lana dentro de cada categoría animal fue diferente y variable entre años. Por este motivo, dentro de cada año se combinó la información de todos los parámetros textiles evaluados de todos los lotes de cada categoría animal utilizando la metodología indicada en la norma IWTO-31-02 (IWTO, 2002). La aplicación de esta norma genera una media ponderada que contempla todos los kilos de lana para cada valor que toma cada propiedad textil. Las categorías consideradas fueron oveja, borrego y capón. En los casos en los que las ovejas y otros animales adultos fueron esquilados de forma conjunta, se asignó ese lote a la categoría predominante dentro del mismo, siguiendo las normas para el acondicionamiento de lanas del SUL (SUL, 2004).

El segundo análisis determinó la proporción de lana dentro de rangos que se consideran asociados con la potencial

utilización del producto, su eficiencia en el proceso industrial y aspectos comerciales como el precio. Para el estudio del diámetro promedio de fibra, largo y resistencia de mecha y porcentaje de mechas que rompen en el medio de la mecha se utilizaron los rangos descriptos por Nolan (2014), mientras que en el análisis del color (amarillamiento) se utilizaron los rangos descriptos por Botha y Hunter (2010).

Resultados

La lana evaluada en los dos años del proyecto es considerada lana superfina en promedio (rango 16,4 a 18,4 micras) (Tabla 1). La lana de los borregos fue entre 1,6 y 2,5 micras más fina que la de animales adultos, con leves diferencias entre capones y ovejas. Tanto en el total como en cada categoría, en el segundo año de evaluación el diámetro de la fibra fue entre 0,1 y 0,5 micras más grueso.

Para cada propiedad textil en el total de la lana evaluada las diferencias entre años fueron inferiores al 7%. Sin embargo, dentro de las categorías consideradas la resistencia de la mecha fue la variable que consistentemente presentó las diferencias

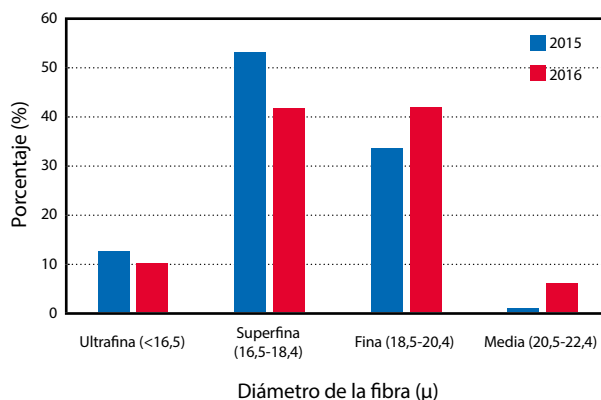


Gráfico 1. Proporción de lana (%) en cuatro rangos de acuerdo al diámetro de la fibra dentro de cada año de evaluación.

más relevantes (8 a 12%). A su vez, para la categoría oveja, el largo de la mecha tuvo una diferencia de 9% entre años.

Entre categorías, exceptuando lo indicado para el diámetro de la fibra, las diferencias observadas mayoritariamente fueron de poca magnitud (materia vegetal, base lana, amarillamiento) o inconsistentes (resistencia de la mecha, luminosidad). Se destaca que el 100% de los lotes analizados presentaron contenidos de materia vegetal inferiores a 1,5%.

Independientemente del año de evaluación, una proporción superior al 90% de la lana fue considerada fina, superfina o ultrafina, y las dos primeras categorías abarcan más del 80% de la lana (Gráfico 1). Un porcentaje menor al 10% de la lana, principalmente en 2016, superó las 20,5 micras. La mayor parte de la lana ultrafina cosechada proviene (>90%) de la categoría borregos, mientras que la lana fina y media es básicamente cosechada de capones y, sobre todo, de ovejas. Las tres categorías animales realizan un aporte sustancial al rango de lana superfina.

La mayor proporción (>95%) de la lana evaluada tuvo una resistencia de la mecha a la tracción superior a 28 N/kTex, y el 90% del producto presentó una resistencia de entre 28 y 43 N/kTex (Gráfico 2). Las tres categorías de animales presentaron lana dentro de los rangos inferiores de resistencia, así como en los superiores. Dentro de la categoría borrego, un 9% del producto presentó resistencia inferior a 28 N/kTex, y fue menor a 4% la cantidad de lana en este rango dentro de las otras categorías. En el otro extremo, las categorías capón, borrego y oveja presentaron 14%, menos del 1% y 5% de lana con una resistencia superior a 43 N/kTex, respectivamente.

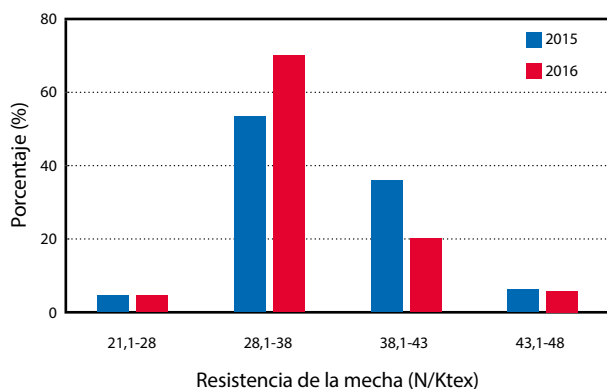


Gráfico 2. Proporción de lana (%) para cuatro rangos de resistencia de la mecha (N/kTex) dentro de cada año de evaluación.

