

ISSN 1810-634X

REVISTA de la SOCIEDAD QUÍMICA DEL PERÚ

REVISTA TRIMESTRAL

VOLUMEN 85 N° 3
JULIO - SETIEMBRE 2019



INSTITUCIÓN CIENTÍFICA FUNDADA EN 1933

LIMA, PERÚ

SOCIEDAD QUÍMICA DEL PERÚ
CONSEJO DIRECTIVO
(marzo 2018 – marzo 2020)

Presidente	: MSc. Graciela Untiveros Bermúdez
Vice-Presidente	: Mg. Helmer Helí Lezama Vigo
Tesorero	: Dr. Juan Manuel Parreño Tipián
Secretaria	: Quím. Claudia Cecilia Villanueva Huerta
Director Administrativo	: Mg. Neptalí Ale Borja
Director Biblioteca	: Mg. Julio Reynaldo Ruiz Quiroz
Vocales	: Ing. Richard Hernández Morán MSc. Christian Jacinto Hernández Mg. Lía Elis Concepción Gamarra Lic. Norma Cuizano Vargas Q.F. Mario Bolarte Arteaga Ing. Quím. Hernán Zapata Gamarra

Comisión de Economía y Finanzas

Presidenta: Ing. Quím. Flor de María Sosa Masgo

Comisión de Publicaciones

Presidenta: Dra. Ana Cecilia Valderrama Negrón

Comisión de Actuaciones Científicas

Presidenta: MSc. Luz Castañeda Pérez

**INSTITUCIONES Y EMPRESAS PROTECTORAS DE LA
SOCIEDAD QUÍMICA DEL PERÚ**

**UNIÓN DE CERVECERÍAS BACKUS Y JHONSTON S.A.A.
FACULTAD DE FARMACIA Y BIOQUÍMICA – UNMSM**

REVISTA de la SOCIEDAD QUÍMICA DEL PERÚ

(Rev Soc Quím Perú)

ISSN 1810 – 634X

Revista Trimestral

Comité Editor

Editor en Jefe : Ana Cecilia Valderrama Negrón

Miembros : Julio Santiago Contreras

Lisveth Flores Del Pino

Julio Reynaldo Ruiz Quiroz

Comité Consultivo

Alarcón Cavero, Hugo

Univ. Nac. de Ingeniería, Perú

Caramantín Soriano, María

Universidad de Talca, Chile

Cedrón, Juan Carlos

Universidad de La Laguna, España

Ceroni Galloso, Mario

Univ. Nac. Mayor de San Marcos, Perú

Collantes Díaz, Ingrid

Univ. Nac. de Ingeniería, Perú

Dávalos Prado, Juan

Consejo Sup. de Invest. Científica, España

Flores Del Pino, Lisveth

Univ. Agraria La Molina, Perú

Gamboa Fuentes, Nadia

Pontificia Universidad Católica del Perú

Gómez Valdez, Badhin

Univ. Católica de Santa María, Arequipa, Perú

Gonzáles Gil, Patricia

Pontificia Universidad Católica del Perú

Guzmán Duxtán, Aldo Javier

Univ. Nac. Mayor de San Marcos, Perú

Kong, Maynard

Pontificia Universidad Católica del Perú

La Rosa Toro Gómez, Adolfo

Univ. Nac. de Ingeniería, Perú

Lock de Ugaz, Olga

Sociedad Química del Perú

Muñoz Jáuregui, Ana María

Univ. San Ignacio de Loyola, Perú

Pannia Espósito, Breno

Universidad de Sao Paulo, Brasil

Páucar Cuba, Karin

Univ. Nac. de Ingeniería, Perú

Picasso Escobar, Gino

Univ. Nac. de Ingeniería, Perú

Quintana Cáceda, María

Univ. Nac. de Ingeniería, Perú

Rodríguez Best, Angélica

Univ. Nac. Mayor de San Marcos, Perú

Romero Ramos, Celso

Instituto Butantan, Brasil

Rueda, Juan Carlos

Pontificia Universidad Católica del Perú

Ruiz Quiroz, Julio

Univ. Nac. Mayor de San Marcos, Perú

Santiago Contreras, Julio

Univ. Nac. Mayor de San Marcos, Perú

Uribe, Carmen Luisa

Univ. Nac. de Ingeniería, Perú

Revista indizada en el Chemical Abstracts, SciELO y Latindex

Sede: Av. Nicolás de Araníbar 696 Santa Beatriz – Lima 01

Casilla Postal 14-0576 – Lima 14 Perú

Teléfono (511) 472-3925

e-mail: sqperu@gmail.com

Portal web: www.sqperu.org.pe

Ley 26905 – Hecho el depósito legal a la Biblioteca Nacional del Perú

Certificado N° 95-1567

Vol 85

JULIO - SETIEMBRE 2019

N° 3

En el Perú: N° suelto S/.15

Suscripción anual: S/. 60.00

En el extranjero: Suscripción anual: \$50.00

CONTENIDO
(Vol. 85 – Nº 3 – 2019)

Editorial	291
Trabajos Originales	
- Aplicación de voltamperometría de redisolución anódica para la determinación de antimonio, por Hugo Ítalo Romero-Bonilla, Thalia Gabriela Vera-Infante, Felipe Fernando Redrovan-Pesantez, Jennifer del Cisne Jumbo-Sari, Freddis Franco Pesantez	293
- Caracterización físico-química, microscópica de barrido y dispersión de rayos X del mucilago de cladodios de <i>Opuntia ficus indica</i> en la región alta de Tacna, por Juan José Vargas Mamani, Gabriela Victoria Vera Vargas, Nicole Andrea Suppé Tejada	305
- Efecto de la inclusión de diferentes fuentes lipídicas en la dieta de engorde sobre el perfil de ácidos grasos poliinsaturados en filete de paco <i>Piaractus brachyomus</i> , por Wilfredo Vásquez Quispesivana, Raúl Porturas Olaechea, Fredy Crispin Sánchez	315
- Evaluación de la vida útil de los aceites de Sacha Inchi (<i>Plukenetia huayllabambana</i> y <i>Plukenetia volubilis</i>) microencapsulados, por Rafael Alarcón Rivera, María del Carmen Pérez Camino, Nancy Chasquibol Silva	327
- Propiedades fisicoquímicas, funcionales y estructurales de almidones nativos y acetilados obtenidos a partir de la papa (<i>Solanum tuberosum</i>) var. 'Única', por Patricia Martínez, Fiorela Peña, Yelena Gómez, Guino Vargas, Carmen Velezmoro	338
- Remoción de lignina en el pretratamiento de cascarilla de arroz por explosión con vapor, por Ricardo Aaron Naveda Rengifo, Paola Aurelia Jorge Montalvo, Lisveth Flores del Pino, Lizardo Visitación Figueroa	352
- Remoción de materia orgánica en reactor anaerobio de manto de lodos de flujo ascendente en el tratamiento de aguas residuales del camal de Huancavelica, por Jerson Castro Olarte, Yon Cecilio Cabrera, Teresa Jesús Gonzales Huamán, Liliana Sumarriva Bustinza	362
Informaciones	376

Revista Arbitrada

Derechos reservados: Prohibido el uso total o parcial del material de esta revista sin indicar la fuente de origen.
Nota: Las referencias comerciales que aparecen en los trabajos no constituyen una recomendación de la Sociedad Química del Perú.

INSTRUCCIONES PARA LOS AUTORES

La Revista de la Sociedad Química del Perú publica trabajos originales e inéditos de carácter científico, tecnológico y técnico en el campo de las ciencias químicas. La Revista acepta preferentemente los trabajos que expresen resultados valiosos, producto de las investigaciones científicas básicas o aplicadas, así como, los de divulgación que, por su importancia y la claridad de su exposición, constituyan un material valioso para la comunidad científica y tecnológica.

La Revista, en formato impreso o electrónico, está dividida en las siguientes secciones: artículos de investigación, comunicaciones cortas, cartas al editor, artículos de revisión, enseñanza de la química y divulgación.

Los trabajos son recibidos por el Comité Editorial, quien revisará cumplan con las “Instrucciones para los autores”, la ortografía y redacción (incluida la puntuación). A continuación pasa a la Comisión de Publicaciones y Árbitros para que se pronuncien sobre el contenido científico. Si existen observaciones se comunicará al autor corresponsal para que se proceda a levantar dichas observaciones.

Los artículos de investigación son el resultado de un trabajo experimental o teórico, producto de una investigación científica o tecnológica, que aporta un nuevo conocimiento. Se recomienda una extensión entre 10 a 15 páginas a espacio y medio.

Las comunicaciones cortas son trabajos cuya extensión no debe ser mayor a 4 páginas a espacio simple, escritas bajo las mismas características que un artículo de investigación. Están referidos a trabajos cortos concluidos, pero en los que hay urgencia en su publicación.

Las cartas al editor son comunicaciones que brindan la oportunidad para discutir, criticar o ampliar algunos puntos sobre los trabajos publicados en la Revista. Su extensión no debe exceder una hoja a espacio simple.

Los trabajos de revisión se basan en recopilaciones bibliográficas de temas en los que el autor tiene amplia experiencia. La Comisión de Publicaciones encomendará estos trabajos a especialistas en la materia.

Los artículos de enseñanza de la química son aquellos que proporcionan, en especial a los profesores y alumnos, una nueva visión, interpretación o aclaran los conceptos, teorías o experimentos químicos. Los requisitos que deben tener son: originalidad, importancia pedagógica, relevancia y claridad.

Las notas informativas corresponden a temas que no están relacionados a una investigación, pero son artículos que merecen ser divulgados, por ser de gran interés para la comunidad química.

Los autores de los trabajos publicados son los únicos responsables de la autenticidad y opiniones expresadas en los mismos. Todos los autores de un artículo deberán firmar una carta de presentación del trabajo como garantía de haber participado activamente en la investigación y redacción del artículo. Todas las comunicaciones entre la Comisión de Publicaciones y el autor corresponsal se realizarán vía correo electrónico. El autor corresponsal deberá responder los correos electrónicos en el plazo que se señale.

Los autores enviarán sus artículos impresos y en formato electrónico (disco compacto o al correo electrónico sqperu@gmail.com) a la Comisión de Publicaciones, junto con una carta dirigida al editor y abonarán 30 soles por concepto de gastos administrativos, como adelanto del pago de la publicación, no reembolsables.

La publicación de cada trabajo está sujeta al pago de las siguientes sumas:

Cuando todos los autores son socios: S/. 120,00

Cuando todos los autores no son socios: S/. 200,00

Si entre los autores hay socios y no socios: S/. 150,00

Si los autores residen en el extranjero US \$ 110,00

Cuando el número de autores es superior a 3 se añadirá, además, S/. 30,00 por cada autor en exceso.

Si el trabajo es enviado del extranjero, será US \$ 15,00 más por cada autor en exceso.

Por exceso de correcciones de estilo se cobrará después de la segunda, un mínimo de S/. 30,00.

Si alguna parte del trabajo, y a pedido de los autores, necesitara ser impreso a color, asumirán el 100 % del exceso del costo señalado por la imprenta.

The publication of each work is subject to payment of the following ones:

When all the authors are partners of the Peruvian Chemical Society: S/. 120,00

When all the authors are not partners: S/. 200,00

If among the authors there are partners and non partners: S/. 150,00

If the authors reside abroad US \$ 110,00

When the number of authors is superior to 3 it will be paid, also, US \$ 15,00 for each author in excess.

Formato para los artículos

Baje la plantilla de artículo. Los autores pueden solicitar la plantilla de artículo al correo electrónico sqperu@gmail.com

1. El texto completo, debe ser escrito en formato Microsoft Word, tamaño de página A4. Márgenes; izquierdo 3 cm, derecho 3 cm, superior 3 cm, inferior 3 cm. Espacio 2, fuente Times New Roman, estilo de fuente regular (salvo indicación contraria), color de fuente negro (texto y gráficos) y tamaño de fuente 12. Se imprimirá de manera vertical. Todo el texto, excepto el título, debe estar alineado a la derecha y a la izquierda (usar la opción "justificar"). Los decimales deben llevar coma.
2. Los idiomas de publicación son español e inglés.
3. El título del trabajo, que debe ser **breve y claro**, en español y en inglés (este último antes del abstract) se escribe con tamaño de fuente 16, centrado y en negritas. Los nombres completos de los autores aparecerán a continuación con tamaño de fuente 12, el autor corresponsal se identificará con un asterisco. Las instituciones de la cual proceden los autores se escriben con tamaño de fuente 10 e irán a pie de página, donde también sólo el autor corresponsal colocará su correo electrónico después de la dirección postal completa de su institución.
4. Se presentarán dos resúmenes, uno en español y otro en inglés (Abstract), con una extensión aproximada entre 50 y 200 palabras. Las palabras Resumen y Abstract se escriben con tamaño de fuente 14, centrado y en negrita. Además, después del Resumen se deberá incluir entre 3 y 6 palabras clave, en español. Tanto Palabras clave como Key words se escriben a la izquierda del texto, con tamaño de fuente 12 y en negrita.).
5. Deberá respetarse las normas internacionales referentes a la nomenclatura, símbolos y sistemas de medida. Los nombres científicos de género y especie van en cursiva (itálica).
6. El caso de artículos originales y comunicaciones cortas, el texto debe contener las siguientes secciones: Introducción, Parte Experimental, Resultados y Discusión, Conclusiones, Agradecimientos, Referencias. Éstas se escriben con tamaño de fuente 14, en negritas y centradas. Las cartas al editor, artículos de revisión, enseñanza de la química y notas informativas, tendrán las secciones que el autor crea más conveniente.
7. Las tablas, figuras y esquemas, que no deben ser mayores que una página A4, tienen numeración arábica seguido de punto. A continuación se coloca la leyenda que explique su significado. La numeración y leyenda en una tabla, cuyo formato debe ser básico 1, se colocan en la parte superior a diferencia de las figuras y los esquemas que se ubican en la parte inferior. Las figuras deben ser originales y de alta resolución.
8. Las tablas, fotos, figuras y esquemas deben estar incluidos en el documento de Microsoft Word.
9. Las referencias, se citan en el texto correlativamente como superíndice. El número de estas referencias no debe ser excesivo. Deberían fluctuar entre 7 y 15. La sección Referencias se escribe con tamaño de fuente 14, centrado y **en negrita**. Las abreviaturas de la revistas se escribirán según el Chemical Abstracts Service Source Index (<http://www.cas.org/sent.html>) y [List of Journals Indexed in Index Medicus.](http://www.nlm.nih.gov/tsd/serials/lsiou.html) (<http://www.nlm.nih.gov/tsd/serials/lsiou.html>) Las referencias citadas se escribirán con el tamaño de fuente 10 y se seguirá el estilo de Vancouver.

Editorial

Todos hemos recibido con preocupación las noticias sobre el gran número de incendios forestales en la selva amazónica, la más rica reserva de biodiversidad de nuestro planeta. Esta macrocuenca hidrográfica es compartida por casi todos los países de nuestro subcontinente; sin embargo, debemos tener presente que es un ecosistema que le pertenece al mundo, es una gran responsabilidad y no parece que la estemos cumpliendo como corresponde.