Los rangos de largo de mecha de entre 80 y 100 mm sumaron entre el 78 y 92% de la lana cosechada en ambos años (Gráfico 3). Mientras que en 2015 la lana con largo de mecha superior a 100 mm representó el 1% del total, en 2016 fue el 7%. Un análisis por categoría animal muestra que en promedio para los capones el 94% de la lana estuvo entre 80 y 100 mm, en tanto que para ovejas y borregos en ese rango estuvieron el 84 y 85%, respectivamente. La tendencia observada para el total de la lana es consistente con los resultados de cada categoría; en el año 2015 se registraron más kilogramos de lana con menor largo de mecha.

La proporción de lana con porcentajes muy altos (>75%) de mechas que rompen en el medio fue menor al 5% (Gráfico 4). Entre años se observa un incremento en la cantidad de

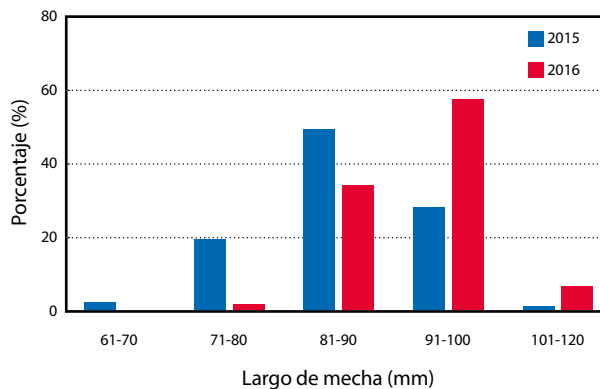


Gráfico 3. Proporción de lana (%) en cinco rangos de acuerdo al largo de la mecha (mm) dentro de cada año de evaluación.

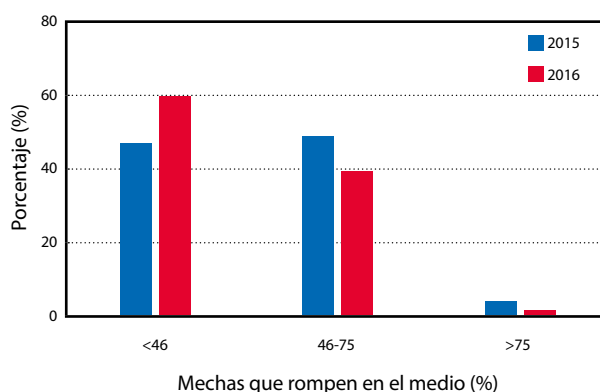


Gráfico 4. Proporción de lana (%) en tres rangos de acuerdo al porcentaje de mechas que rompen en el medio dentro de cada año de evaluación.

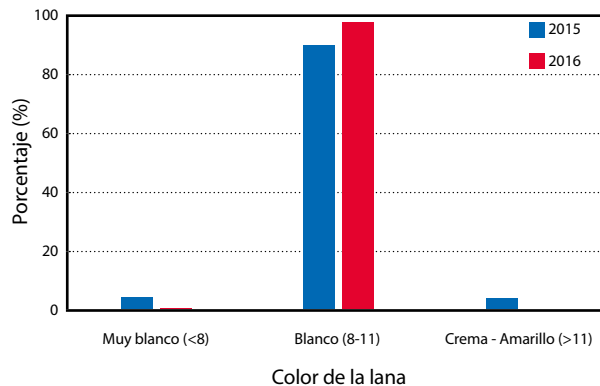


Gráfico 5. Proporción de lana (%) en tres rangos de acuerdo a su color (amarillamiento) dentro de cada año de evaluación.

lana en el rango deseable (lana con porcentajes de mechas que rompen en el medio menor al 46%), que alcanza el 60% en 2016. Esta variable presentó diferencias muy grandes entre categorías. Mientras en borregos y capones el 22 y 17% de la lana estuvo dentro del rango de lanas con porcentajes de mecha que rompen en el medio menor al 46%, en ovejas este valor fue 74%.

Al evaluar el color a través del amarillamiento, se halló que prácticamente el 100% de la lana evaluada era de tipo

blanca, lo cual fue más notorio en el segundo año de evaluación (Gráfico 5). En términos relativos, las ovejas presentaron porcentualmente más lana en los rangos muy blanco y crema, en tanto los borregos y capones tuvieron proporciones muy bajas de lana por fuera del rango del blanco.

Discusión

La hipótesis en este estudio es que si la genética animal y el paquete tecnológico para la producción de lana de alta calidad generado a nivel experimental han sido transferidos exitosamente a los productores consorciados del CRILU, la mayoría de la lana producida en establecimientos del consorcio se adecuaría a los estándares internacionales de calidad para este tipo de fibra. Comparando los resultados obtenidos para las principales propiedades textiles evaluadas con los valores de referencia de mercados internacionales (Mueller, et al., 2013; Nolan, 2014), se puede sostener que la mayoría de las lanas producidas por el grupo de productores participantes cumple con los requisitos de las fibras de alta calidad.

En las dos zafras analizadas en este estudio se obtuvieron finuras promedio del entorno de las 18 micras (Tabla 1). Entre los años 2008 y 2013, el diámetro promedio de la fibra en las zafras australianas se encontró consistentemente entre 20 y 21 micras (Nolan, 2014). Esta información corresponde al promedio de toda la zafra de lana. Sin embargo, el diámetro correspondiente a lanas Merino (<24,5 micras) para el período 2006-2008 en Australia fue en promedio 20,0 micras (Swan, 2010). Del mismo modo, un análisis de cinco zafras de lana Merino en el sur de Argentina (Mueller, et al., 2013) indicó que el diámetro de la fibra fue prácticamente 20 micras. El análisis de las diferencias de diámetro de fibra obtenidas en estos trabajos (Argentina, Australia, Uruguay) confirma el esfuerzo de los productores del CRILU para disminuir el diámetro de las fibras y lograr producir principalmente lanas superfinas. Este descenso es consistente con lo observado en la población Merino que se encuentra comprendida en el sistema de evaluación genética en Uruguay, en el que se ha logrado un progreso genético de -0,64 % anual para el diámetro de la fibra (Ciappesoni, et al., 2014). Teniendo en cuenta que el diámetro de la fibra es la variable más importante y la que explica entre el 64 al 75 % de la variación del precio de la lana vellón (Holman y Malau-Aduli, 2012; Nolan, 2014), las lanas superfinas cosechadas en los establecimientos del CRILU participantes de esta investigación son consideradas de alto valor.