Según el Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, de Brasil, el número de incendios detectados desde enero a agosto de 2019 es 80 % mayor respecto al mismo periodo del año anterior. De acuerdo con el Instituto de Pesquisa Ambiental de la Amazonía, de Brasil, esta zona se ha convertido en una nueva frontera de la deforestación por expansión de negocios agropecuarios, donde la práctica de las quemas no era tan activa. Según esta agencia, parecería que la deforestación es la razón del creciente número de incendios y no la sequía, puesto que este año no es más seco que anteriores, y los incendios provocados por agricultores y criadores de ganado siempre se pueden salir de control. Es decir, el factor humano es con mucha seguridad la razón de este desastre ambiental.

Una definición importante que parecemos olvidar es que nuestro planeta es un gran ecosistema global constituido por elementos naturales y artificiales de naturaleza física, química o biológica, socioculturales y sus interacciones, en permanente modificación por la acción humana o natural, que rige y condiciona la existencia y desarrollo de la vida en sus múltiples manifestaciones. Hay dos palabras claves aquí: “global” y “sociocultural”.

Estos incendios son eventos de combustión de materia orgánica. La quema de rastrojos de cultivos y residuos forestales es una mala práctica agrícola aún presente en el mundo, está arraigada en nuestros patrones culturales. La biomasa en llamas libera importantes cantidades de partículas y gases, incluidos los gases de efecto invernadero. Se estima que la quema de biomasa vegetal ha aumentado a escala global en el último siglo, y que el calentamiento global conducirá a incendios más frecuentes y más grandes.

Es necesario recordar que las plantas son sumideros de dióxido de carbono almacenado por la fotosíntesis. Como en toda fuente de combustión, se generan una o varias plumas que dispersan local, regional y, luego, globalmente la mezcla de partículas y gases del proceso. Estas plumas están compuestas por dióxido de carbono, vapor de agua, monóxido de carbono, metano, partículas, aerosoles carbonáceos, hidrocarburos no metánicos (NMHC), hidrocarburos policíclicos aromáticos (PAHs), dioxinas (PCDDs) y furanos (PCDFs) clorados, bifenilos policlorados (PCBs), óxidos de nitrógeno, dióxido de azufre, ozono troposférico, benceno, tolueno, formaldehído, esto es, miles de otros compuestos que dependen del tipo de madera y vegetación que se quema, de la temperatura del fuego y de las condiciones del viento. Es posible identificar en esta lista sustancias irritantes, tóxicas, cancerígenas, mutagénicas, por lo que la exposición crónica es un riesgo para la salud de la población expuesta, además de la pérdida en biodiversidad, con toda seguridad, irreversible.

Nadia Rosa Gamboa Fuentes

Profesora Principal de la Pontificia Universidad Católica del Perú

Rev Soc Quím Perú. 85(3) 2019

APLICACIÓN DE VOLTAMPEROMETRÍA DE REDISOLUCIÓN ANÓDICA PARA LA DETERMINACIÓN DE ANTIMONIO

Hugo Ítalo Romero-Bonilla^{a*}, Thalía Gabriela Vera-Infante^a,
Felipe Fernando Redrovan-Pesantez^b, Jennifer del Cisne Jumbo-Sari^a,
Freddis Franco Pesantez^a

RESUMEN

Se validó un método voltamétrico para determinar la concentración de antimonio en medio acuoso. Se usó la técnica voltamperométrica de redisolución anódica, utilizando un potenciostato. Se aplicó cronoamperometría a $E = -1,2$ V durante 50 s. Se aplicó una voltametría de barrido lineal con potenciales entre $E_i = -1,2$ V y $E_f = 0,5$ V a una velocidad de 20 mV/s. Esto se llevó a cabo en solución electrolítica H_3PO_4 0,5 M, donde se puede observar un incremento en el pico de intensidad de corriente en función de la concentración de las soluciones evaluadas a un potencial de 84,96 mV. Para validar el método se determinó la linealidad, precisión, límite de detección y límite de cuantificación. Se prepararon cuatro concentraciones de antimonio por triplicado, en un rango de 1, 5, 10, 15, 20 mg/L, respectivamente. Se construyó una curva de calibración de concentración experimental expresada como intensidad de corriente (I) vs concentración teórica. La linealidad fue demostrada partiendo del coeficiente de proporcionalidad de 0,9979 con coeficiente de variación (CV) de 18,2 %. El límite de detección y cuantificación tuvieron valores de 1,041 mg/L y 1,718 mg/L, respectivamente.

Palabras clave: validación, electroanalítica, voltamperometría, antimonio.

APPLICATION OF ANODIC REDISOLUTION VOLTAMPEROMETRY FOR THE DETERMINATION OF ANTIMONIUM

ABSTRACT

A voltammetric method was validated to determine the concentration of antimony in aqueous medium. The voltammetric technique of anodic redissolution was used, using a potentiostat. Chronoamperometry was applied at $E = -1,2$ V for 50 s. A linear sweep voltammetry was applied with potentials between $E_i = -1,2$ V and $E_f = 0,5$ V at a speed of 20 mV/s. This was

^a Grupo de Investigación de Aplicaciones Electroanalíticas, Laboratorio de Electroanálisis y Bioenergía, Universidad Técnica de Machala, Ecuador.

^b Facultad de Ciencias Químicas y de la Salud, Universidad Técnica de Machala, carrera de Ingeniería en Alimentos, Machala, Ecuador

*^a hromero@utmachala.edu.ec

carried out in 0,5 M H_3PO_4 electrolytic solution, where an increase in the current intensity peak can be observed as a function of the concentration of the solutions evaluated at a potential of 84,96 mV. To validate the method, linearity, precision, limit of detection and limit of quantification were determined. Four concentrations of antimony were prepared in triplicate, in a range of 1, 5, 10, 15, 20 mg/L, respectively. A calibration curve of experimental concentration expressed as current intensity (I) vs theoretical concentration was constructed. The linearity was demonstrated starting from the coefficient of proportionality of 0,9979 with coefficient of variation (CV) of 18,2 %. The limit of detection and quantification had values of 1,041 mg/L and 1,718 mg/L respectively.

Key words: validation, electroanalytical, voltamperometry, antimony.

INTRODUCCIÓN

La contaminación en el medio ambiente podría causar daños. A fin de reducir la contaminación ambiental y mitigar la degradación resultante del suelo y de los recursos hídricos, se deben determinar las concentraciones de metales pesados¹. Es importante desarrollar métodos analíticos altamente sensibles para evaluar contaminantes en el suelo, el agua y el aire para mejorar la calidad del ambiente y la vida humana².

Las implicaciones ambientales y los efectos adversos sobre los organismos vivos se deben principalmente a la contaminación por metales³. Estas investigaciones documentadas han conducido al desarrollo de una serie de directrices, políticas y leyes ambientales para varios de estos elementos, tales como: As, Cd, Sb, Cr, Cu, Hg, Pb, otros. Sin embargo, existen otros elementos traza, donde todavía hay una brecha en nuestro conocimiento sobre su especiación química, así como su potencial ecotoxicológico⁴.

Actualmente, los métodos más comunes para cuantificar metales son relativamente complejos y abarcan un pretratamiento que lleva mucho tiempo para lograr su separación. Esto resulta bastante costoso⁵ e incluye otros procesos como filtración, centrifugación, vacío o ultrafiltración centrífuga, diálisis y cromatografía líquida de alto rendimiento⁶.

Una de las ventajas de utilizar métodos instrumentales de análisis es que son capaces de detectar y determinar cantidades de analito mucho más pequeñas que los métodos clásicos⁷.