El diámetro de la fibra de la lana en estado natural es el factor que afecta en mayor medida el confort sobre la piel en prendas de lana; lanas con diámetros inferiores a 18 micras asegurarían un excelente confort (Tester, 2014). Incluso, se ha documentado una respuesta positiva sobre el confort con el descenso en el diámetro de la fibra, hasta diámetros de 14-15 micras. En nuestro estudio, y para ambas zafras analizadas, se obtuvieron porcentajes acumulados de lana ultrafina y superfina de 66 y 52 % del total, respectivamente, y porcentajes de lana fina de 33 y 42 %, respectivamente. De acuerdo a los datos suministrados por AWEX y correspondientes a los remates de cinco temporadas (Nolan, 2014), el porcentaje acumulado de lanas ultrafina y superfina es en suma 37 % y el porcentaje de lana fina es 64 %, considerando solo las lanas de menos de 20,4 micras. Por lo tanto, los resultados obtenidos en este trabajo indican que la lana de los establecimientos de CRILU,

además de poseer un menor diámetro promedio de fibra, ha logrado volúmenes relativos de lana en los rangos de menores micronajes, superiores a los registrados en Australia. La distribución de la lana evaluada (principalmente proveniente de categorías jóvenes) indica que una alta proporción sería adecuada para generar prendas que se utilizan directamente sobre la piel sin afectar negativamente el confort.

El precio de la lana Merino se incrementa a medida que aumenta la resistencia a la tracción de la mecha, y llega a ser el segundo factor más determinante del precio de lana en estado natural (Botha y Hunter, 2010). Este factor tiene aún mayor relevancia a medida que se afina la lana, particularmente en lanas ultrafinas. En Australia, existen descuentos para lanas débiles, de menos de 21 N/kTex, que decrecen a medida que la resistencia aumenta (Nolan, 2014), mientras que son premiadas las lanas con resistencias de 38 N/kTex y superiores. Pueden entonces considerarse tres rangos de resistencia a la tracción de la mecha (Elvira, 2005; Nolan, 2014): lanas débiles (<28 N/kTex), lanas resistentes (entre 28 y 38 N/kTex) y lanas muy resistentes (>38 N/kTex). Los valores promedio de resistencia a la tracción obtenidos (36 y 35 N/kTex) para las dos zafras analizadas indican que las lanas producidas en los establecimientos CRILU poseen una adecuada resistencia. En el sur de Argentina, Mueller et al. (2013) determinaron que la resistencia a la tracción de ovejas esquiladas parto se situó entre 29 y 34 N/kTex, levemente inferior a la registrada en Uruguay, determinada en nuestro trabajo; sin embargo, ambas fueron consideradas dentro del rango de lanas resistentes. La mayor proporción fue de lana de resistencia catalogada como adecuada a muy resistente, con variaciones por efecto año entre estos dos rangos. Para el período 2008 a 2013, el porcentaje de lanas débiles en Australia fue sustancialmente superior a lo registrado en nuestro estudio, variando entre 20 y 30 % (Nolan, 2014). En línea con estos resultados, también se registró una variación entre años y, en general, el volumen de la categoría lana resistente es más elevado que el de lana muy resistente. En caso de existir una ponderación económica igual a la de Australia, de acuerdo a la resistencia de la mecha, un muy bajo porcentaje de las lanas del estudio tendrían un descuento por esta variable, mientras que el 25 % y el 42 % de la lana de cada zafra podría acceder a premios.

En la población Merino evaluada en Uruguay se ha establecido que el coeficiente de variación del diámetro de la fibra posee una correlación genética favorable de -0,82±0,08 con la resistencia de la mecha (Ciappesoni, et al., 2008). Por lo tanto, el coeficiente de variación del diámetro es una alternativa para la selección genética indirecta de la resistencia de la mecha, incluso cuando también se selecciona por descenso del diámetro de la fibra (correlación genética desfavorable con resistencia) (Hatcher, et al., 2014). A su vez, en esa población la tendencia genética del coeficiente de variación del diámetro de la fibra muestra un descenso del valor de cría del parámetro desde la generación 2005 hasta la actualidad (INIA y SUL, s.d.). Esto, junto con la correlación genética detectada, puede indicar que los predios evaluados han tenido la posibilidad de haber realizado un proceso de selección indirecta en resistencia de la mecha al incluir animales de la población Merino en sus majadas.

El diámetro de la fibra y la resistencia de la mecha son dos variables que pueden ser muy afectadas por la nutrición, la genética, el manejo y la sanidad de los animales (McGregor, et al., 2016). Una inadecuada o insuficiente sanidad, nutrición

o manejo pueden disminuir el diámetro de la fibra y, paralelamente, la resistencia de la mecha. Los reducidos diámetros de la fibra asociados a buenos valores de resistencia de la mecha hallados en esta investigación podrían indicar que, en promedio, los establecimientos han incorporado genética animal especializada en la producción de lanas muy finas en conjunto con adecuadas prácticas de manejo, alimentación y sanidad para cosechar lanas de buena resistencia. Sin embargo, la categoría borregos presentó una mayor proporción de lana dentro del rango de baja resistencia, por lo cual es necesario tomar recaudos en aspectos nutricionales (alimentación primer verano), de manejo (estrés del destete) y de salud (previo a la generación de inmunidad) para favorecer la disminución de lanas con menos de 28 N/kTex en esta categoría.