Uno de los principales problemas que se presentan cuando se trabaja con concentraciones a nivel de trazas se da a la hora de informar sobre la presencia o ausencia de un analito determinado. En este sentido, es importante llevar a cabo la determinación tanto del límite de detección como del límite de cuantificación⁸.

En los últimos años ha surgido la necesidad de desarrollar nuevas tecnologías y métodos para la seguridad y el control de calidad en una gama de diferentes aplicaciones⁹.

Los metales pesados son elementos potencialmente tóxicos, cuya presencia en el medio ambiente se ha incrementado notablemente en las últimas décadas, fundamentalmente por la acción del hombre. La contaminación metálica supone una amenaza medioambiental importante para los seres vivos¹⁰. La existencia de Sb en el ambiente es una consecuencia de la utilización de materias primas que contienen este elemento en la fabricación de vidrio, la cerámica, frenos de automóviles, retardantes de llama, etc.¹¹

La exposición a cantidades relativamente altas de antimonio durante un largo periodo de tiempo puede provocar irritación de los ojos, piel y pulmones. Si la exposición continúa se pueden producir efectos más graves, tales como enfermedades pulmonares, problemas de corazón, diarrea, vómitos severos y úlceras estomacales. Estos efectos sobre la salud nos han hecho estar más alerta acerca de los peligros de la exposición al antimonio¹².

La utilización de técnicas electroanalíticas depende de la superficie del electrodo, que debe proporcionar una correlación señal-ruido y además buena reproducibilidad. Para la manipulación de esta técnica se debe aplicar un potencial a un electrodo, y también se debe hacer un seguimiento de la corriente (I) resultante, que se lo realiza en una celda electroquímica en medio acuoso¹³.

La electroquímica es una opción accesible e innovadora para la cuantificación de trazas de metales pesados, se basa en el comportamiento de la corriente y el potencial sobre la superficie del electrodo de trabajo. Asimismo, la voltamperometría constituye una alternativa de amplio espectro, económica y amigable con el medio ambiente.

La detección de iones trazas de metales pesados como el cobre, el plomo y el antimonio es trascendental en el monitoreo de la calidad del medio ambiente y la salud¹⁴. La voltamperometría de redisolución anódica (ARV) es una potente técnica analítica para la detección de metales traza por su alta sensibilidad y reproducibilidad¹⁵.

El análisis de separación electroquímico es reconocido como una de las técnicas más convenientes para la medición de trazas de iones de metales pesados, en particular, debido a su capacidad de pre-concentrar analitos en la superficie del electrodo de trabajo, lo que permite la cuantificación de iones de metales pesados a un nivel bajo microgramos por litro o incluso nanogramos por litro niveles de concentración¹⁶.

La voltamperometría de redisolución anódica pre-concentra el analito mediante su reducción en una película delgada sobre el electrodo de trabajo. Adicionalmente, el potencial se vuelve más positivo y oxida la especie en la solución. La corriente medida durante la oxidación es proporcional a la cantidad de analito que fue depositada¹⁷.

Las ventajas analíticas de las técnicas voltamperométricas incluyen una excelente sensibilidad con amplio rango de concentración lineal útil tanto para especies inorgánicas como orgánicas (1/1012 a 1/10 M), gran cantidad de disolventes y electrolitos útiles, un amplio rango de

temperaturas, tiempos de análisis rápidos (segundos), determinación simultánea de varios analitos, la capacidad de determinar cinética y parámetros mecánicos¹⁸.

La validación de un método analítico es el proceso establecido por los estudios de laboratorio para garantizar el cumplimiento de una serie de requisitos indispensables para la futura aplicación analítica del método. Es necesaria porque proporciona un alto grado de confianza y seguridad del proceso productivo, o del método analítico, así como también en la calidad de los resultados. Estos requisitos son expresados en términos de parámetros analíticos¹⁹. El objetivo final de la validación del método de análisis es asegurar que cada medición futura en el análisis de rutina será lo suficientemente cerca del valor verdadero desconocido para el contenido del analito en la muestra²⁰.

Sin embargo, las técnicas electroquímicas como la voltamperometría ofrecen una alta sensibilidad, mayor precisión y menores costos de operación²¹.

El objetivo de la presente investigación fue desarrollar un método electroanalítico preciso, selectivo y lineal para determinar antimonio mediante una técnica sencilla, de bajo costo y amigable con el medio ambiente como es la voltamperometría de redisolución anódica.

PARTE EXPERIMENTAL

Para la obtención de datos se utilizó un potenciostato PARSTAT multicanal marca Princeton Applied Research con software Versa Studio Potenciostat. Para llevar a cabo el registro de los voltamperogramas, se contó con un sistema de tres electrodos, tales como: carbón vítreo como electrodo de trabajo, electrodo de Ag/AgCl como electrodo de referencia y un electrodo de platino como contraelectrodo.

Toda la cristalería utilizada en el desarrollo del método voltamperométrico se lavó con un detergente libre de metales, luego con agua destilada y posteriormente se colocó en baños de ácido nítrico 1 M, por una hora, finalmente se enjuagó con agua desionizada.

Se preparó un electrolito soporte a partir de ácido fosfórico (H_3PO_4) 0,5 M; grado analítico marca SIGMA-ALDRICH. Además, se necesitó de un estándar de antimonio (Sb) de 1000 mg/L marca AccuStandard, a partir de la cual se prepararon diluciones de 1, 5, 10, 15 y 20 mg/L de Sb en electrolito soporte, para realizar la validación del método. Adicionalmente, se burbujeó nitrógeno al 99 % de pureza para eliminar el oxígeno en el sistema acuoso.

Por su parte, la limpieza del electrodo de trabajo de carbón vítreo se realizó con una solución de alúmina de 0,3 y 0,1 micrones. Para asegurar la limpieza de la celda electrolítica, se empleó lavados con ácido nítrico 1 M, por una hora. Por otro lado, se realizó la activación electroquímica del electrodo de carbón vítreo para obtener una superficie limpia mediante períodos de voltamperometría de 50 ciclos en solución de H_3PO_4 0,5 M con un barrido de potencial $E_i = -1$ V y $E_f = 1$ V a una velocidad de barrido (v) = 20 mV/s

Método electroanalítico

La voltamperometría de redisolución anódica fue la técnica utilizada en este trabajo, para lo cual se realizó en primer lugar una cronoamperometría a $E = -1,2$ V durante un tiempo de pre-concentración de 50 obteniendo la electrodeposición del antimonio metálico (Sb^0) en la superficie del electrodo de carbón vítreo. Seguidamente, se aplicó una voltametría de barrido lineal con potencial inicial (E_i) de $-1,2$ V y un potencial final (E_f) de $0,5$ V a una velocidad de 20 mV/s. El antimonio se oxidó desprendiéndose del electrodo de carbón vítreo a un potencial de $84,96$ mV, lo cual generó un incremento de corriente que se observó en los voltamperogramas. Los análisis fueron realizados a temperatura ambiente y a presión atmosférica.

Validación del método analítico

Con el objetivo de validar el método para la cuantificación de antimonio, se procedió con la determinación de linealidad, precisión y exactitud según lo reportado en la literatura¹⁷.

Linealidad del método

Se prepararon cuatro concentraciones de antimonio por triplicado, en un rango de $1, 5, 10, 15, 20$ mg/L, respectivamente. Se construyó una curva de calibración de concentración experimental expresada como intensidad de corriente (I) vs concentración teórica. Los resultados se procesaron estadísticamente a través de Excel y se determinó: r (coeficiente de correlación lineal), r^2 (coeficiente de determinación), a (intercepto) y b (pendiente).