Desde el punto de vista industrial, el largo de la mecha incide fuertemente en el largo medio de fibras en la lana peinada (altura media del top o Hauteur). Este parámetro tipifica la materia prima para la hilandería y junto con el diámetro de las fibras define el precio final de la lana peinada (Elvira, 2005), así como también puede influir en el precio de la lana en estado natural (Nolan, 2014). Elvira (2005) indica que largos de mecha menores a los 75 mm pueden ser considerados regulares, largos de entre 75 y 80 mm pueden ser considerados buenos, entre 80 y 85 mm, muy buenos, y mayores a 85 mm, excelentes. En tanto, para lanas ultrafinas a finas se encontró poco efecto en la variación del precio cuando el largo estuvo entre 70 y 100 mm, y se registraron descuentos en el precio por debajo y por encima de ese rango (Nolan, 2014). De acuerdo al criterio de Nolan (2014), en este estudio el volumen de lana que no tendría descuento sería el 97 y el 93 % para el primer y segundo año, respectivamente. El largo promedio ubicado entre 86 y 92 mm, es consistente con el promedio informado por Mueller et al. (2013) para Patagonia. Al igual que para diámetro de la fibra, el largo de mecha es una característica que ha presentado un progreso genético favorable en la población Merino en la última década, lo que puede estar influyendo positivamente en este parámetro de la lana de los animales del CRILU (Ciappesoni, et al., 2014; INIA y SUL, s.d.). En resumen, la lana en este estudio puede clasificarse con largos muy buenos y excelentes.

La posición de la rotura de la mecha, que se determina conjuntamente con la resistencia a la tracción, es una medida de la posición en la que rompe la mecha durante la tracción, clasificándose en base, medio o punta. Si la rotura se produce en el medio, ambas secciones resultantes serán de similar longitud y cortas, por lo tanto no se obtendrá descarte durante los procesos de cardado y peinado, y el largo promedio de fibra será más corto que el esperado. Sin embargo, cuando las roturas se producen en la punta o en la base, durante el cardado y peinado se generará un descarte de aquellas fibras cortas, pero el trozo de fibra que no es descartado será de mayor longitud produciendo tops con largos promedio de fibra mayores y más deseables. La industria topista prefiere lanas con porcentajes bajos a medios de roturas en el medio. Para los propósitos de este estudio, el porcentaje de roturas en el medio para un lote se considera bajo, medio o alto de acuerdo a los rangos establecidos (Gráfico 4). A pesar de que esta variable debería ser considerada junto con la resistencia de la mecha, dado que si la mecha posee alta resistencia, el punto de ruptura pierde gradualmente relevancia, los resultados globales de este trabajo indican que es muy bajo el porcentaje de lana que posee una alta proporción de mechas que rompen en el medio de la mecha. Esta información indicaría un buen

comportamiento industrial de las lanas del CRILU respecto a esta propiedad, sin embargo, es importante considerar que incluso lanas finas con porcentaje medio de ruptura pueden tener descuentos en el precio (Nolan, 2014). En general, la esquila de las ovejas estudiadas fue realizada en el preparto, mientras que en las categorías solteras fue realizada en el fin del invierno e inicios de primavera (momento de cambios importantes en la oferta y calidad del forraje que consumen los ovinos). Por ello, los cambios bruscos en el perfil del diámetro y los diámetros menores no necesariamente quedarían en la zona media de la fibra y por tanto no deseable (Sacchero y Mueller, 2007; McGregor, et al., 2016). Sin embargo, se registró un porcentaje medio de mechas que rompen en el medio, aproximadamente de 40%, que hipotéticamente podría estar asociado a los cambios nutricionales (calidad y disponibilidad de forraje) y de manejo (destete y sanidad) en torno al verano, lo cual requiere de más investigación nacional para determinar la mejor estrategia para minimizarlo.

El color y brillo en la lana son propiedades críticas para el resultado del proceso de teñido (Elvira y Albertori, 2009). El teñido de la lana es un proceso aditivo y, por lo tanto, el color original es el color más claro que puede adquirir luego del teñido. Si se desea un producto color pastel claro, es necesario que la lana originalmente sea muy blanca y brillante, en tanto lanas amarillentas pueden ser utilizadas para la generación de productos teñidos con colores oscuros. Una determinación del grado de blanco y de brillo en 454 lotes de lana Merino en Patagonia (Argentina) halló que, independientemente del momento de esquila y región agroecológica, las lanas producidas eran de buen brillo (68,9 de Y) y en promedio muy blancas (7,7, Y-Z) (Elvira y Albertoli, 2009). Para Australia, se ha estimado que menos de un 3 % de la zafra tendría valores de 7 unidades tricromáticas en amarillamiento, con un 80 % de la lana con valores superiores a 8,5 (Hebart y Brien, 2009). Adicionalmente, el promedio de Y-Z (amarillamiento) para las progenies nacidas en 2007 de siete núcleos de información del Sheep CRC en Australia fue 7,8 unidades (Hatcher, et al., 2010). En Nueva Zelanda (Wuliji, et al., 1999), trabajando con núcleos de selección en Merino, los valores de amarillamiento en las progenies se encontraron en el rango ligeramente cremoso (10,5-12,5), de acuerdo con New Zealand Wool Testing Authority (NZWTA, 2017). En comparación, las lanas de este estudio poseen valores superiores en amarillamiento y similares en brillo en comparación con los reportados para Argentina, sin embargo, no es posible llegar a conclusiones contundentes en términos de comparación de la información de Oceanía debido a su variabilidad. Desde el punto de vista genético, se ha detectado una correlación favorable entre amarillamiento y diámetro de la fibra (Wuliji, et al., 2001), lo cual apoya la hipótesis de que en los establecimientos participantes del CRILU, orientados a la producción de lanas superfinas y ultrafinas, se está mejorando su color (menor amarillamiento). Finalmente, considerando los rangos establecidos por NZWTA (2017) o Botha y Hunter (2010), la lana cosechada en los establecimientos CRILU puede considerarse lana blanca a muy blanca, con baja presencia de lana en el rango de lanas amarillas.