Se realizó una evaluación de curva de calibración global (construida con más de una curva de calibración de las mismas características) en la cual se realizó una evaluación estadística de prueba *t-Student*, como un mejor indicador del modelo lineal.

Se determinó un valor de t con $n-2$ grados de libertad y se comparó con el valor tabulado de t para el nivel de confianza requerido ($\alpha = 0,05$).

Precisión

Se analizaron 10 muestras para 5 niveles de concentración, a partir de los cuales se determinó la desviación estándar relativa. Según la Food and Drug Administration – FDA (2001), la desviación estándar relativa (RSD) debe ser menor de 20% para concentraciones de nivel bajo, y menor de 15% para las concentraciones medias y altas.

Límite de detección

El límite de detección de un método analítico es la mínima cantidad de analito presente en la muestra que se puede detectar, aunque no cuantificar, a través de las condiciones experimentales descritas para dicho método de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$LOD = \frac{3\sigma_B}{b}$$

Donde: (1)

σ_B = Desviación estándar

b = Pendiente de la curva de calibración

Límite de cuantificación

El límite de cuantificación de un método analítico es la mínima cantidad de analito presente en la muestra que se puede cuantificar bajo las condiciones experimentales descritas para dicho método, para lo cual se utilizó la siguiente fórmula:

$$LOQ = \frac{10\sigma_B}{b}$$

Donde: (2)

σ_B = Desviación estándar

b = Pendiente de la curva de calibración

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la figura 1 se muestra la cronoamperometría realizada para la electrodeposición del antimonio sobre el electrodo de carbón vítreo (electrodo de trabajo) en forma de Sb metálico a partir de una solución 1 ppm de antimonio, utilizando como electrólito H_3PO_4 0,5 M.

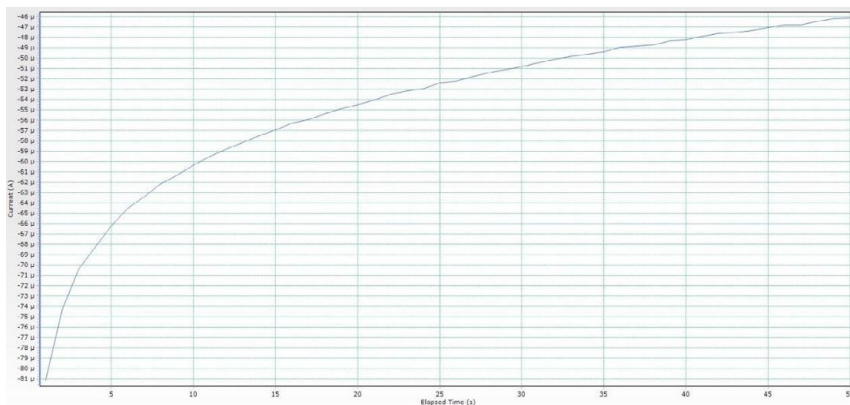


Figura 1. Cronoamperograma del Sb en solución de 1 mg/L Sb y 0,5 mol/L H_3PO_4 , cátodo de carbón vítreo. $E = -1,2$ V y $t = 50$ s.

Luego de la electrodeposición mostrada en la figura 1, se procedió con la etapa de redisolución el antimonio mediante voltamperometría de barrido lineal (figura 2), donde este metal se oxidó desprendiéndose del electrodo de carbón vítreo a un potencial de 84,96 mV, lo que generó un incremento de corriente. Este fenómeno nos permitió cuantificar por regresión lineal de una curva de calibración la concentración en solución de los iones oxidados. A partir de la figura 2, la altura del pico (corriente máxima), o en su defecto, el área del pico (corriente total) pueden ser usadas para calcular la concentración del analito (Sb) en la solución. La figura 2 muestra las propiedades del voltamperograma obtenido.

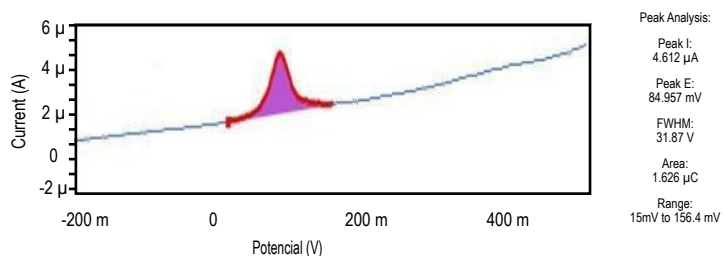


Figura 2. Voltamperograma de Sb en solución de 1 mg/L Sb en 0,5 mol/L H_3PO_4 , cátodo de carbón vítreo, corriente (I)=4,612 μA ; $v = 20$ mV/s, $E_i = -1,2$ V, $E_f = 0,5$ V; Eoxidación= 84,96 mV.

Por otro lado, la figura 3 muestra un voltamperograma de Sb en solución electrolítica H_3PO_4 0,5 M, donde se puede observar cómo aumenta el pico de intensidad de corriente en función de la concentración de las soluciones evaluadas a un potencial de 84,96 mV.

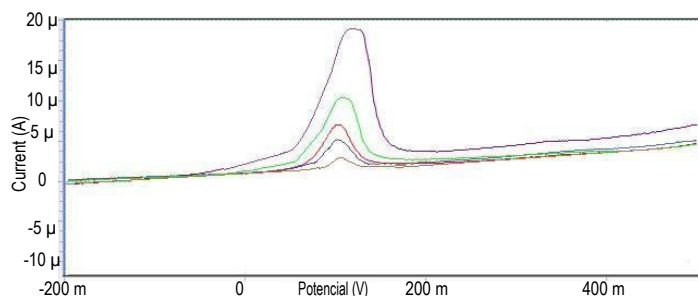


Figura 3. Voltamperograma de Sb en solución de 1 mg/L Sb (línea azul), 10 mg/L Sb (línea roja), 15 mg/L Sb (línea verde) y 20 mg/L Sb (línea lila) en 0,5 mol/L H_3PO_4 , cátodo de carbón vítreo; $v = 20$ mV/s; $E_i = -1,2$ V; $E_f = 0,5$ V; $E_{oxi} = 84,957$ mV.

Los resultados experimentales de la linealidad del sistema se muestran en la figura 4 y los resultados del procesamiento estadístico se resumen en la tabla 1. Según el cumplimiento de los parámetros estadísticos establecidos (tabla 1) se valida la linealidad del sistema. El conjunto de estos resultados permitió afirmar que el método fue lineal en el rango estudiado, ya que se obtuvo una elevada proporcionalidad entre la respuesta obtenida y la concentración del analito, tal como se muestra en la figura 4 y se demuestra por el cumplimiento de todos los criterios estadísticos que derivan del análisis de la regresión para un nivel de confianza de 95 %.

Estos resultados son similares a los obtenidos por Engin y col²¹, donde se obtuvo una ecuación de regresión lineal del pico de corriente (I_p); I_p (μA) = $2,20 \times 10^4$ (mol/L) $-0,0024$; con un coeficiente de correlación, $r^2 = 0,9989$; para $n = 5$ mediciones repetidas y con desviaciones estándar de 133,51 y una pendiente de la curva de calibración con un valor de $2,20 \times 10^4$ $\mu\text{A/M}$.

Tabla 1. Resultados del parámetro de linealidad para un nivel de confianza de 95 %.