Un alto contenido de materia vegetal se considera una desventaja dado que su eliminación durante el procesamiento de la lana eleva los costos de producción (Nolan, 2014). En Australia los descuentos son relativamente menores para lanas con menos del 1,5 % de contenido de materia vegetal, y las penalizaciones importantes comienzan cuando la materia vegetal se aproxima o supera el 2%; los lotes con menos del

2% de materia vegetal representaron el 50% de esa muestra. En Argentina, el 95% de los lotes comerciales de lana Merino patagónica presenta contenidos vegetales menores a 1% (Mueller, et al., 2013). La totalidad de la lana cosechada en los establecimientos CRILU no estaría sujeta a descuentos por contenido vegetal en el mercado australiano y es similar a la lana patagónica en su bajo contenido de materia vegetal. Se destaca que los establecimientos participantes en su mayoría se encuentran en la región basáltica y dentro de ella ocupando los suelos más superficiales. Estos suelos poseen una vegetación herbácea, con especies de bajo porte, donde los arbustos son poco frecuentes (Berretta, 1998). Estas características de la vegetación, en conjunto con el acondicionamiento durante el proceso de cosecha de la lana, en el que se remueven las zonas potencialmente afectadas por materia vegetal (SUL, 2014), podrían explicar los resultados obtenidos en esta característica.

Finalmente, otro aspecto relevante, aunque no evaluado en este estudio, para la industria textil en la fabricación de prendas de alta calidad es el contenido de fibras coloreadas y pigmentadas (Foulds, et al., 1984). Estas fibras pueden ser producidas por los animales (origen genético), o pueden ser adquiridas durante la producción y/o cosecha de la lana (origen ambiental). El control de estas fibras indeseables requiere conocer el origen, vigilancia continua, rigurosa selección y adecuadas prácticas de manejo (Fleet, et al., 1995; SARDI, 2000). En poblaciones que poseen un proceso de selección donde la pigmentación es motivo de descarte de animales y donde se aplica el protocolo de cosecha y acondicionamiento de lana (SUL, 2004) utilizado en nuestro estudio, se han reportado excelentes valores (<50 fibras coloreadas/kg de top; De Barbieri, et al., 2014c).

Conclusiones

De acuerdo a las propiedades textiles evaluadas, la lana producida por los consorciados del CRILU que participaron de este trabajo puede ser considerada un producto de alto valor, que permitiría un eficiente proceso industrial y productos finales de elevada calidad. Se obtuvo un alto porcentaje de lanas ultrafinas, superfina y finas, con adecuado nivel de color, de resistencia y largo de la mecha, y de contenido de materia vegetal. Estos aspectos repercuten positivamente en el precio potencial que puede recibir el productor y la industria topista nacional orientada mayoritariamente a la exportación.

El trabajo previo dirigido a la producción de lanas de alto valor ha sido exitosamente implementado en el sector comercial, lo que se refleja en la producción y cosecha de un producto de excelente calidad. Se destacan como posibles motivos de esta implementación exitosa el trabajo continuo realizado en los últimos 20 años, con un enfoque público-privado, focalizado en la investigación a nivel experimental de un nuevo producto, acompañado con difusión y transferencia, ligado, por ejemplo, al Proyecto Merino Fino, al Club Merino Fino y al Consorcio Regional de Innovación de Lanos Ultrafinas.

Reconocimientos

Los autores desean agradecer a los productores y empresas de esquila que participaron del proyecto, al Sr. Luis Moreno por su labor en la etapa de esquila y muestreo, y a las autoridades de CRILU, LATU e INIA por apoyar este em-

prendimiento. El proyecto fue financiado en forma conjunta por el LATU e INIA.

Referencias

- AWTA, 2016. *Trends within micron range* [En línea]. Kensington: AWTA. [Consulta: 19 de setiembre de 2016]. Disponible en: <http://www.awtawooltesting.com.au/index.php/en/component/edocman/trends-within-micron-range-16>
- Berretta, E.J., 1998. Principales características climáticas y edáficas de la región de Basalto en Uruguay. En: Berretta, E.J., ed., 1998. *Seminario de actualización en tecnologías para basalto*. Montevideo: INIA. (Serie Técnica, 102). pp.3-10.
- Botha, A.F. y Hunter, L., 2010. The measurement of wool fibre properties and their effect on worsted processing performance and product quality. Part 1: the objective measurement of wool fibre properties. En: *Textile Progress*, 42(4), pp.227-339.
- Ciappesoni, G., Montossi, F., De Barbieri, I., Gimeno, D. y Aguilar, I., 2008. Impacto de un núcleo de selección en la mejora genética de la raza Merino en Uruguay. En: SUG, 2008. *Primeras Jornadas de Genética del Uruguay*. Montevideo: SUG, p.236.
- Ciappesoni, G., Gimeno, D. y Coronel, F., 2014. Genetic progress in sheep evaluation in Uruguay. En: *Archivos Latinoamericanos de Producción Animal*, 22, pp.73-80.
- Cottle, D.J., 2010. World sheep and wool production. En: Cottle, D.J., ed., 2010. *International sheep and wool handbook*. Nottingham: Nottingham University Press. pp.1-49.
- De Barbieri, I., Montossi, F., Berretta, E., Dighiero, A., Mederos, A., Martínez, H., Zamit, W., Levratto, J. y Costales, J., 2014a. Producción y calidad de lana sobre campo natural – I. En: *Alternativas tecnológicas para los sistemas ganaderos del Basalto*. Tacuarembó: INIA. (Serie Técnica, 217). pp.321-326.
- De Barbieri, I., Montossi, F., Berretta, E., Mederos, A., Martínez, H., Bentancur, M., Zamit, W., Levratto, J. y Lima, G., 2014b. Producción y calidad de lana sobre campo natural – II. En: *Alternativas tecnológicas para los sistemas ganaderos del Basalto*. Tacuarembó: INIA. (Serie Técnica, 217). pp.327-330.
- De Barbieri, I., Preve, F., Montossi, F., Rovira, F., Frugoni, J., Levratto, J. y Garín, M., 2014c. Fibras coloreadas en tops de lana superfina. En: *Alternativas tecnológicas para los sistemas ganaderos del Basalto*. Tacuarembó: INIA. (Serie Técnica, 217). pp. 352-354.
- De Barbieri, I., Ciappesoni, G., Ramos, Z., Mederos, A., Pérez Jones, J., Donagay, F., Fros, A., Dutra, F., Grattarola, M., Gimeno, D. y Montossi, F., 2015a. Innovaciones institucionales en el complejo textil-lanero del Uruguay: Los casos del Proyecto Merino Fino y el Consorcio Regional de Innovación de Lanos Ultrafinas. En: *Memorias de la XXIV Reunión ALPA*. Puerto Varas: ALPA. p.764.
- De Barbieri, I., Jaurena, M. y Montossi, F., 2015b. Managing forage allowance of natural grasslands for sustainable superfine wool production in Uruguay. En: Swick, R.A., ed., 2015. *Recent advances in animal nutrition – Australia*. Armidale: University of New England. pp.45-46.
- Elvira, M., 2005., Características de lana Merino e importancia en el procesamiento industrial. En: *Boletín Asociación*