Parámetro	Resultados	Criterio de aceptación
Linealidad	$Y = 0,745x + 0,5019$	$Y = bx + a$
	0,9989	$r \geq 0,99$
	0,9979	$r^2 \geq 0,99$
	$t_{cri} < t_r$ ($\alpha = 0,05$; $n = 5$)	Intercepto no significativo $t_{cri} < t_r$ (4,303)
	0,745	$b \cong 1$
	$t = 361,93$	t alta

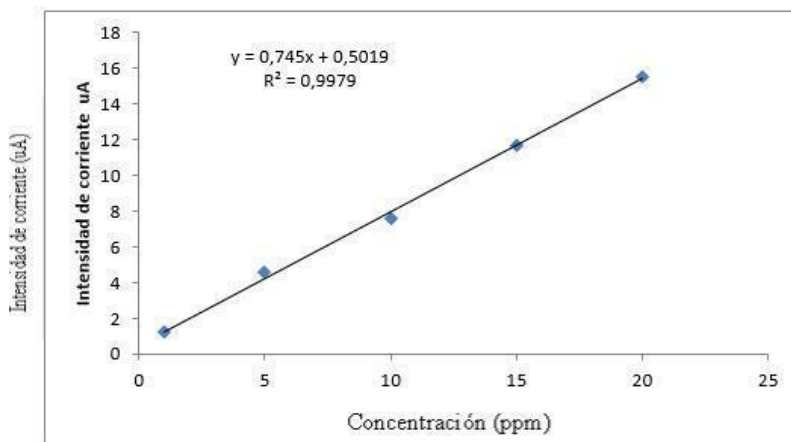


Figura 4. Curva de calibración para la determinación de Sb con adición de solución estándar (1, 5, 10, 15 y 20 mg/L).

El coeficiente de variación (CV) obtenido a partir de los factores de respuesta es de 18,2%, cual indica que el método es preciso, como se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. Análisis de repetitividad del método.

X ($\mu\text{g/mL}$)	Y (μA)	f= Y/X
1	0,998	0,998
1	1,198	1,198
1	1,082	1,082
1	1,009	1,009
1	1,159	1,159
1	0,951	0,951
1	1,199	1,199
1	1,116	1,116
1	1,018	1,018
5	4,548	0,909
5	4,612	0,922
5	4,855	0,971
5	6,221	1,244
5	5,694	1,138
5	5,339	1,067
5	5,268	1,053
5	5,166	1,033
5	5,723	1,144
10	8,825	0,882
10	9,385	0,938
10	6,979	0,697
10	7,492	0,749
10	6,733	0,673
10	7,558	0,755
10	7,050	0,705
10	6,150	0,615
10	7,473	0,747

Tabla 2. Análisis de repetitividad del método. Continuación

15	10,831	0,722
15	11,614	0,774
15	11,094	0,739
15	11,590	0,772
15	10,736	0,715
15	11,689	0,779
15	11,584	0,772
15	11,399	0,759
15	10,223	0,681
20	16,816	0,840
20	16,294	0,814
20	18,245	0,912
20	17,357	0,867
20	17,452	0,872
20	18,047	0,902
20	18,782	0,939
20	18,639	0,932
20	17,973	0,898
Promedio de f	0,904	
s	0,164	
RSD	0,182	
CV (%)	18,2	

CONCLUSIONES

Se logró determinar que el potencial del pico de oxidación del antimonio en las condiciones estudiadas fue de 84,96 mV. Por su parte, la linealidad del método fue demostrada a partir del coeficiente de proporcionalidad de 0,99793 entre la respuesta obtenida y la concentración del analito. El coeficiente de variación (CV) obtenido tuvo un valor de 18,2 %, lo cual indica que la precisión del método es aceptable. Adicionalmente, se encontró que el límite de detección y límite de cuantificación corresponden a valores de 1,041 mg/L y 1,718 mg/L, respectivamente.

AGRADECIMIENTO

Los autores agradecen al Grupo y Semillero de Investigación Aplicaciones Electroanalíticas (AEA) de la Carrera de Ingeniería Química de la Universidad Técnica de Machala, Ecuador, por el apoyo brindado al desarrollo del presente trabajo de investigación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Lu Y, Liang X, Niyungeko C, Zhou J, Xu J, Tian G. A review of the identification and detection of heavy metal ions in the environment by voltammetry. *Talanta*. 2018; 178: 324-338.
2. Lee S, Bong S, Ha J, Kwak M, Park S-K, Piao Y. Electrochemical deposition of bismuth on activated graphene-nafion composite for anodic stripping voltammetric determination of trace heavy metals. *Sens Actuators B Chem*. 2015; 215:62–69.
3. Esteban M., Ariño C., Díaz JM, Serrano N., Dago A., Pérez C. Sensores voltamperométricos para la determinación de iones metálicos. *Actualidad Analítica*, 2016; 53: 15-1.
4. Cobelo-García A, Filella M. Electroanalytical techniques for the quantification of technology-critical elements in environmental samples. *Curr Opin Electrochem*. 2017; 1: 78–90.
5. Fang H, Zhang J, Zhou S, Dai W, Li C, Du D. Submonolayer deposition on glassy carbon electrode for anodic stripping voltammetry: An ultra sensitive method for antimony in tap water. *Sens Actuators B Chem*. 2015; 210: 113-119.
6. Romih T, Hočevár SB, Jemec A, Drobne D. Bismuth film electrode for anodic stripping voltammetric measurement of silver nanoparticle dissolution. *Electrochim Acta*. 2016; 188: 393-397.
7. Atachao ER. Determinación de los niveles de plomo y cadmio en labiales en barra multimarca mediante espectrofotometría de absorción atómica según comercialización en Lima cercado. [Tesis de grado]. Lima: Universidad Particular Inca Garcilazo de la Vega; 2017.
8. Rentería B, Zepeda F. Estudio preliminar [ie preliminar] de un método voltamperométrico para la determinación de plomo en agua potable. [Tesis de grado]. León: Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua; 2008.
9. Gil Z, López V. Aplicación de las nuevas tecnologías de información y comunicación (NTIC) y las diferencias de su concepción en la banca pública y privada, en Venezuela. Barcelona, Venezuela: Universidad de Oriente; 2008.
10. Alonso J, García MA, Pérez López JM, Melgar MJ. Acumulación de metales pesados en macromicetos comestibles y factores que influyen en su captación. *Rev Tox*. 2004; 21(1): 11-15.
11. Ordoñez J, Fernández L, Romero H, Carrera P, Alvarado J. Electrochemical generation of antimony volatile species, stibine, using gold and silver mercury amalgamated cathodes and determination of Sb by flame atomic absorption spectrometry. *Talanta*. 2015; 141: 259-266.

12. Romero H, Vera T, García C, Lapo B, Pesantez F. Desarrollo y validación de un método voltamétrico para la determinación de antimonio en medio acuoso. *Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc.* 2017; 1(1): 736-745.
13. Zhiñin G, Esthefania A, Molina Ramirez EE. Aplicación de técnicas electroanalíticas en la determinación de plomo en agua potable. Machala: Universidad Técnica de Machala; 2015.
14. Lin H, Li M, Mihailovič D. Simultaneous Determination of Copper, Lead, and Cadmium Ions at a Mo₆S₉-xI_x Nanowires Modified Glassy Carbon Electrode Using Differential Pulse Anodic Stripping Voltammetry. *Electrochim Acta.* 2015; 154: 184-189.
15. Zhang M-R, Pan G-B. Porous GaN electrode for anodic stripping voltammetry of silver(I). *Talanta.* 2017; 165: 540-544.
16. Wang J. *Analytical Electrochemistry.* 3rd Ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons; 2006.
17. Lledó D, Calixto F. Aplicación de métodos de preconcentración/determinación de metales pesados en sedimentos y aguas: membranas líquidas-espectroscopía atómica y voltametría de redisolución. [Tesis de grado]. Cádiz: Universidad de Cádiz; 2007.
18. Massanet López JA. Electrodes modification with silver nanoparticles for the detection of arsenic [Internet]. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya; 2017. [Citado 18 de mayo 2019]. Disponible en: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/115476/TFM.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
19. Hidalgo C, Suárez Y, Fernández M. Validación de una técnica potenciométrica para determinar el grado de desacetilación de la quitosana. *Ars Pharm.* 2008; 49(3): 245-257.
20. González AG., Herrador MÁ. A practical guide to analytical method validation, including measurement uncertainty and accuracy profiles. *Trends Analyt Chem.* 2007; 26(3): 227-238.
21. Engin C, Yilmaz S, Saglikoglu G, Yagmur S, Sadikoglu M. Electroanalytical investigation of paracetamol on glassy carbon electrode by voltammetry. *Int J Electrochem Sci.* 2015; 10: 1916-1925.
22. Ramírez C, Olarte E, Téllez E, Palma M. Validación del método analítico para la determinación de mercurio total en sangre humana por espectrofotometría de absorción atómica Zeeman RA-915+ con el módulo de pirólisis PYRO-915+. *Rev Colomb Quím.* 2013; 42(3): 11-16.

CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA, MICROSCÓPICA DE BARRIDO Y DISPERSIÓN DE RAYOS X DEL MUCÍLAGO DE CLADODIOS DE *Opuntia ficus indica* EN LA REGIÓN ALTA DE TACNA

Juan José Vargas Mamani^a, Gabriela Victoria Vera Vargas^a,
Nicole Andrea Suppé Tejada^a

RESUMEN

Este estudio tiene como objetivo describir algunas de las características del mucílago (polímero) de nopal, procedente de la planta *Opuntia ficus indica* cultivada en el distrito de Sijatara, para dicho fin primero se extrajo el mucílago y se transformó en un polvo seco por el método de choque térmico y precipitación en alcohol. El análisis del polvo seco se hizo por el método de microscopia de barrido y dispersión de rayos x obteniéndose la composición elemental del mucílago, seguidamente se observó en la imagen una superficie rugosa y porosa la cual nos permite observar una gran capacidad de absorción de agua e hinchamiento debido a su rugosidad y porosidad. La caracterización físico química consta de un análisis de prueba de hinchamiento, contenido de cenizas, pH, contenido de ácidos urónicos y solubilidad. Se complementó los análisis incluyendo cromatografía de capa fina el cual probó la ausencia de alcaloides, flavonoides, taninos y terpenos, además de un análisis por el método Kjeldahl, nos indica una leve presencia de proteínas.

Palabras clave: *Opuntia ficus indica*, mucílago, cladodio

PHYSICAL-CHEMICAL CHARACTERIZATION, MICROSCOPIC SWEEPING AND X-RAY DISPERSION OF CLASSY MIXED BY *Opuntia ficus indica* IN THE HIGH REGION OF TACNA

ABSTRACT

The object of this study is to describe some of the characteristics of the mucilage (polymer) of nopal, which originates from the *Opuntia ficus* plant cultivated in the district of Sijatara. To accomplish the study the mucilage was first dried into a dust through the method of thermic shock and precipitation in alcohol. The dry dust was analyzed through microscopic scanning and the dispersion of X rays, through which the elemental composition of the mucilage was obtained. Consecutively, a rough and porous surface appeared in the image which permitted us to observe a great capacity of water absorption and enlargement due to

^a Facultad de Ciencias de la Salud, Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Av. Miraflores s/n, Tacna, Perú, ogiva64@gmail.com, victorious7005059@gmail.com.

the roughness and porousness. The physiochemical characterization consists of an analysis of testing the enlargement, ash contents, pH, amount of uranic acid, and solubility. This analysis was complimented by the inclusion of fine cap chromatography, which confirmed the absence of alkaloids, flavonoids, tannins and terpenes; in addition to an analysis with the Kjeldahl method which indicates a slight presence of proteins.

Key words: *Opuntia ficus indica*, mucilage, cladode

INTRODUCCIÓN

El nopal es una cactácea, un arbusto que mide de 0,6 – 1 m de altura, densamente poblado de ramas. Posee tallos carnosos, áfilos con espinas, ramificados lateralmente de forma ovoide de 15 – 30 cm de largo y 13 – 21 cm de ancho, aplanados lateralmente, espinas una más grande que las otras de 3,6 espinas y flores solitarias sésiles. Crece en las laderas rocosas desde los 3100 – 3600 m de altitud¹.

También denominada tuna o higo de la India es una planta centroamericana aclimatada en nuestro país. Las ramas son articuladas carnosas y provistas de hojas rudimentarias y caducas en su juventud; más tarde están remplazadas por pelos y espinas. Las flores son amarillentas, con un número de piezas florales indeterminadas. El ovario es unilocular. El fruto conocido bajo el nombre de tuna, es una baya ovoidea, rojiza y comestible².

La planta de nopal posee hojas carnosas llamadas cladodios, los cuales en su interior contienen el mucílago, se designa como mucilagos a las macromoléculas osídicas que se disuelven más o menos en contacto con el agua para formar disoluciones coloidales o geles. En la actualidad se maneja otros términos como hidrocoloides vegetales o polisacáridos vegetales que hacen referencia al mucílago³.

Los mucílago son análogos por su composición y sus propiedades a las gomas; dan con el agua disoluciones viscosas o se hinchan en ella para formar una pseudodisolución gelatinosa. Se encuentran en las algas, en ciertos hongos, en los esfagnos y en muchos vegetales. Por oxidación dan ácido mícico y por hidrólisis, hexosas y pentosas⁴.

PARTE EXPERIMENTAL

Muestra

La especie vegetal *Opuntia ficus indica*, “penca, pala o nopal”, fue recolectada en el distrito de Sitajara (70°08'02.67”) en la provincia de Tarata en el departamento de Tacna a 3155 msnm en el mes de mayo 2018, durante la época de la postcosecha. La clasificación taxonómica de la planta se realizó en el herbario de la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann por la Magister Rosario Zegarra. La muestra fue usada en fresco, ya que se extrajo pulpa fresca la cual fue tratada directamente.

Extracción de mucílago

Fueron evaluados dos métodos para la extracción de mucílago, el primero con choque térmico y el segundo prescindiendo de él, para encontrar las mejores condiciones de extracción. Se decidió usar el choque térmico.

Primero se pelaron los cladodios para obtener la médula, luego cortarla en pedazos más pequeños. Posteriormente se sometió a agua hirviendo, después se introdujo en agua fría (choque térmico) los trozos de mucílago fueron trasladados a una licuadora y a continuación se filtró el preparado. Terminado el proceso el mucílago de consistencia viscosa fue precipitado en alcohol de 96° para ser escurrido, seguidamente secado a 90° en una estufa. Después de 24 h, el mucílago seco fue fragmentado y pulverizado en una moledora manual marca Corona. Los fragmentos molidos fueron cernidos en una malla, número 100 y envasados en un frasco de vidrio con tapa hermética⁵.