- Argentina de criadores de Merino (Argentina)*, Año XIII (49), pp.231-238.
- Elvira, M. y Albertoli, S., 2009. El color de lana Merino del Chubut. En: *Anuario Merino Argentina*, pp.30-36.
- Fleet, M., Foulds, R., Pourbeik, T., McInnes, C., Smith, D. y Burbidge, A., 1995. Pigmentation relationships among young Merino sheep and their processed wool. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 35, pp. 343-351
- Foulds, R.A., Wong, P. y Andrews, M.W., 1984. Dark fibres and their economic importance, *Wool Technology and Sheep Breeding*, 32, pp. 91.
- Hatcher, S., Hynd, P.I., Thornberry, K.J. y Gabb, S., 2010. Can we breed Merino sheep with softer, whiter, more photostable wool? En: *Anim. Prod. Sci.*, 50, pp.1089-1097.
- Hatcher, S., Gardner, G.E., Gill, S.D., Lee, S., Swan, A.A. y Van Der Werf, J.H.J., 2014. A science-based approach to breeding the future Merino. En: *World Federation of Merino Breeders. Proceedings of the 9th World Merino Conference*. Stellenbosch: World Federation of Merino Breeders. pp.1-15.
- Hebart, M. y Brien, F., 2009. Genetics of wool colour in the south Australian selection demonstration. En: *Proc. Assoc. Advmt. Anim. Breed. Genet.* pp.500-503.
- Holman, B.W.B. y Malau-Aduli, A.E.O., 2012. A review of sheep wool quality traits. En: *Annual Review & Research in Biology*, 2(1), pp.1-14.
- INIA y SUL, 2017. *Raza Merino: tendencias genéticas* [En línea]. Montevideo: INIA, SUL. [Consulta: 27 de junio de 2017]. Disponible en: <http://www.geneticaovina.com.uy/tendenciasraza.php?razacod=8&miga=2>
- International Organization for Standardization, 2000. ISO/IEC 17025: *General requirements for the competence of testing and calibration laboratories*. Ginebra: ISO.
- International Wool Textile Organisation, 2002. IWTO-31: *Calculation of IWTO combined certificates for deliveries of raw wool*. Brussels: IWTO.
- International Wool Textile Organisation, 2006. IWTO-52: *Conditioning procedures for testing textiles*. Brussels: IWTO.
- International Wool Textile Organisation, 2007a. Regulations: *IWTO Colour test Regulations for raw wool. Latest amendment issue July 2007*. Brussels: IWTO.
- International Wool Textile Organisation, 2007b. Regulations: *IWTO Staple test Regulations. Latest amendment issue July 2007*. Brussels: IWTO.
- International Wool Textile Organisation, 2007c. IWTO-30: *Determination of staple length and staple strength*. Brussels: IWTO.
- International Wool Textile Organisation, 2011a. Regulations: *IWTO Core Test Regulations. Latest amendment issue July 2011*. Brussels: IWTO.
- International Wool Textile Organisation, 2011b. IWTO-7: *Sub-sampling staples from grab samples*. Brussels: IWTO.
- International Wool Textile Organisation, 2012a. IWTO-19: *Determination of wool base and vegetable matter base of core samples of raw wool*. Brussels: IWTO.
- International Wool Textile Organisation, 2012b. IWTO-12: *Measurement of the mean and distribution of fibre diameter using the Sirolan-Laserscan fibre diameter analyser*. Brussels: IWTO.
- International Wool Textile Organisation, 2013. IWTO-28: *Determination by the airflow method of the mean fibre diameter of cores samples of raw wool*. Brussels: IWTO.
- International Wool Textile Organisation, 2014. IWTO-56: *Method for the measurement of color of raw wool*. Brussels: IWTO.
- McGregor, B., de Graaf, S. y Hatcher, S., 2016. On-farm factors affecting physical quality of Merino wool. 1. Nutrition, reproduction, health and management. En: *Small Rumin. Res.*, 137, pp.138-150.
- Montossi, F., De Barbieri, I., Ciappesoni, G., Ganzabal, A., Banchero, G., Luzardo, S., San Julian, R., 2013. Intensification, diversification, and specialization to improve the competitiveness of sheep production systems under pastoral conditions: Uruguay's case. En: *Anim. Front.*, 3, pp.28-35.
- Mueller, J.P., Elvira, M.G., Sacchero, D.M., 2013. Animal fibers in Argentina: production and research [En línea]. En: *64 th EAAP Annual Meeting*. Nantes, Francia (25-30 de agosto de 2013). Nantes: EAAP. pp.25-30. [Consulta 21 de junio de 2017] Disponible en: http://old.eaap.org/Previous_Annual_Meetings/2013Nantes/Papers/Published/S43_12.pdf
- NZWTA, s.d. *Colour measurement* [En línea]. Ahuriri: NZWTA. [Consulta: 21 de junio de 2017]. Disponible en: <https://www.nzwta.co.nz/assets/Docs/technical-details/colour-measurement.pdf>
- Nolan, E., 2014. *The economic value of wool attributes phase 2. A report prepared for Australian Wool Innovation* [En línea]. Sydney: University of Sydney. [Consulta: 19 de setiembre de 2016] Disponible en: <https://www.wool.com/globalassets/start/about-awi/publications/wool-attributes.pdf>
- Organización Internacional de Normalización. 2005. ISO/IEC 17025:2005: *Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y de calibración*. Ginebra: ISO
- Rowe, J.B., 2010. The Australian sheep industry - undergoing transformation. En: *Anim. Prod. Sci.*, 50, pp.991-997.
- Sacchero, D. y Mueller, J., 2007. Diferencias en el perfil de diámetro de fibras, largo de mecha y resistencia a la tracción de la lana, en ovejas de una majada. En: *Revista de Investigaciones Agropecuarias*, 36(2), pp.49-61.
- SARDI. 2000. Wool Contamination - Pigmented & heavily Medullated Fibres, SARDI Fact Sheet 62-10 Version 4, Malcolm Fleet, South Australian Research & Development Institute, Turretfield Research Centre. pp. 8.
- SUL., 2004. *Normas para el acondicionamiento de lanas* [En línea]. Montevideo: SUL [Consulta: 20 de setiembre de 2016]. Disponible en: <http://www.sul.org.uy/sitio/Publicaciones>
- Swan, P., 2010. The future of wool as an apparel fibre. En: Cottle, D.J., ed., 2010. *International sheep and wool handbook*. Nottingham: Nottingham University Press. pp.647-660.
- Tester, D., 2014. Wools of 18 microns and finer provide next-to-skin comfort. En: Deb Maxwell, ed., 2014. *Concept to impact: a compilation of sheep CRC outcomes 2007-2014*. Adelaide: Sheep CRC. pp.84-85.
- Wuliji, T., Dodds, K., Land, J.T., Andrews, R. y Turner, P., 1999. Response to selection for ultrafine Merino sheep in New Zealand. En: *Livest. Prod. Sci.*, 58, pp.33-44.
- Wuliji, T., Dodds, K.G., Land, J.T.J., Andrews, R.N. y Turner, P.R., 2001. Selection for ultrafine Merino sheep in New Zealand: heritability, phenotypic and genetic correlations of live weight, fleece weight and wool characteristics in yearlings. En: *Anim. Sci.*, 72, pp.241-250.

ÍNDICE DE AUTORES

Armeli Minicante, Simona	44	González, Leticia	17, 67
Aubriot, Luis.	7	Haakonsson, Signe	7, 67
Betancur, Oscar.	31	Hirsch, Federica	7, 67
Blanco, Carlos Nicolás.	31	Hurtado, Joaquín	44, 67
Bonilla, Sylvia	7	Jachmanián, Iván	37, 67
Bonner, Martín	58	Kruk, Carla	17, 67
Bussi, Juan	37	Laporta, Martín	17, 67
Castiglioni, Jorge.	37	Montossi, Fabio.	58, 67
Cerdá, María Fernanda	44	Pérez, Víctor	58, 67
De Barbieri, Ignacio	58	Ramos, Julián Andrés	31, 67
De Bon, Micaela	44	Ramos, Zully.	58, 67
Delbene, Lucía	7	Sacchero, Diego	58, 67
de los Santos, Jorge	31	Saravia, Celmira	31, 67
de Souza, Romina	31	Scarabino, Fabrizio	17, 67
Enciso, Paula	44	Silva, Ana I.	50, 67
Ferrando, Ma Eugenia.	50	Somma, Andrea	7, 67
Ferreira, Álvaro	31	Vélez-Rubio, Gabriela	17
Ferreira, Elizabeth	50	Vieitez, Ignacio	37, 67
Gamazo, Pablo	31	Volonterio, Elisa	37, 67
González-Etchebehere, Lucila	17, 67	Zabaleta, María	17, 67

ÍNDICE TEMÁTICO

A

Accidentes de tránsito 50
Aceite de girasol 37, 39, 42
Aceites vegetales 37
Agricultura intensiva 9, 14
Agua potable 7-8
Agua termal 31-33
Ahorro de energía 31-32
Alcohol 38, 50-51, 53, 55-57
Algas rojas 17-18, 44-45
Amarillamiento 58, 60-61, 63
Amphiroa beauvoisii 22
Análisis de aliento 50
Antártida 44-45, 48
Aspersores 32, 35

B

Bella Unión 32
Biocombustible 37-38
Biocombustibles líquidos 37
Biodiesel 37-38, 43
Biodiversidad 14-15, 18, 68
Biogasoil 37-38, 42
Brachidontes rodriguezii 19
Bryopsis spp. 20

C

Cabo de Santa María 19
Cadenas hidrocarbonadas 38
Calefacción 31-36
Calibración 50-57, 65
Calidad de agua 7-8, 13-16, 68
Celdas de Grätzel 44
Celdas de tipo DSSC 44
Celdas solares 44
Ceramium spp. 20
Cerro Rivero 17, 19-24, 26-28
Cerro Verde 17, 19-24, 26-29
Chlorophyta 17, 29
Chondracanthus teedei 24
Chthamalus bisinuatus 19, 27
Cianobacterias 8, 14-15, 68
Clorofitas 17-18, 20-21, 23, 26-28
Codium decorticans 24
Color 9, 23, 45, 47-48, 59-61, 63-65
Combustibles fósiles 37
Conducir 42, 50, 57
Conservación 7-8, 15, 26, 28-29, 68
Conversión catalítica 38
Corallina officinalis 24, 27

Costa atlántica 17-19, 26, 28
Cracking 37-38, 41-43
Cryptopleura 20, 24, 28
Cryptopleura ramosa 20, 24, 28
Cuenca 8-16

D

Dasya sp. 21-22, 27
Decarbonilación 38, 42
Decarboxilación 38, 42
Delesseria lancifolia 44-46, 48
Diámetro de la fibra 58-63

E

Ecosistemas acuáticos 7-8, 14, 68
Efluentes 7-9, 13-15, 32-33
El Cabito 17, 19-24, 26-28
Energía eléctrica 31-32, 34, 44
Energía geotérmica 31, 36
Energías renovables 36-37, 44
Erosión 7, 11, 13-14
Espirómetros 50-52, 54-56
Etanol 45, 50-56, 59
Eutrofización 7-8, 11, 13-15, 18, 68
Evapotranspiración 34

F

Fertilizantes 7, 10-11, 13, 15-16
Fibra 58-63
Ficoeritrina 44-48
Flujo calórico 33-34
Fósforo reactivo 7-8, 13
Fósforo total 7-8, 10-14

G

Grasas 37-38
Grateloupia cuneifolia 24
Grateloupia turuturu 21-22, 27-28, 49
Greendiesel 37-38
Gymnogongrus griffithsiae 24

H

Heladas 31-32, 35-36
Hidrocarburos 37-43
Hidroxigenación 37-38
Hidrotratamiento 37-42
Hipereutrofia 7, 13-14
Hipereutrótico 7-8, 15
Hypnea musciformis 18, 24

I			
Invernáculos	31-33, 35-36	Rhodophyta	17, 28-29
Isomerización	38	<i>Rhodomenia</i> spp.	20
		Río de la Plata	18-19, 29
J		Río Santa Lucía	7-12, 15
Jania rubens	20, 24, 27-28	Rocha	14-20, 26-29
		Rodofitas	17-18, 20-21, 23, 26-28
L		S	
La Coronilla	17, 19, 21, 23, 29	Salto	15, 31-32
Lana	58-65	Sistema Acuífero Guaraní	31
Lanas finas	58-59, 63		
Lanas Ultrafinas	58-59, 62-64	T	
La Paloma	17, 19-21, 23, 28-29	Tambos	7-8, 14-15
Luminosidad	60-61	Termas de Daymán	32
		Textil	9, 58-60, 64
M		Tomate	31-36
Macroalgas	17-20, 22, 24, 26-29	Tortuga verde	19, 26
Materiales de Referencia	50-54, 56-57	Triacilgliceroles	38-39
Matriz energética	36, 38, 45	Triglicéridos	37-38
Mecha	58-65		
Microalgas	14	U	
<i>Myriogloea major</i>	20, 29	<i>Ulva</i> spp	17, 20, 24, 27-28
		Uruguay	7-8, 10-12, 15-22, 26-29, 31-32, 36-39, 44-45, 50-51, 56-59, 62, 64-65
N		V	
Nemesiidae	106, 109, 112	Validación	50, 52, 54, 56
Neutrones	10	Variables ambientales	17, 20, 24-26
Nitrógeno	9-13, 22, 26-31, 47-49, 51, 54, 56, 78-79, 81, 83, 87, 92-94	Vehículos	50-51
Nuevas tecnologías	36, 78		
Nutrientes biológicamente esenciales	107	Z	
		Zafra	32, 58-59, 62-63
O			
Ochrophyta	17		
Ocrofitas	17-18, 20-21, 23, 26-28		
Ovejas	59-63, 65		
P			
Palmaria decipiens	44-48		
Patrones de medida	51		
Pigmentos	17, 44-45		
Pigmentos sintetizados	44		
<i>Porphyra/Pyropia</i> spp.	18, 20, 24		
<i>Pterocladiaella capillacea</i>	18, 24, 27		
Punta del Diablo	17, 19, 21, 23		
R			
Reactor	37-40, 43		
Recursos naturales	7-8, 69		
Renovación de aire	34		
Residuos	10-11, 45		

INNOTEC

REVISTA DEL LABORATORIO TECNOLÓGICO DEL URUGUAY