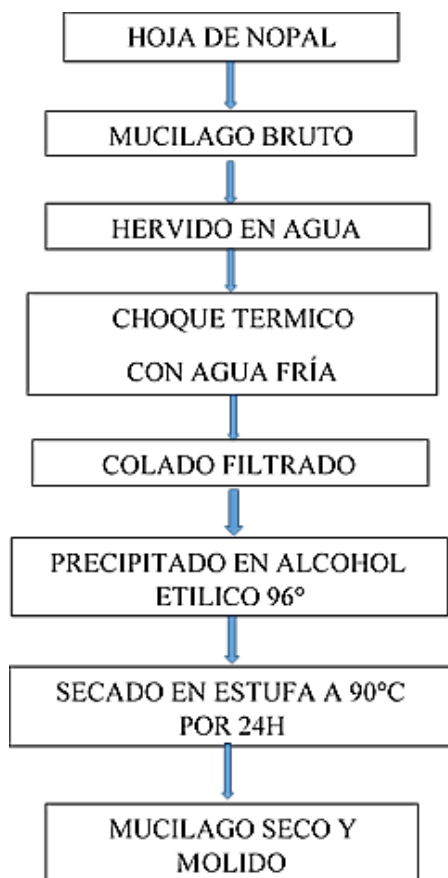


Figura 1. Esquema de método de obtención de mucílago del nopal.

Composición centesimal de mucílago por microscopia electrónica de barrido SEM y EDX.

El microscopio electrónico usado es marca TESCAN y modelo VEGA 11 LMU, utiliza un filamento de tungsteno y un microanalizador marca OXFORD y modelo INCA PentaF'ETx3, el voltaje de aceleración va de 200 Va 30KV, con un aumento continuo de 4x a 1000000x, es un equipo que permite la observación de la superficie de materiales.

Se tomó una muestra de polvo de mucílago y se colocó en la respectiva matriz metálica con una superficie adhesiva, previamente secada, el polvo así obtenido se adhiere a la superficie, se coloca dentro del microscopio y se somete a vacío, procediendo luego a los análisis programados.

Prueba de hinchamiento

Se realizó pesando 1g de mucílago seco, sumergido en 100ml de agua destilada en un vaso de precipitados y se dejó reposar por un lapso de 24h, terminado el tiempo se procedió a pesar el mucílago, previo filtrado. Para luego ser pesado nuevamente y se calculó la diferencia de peso de manera similar. Basado en el método de Ovando Franco⁷.

Contenido de cenizas

Se procedió a pesar una muestra seca de mucílago molido en una cantidad de un 1g en un vaso de crisol para luego someterlo al Horno Mufla a 600 C° por un lapso de 8h, terminado el proceso fue pesado nuevamente. Se hicieron los cálculos por diferencia de peso⁸.

Medición de pH

El método se basa en medir el pH a través del siguiente procedimiento, tres soluciones diferentes en fioles de 100ml al 8 %, 4 % y 1 %. Posteriormente, lo colocamos en un vaso de precipitados y medimos su pH en el equipo pH metro digital⁹.

Cálculo de ácidos urónicos

El cálculo se realizó por titulación de una solución al 1 % de mucílago, con una solución de hidróxido de sodio 0,1 M usando como indicador fenolftaleína. Se usó como referencia el ácido glucurónico como el monómero de mayor presencia en la cadena polimérica del mucílago y que le otorga sus características ácidas.

Pruebas de solubilidad

Se coloca 0,1g de mucílago en cada tubo de ensayo de 5ml y en cada uno diferentes solventes (agua destilada, etanol 96°, ciclo hexano, alcohol N-propílico y éter de petróleo.

Contenido de metabolitos secundarios

Se usó el método de cromatografía en capa fina usando como fase móvil metanol y como reactivo revelador una mezcla de vainillina y ácido sulfúrico Et Oh (5%), en una cámara cerrada¹⁰.

Contenido de proteínas por el método Kjeldahl

Se usó el protocolo Método Kjeldahl, A.O.A.C Official Methods of Analysis 13 th Edition, 1984.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Mucílago obtenido y procesado

El mucílago obtenido después del procesamiento tuvo el aspecto de un polvo color mostaza, el rendimiento en porcentaje respecto a una hoja de nopal fue de 0,8235 % p/p el cual se envasó en un frasco de tapa hermética, antes de envasarlo se cernió por una malla número 100.

Composición centesimal de mucílago por dispersión de rayos x

En la figura 2 podemos apreciar el espectro de energía por dispersión de rayos X, y sus subsecuentes resultados semi-cuantitativos en cuanto a los elementos encontrados, observándose que el carbono y el oxígeno son los elementos predominantes, es de entender ya que en las estructuras moleculares de los azúcares predominan estos elementos.

Tabla 1. Resultados del análisis elemental por dispersión de rayos x sobre el mucílago en polvo.

Element	Weight%	Atomic%
C	45,23	53,67
O	50,01	44,55
Mg	0,34	0,20
K	0,58	0,21
Ca	3,84	1,36
Totals	100,00	

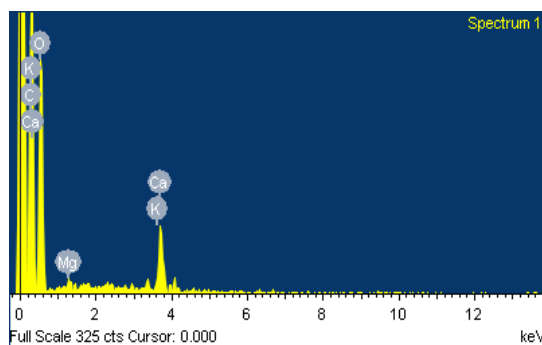


Figura 2. Resultados y porcentajes de análisis elemental por dispersión de rayos X de mucílago en polvo.

Imágenes SEM (Scanning Electron Microscope)

En la figura 3 se puede observar unas partículas de mucilago en polvo con un aumento de x50 se observa terrones granulosos y porosos de aspecto amorfo y en (b) se observa la superficie de una de esas partículas donde se observa una superficie amorfa producto de la contracción del polímero de nopal, con abundantes muescas y cráteres.

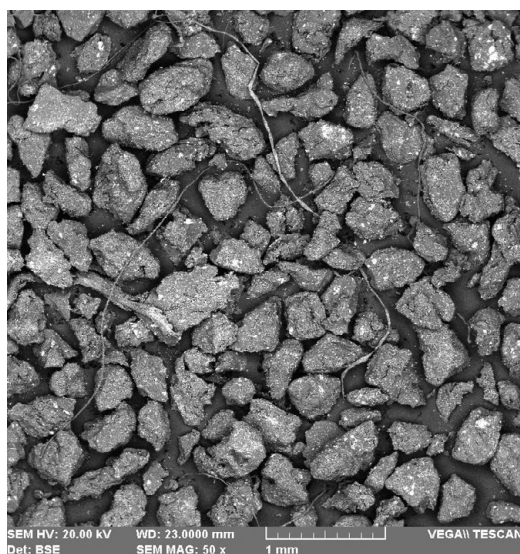


Figura 3. Imagen SEM ampliación x 50 de partículas de mucilago

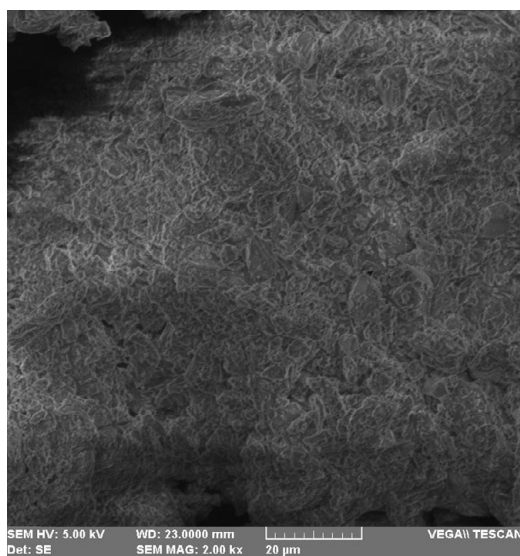


Figura 4. Imagen SEM ampliación x 2000 de partículas de mucilago.

Prueba de hinchamiento

En la tabla 2 se puede observar que a un tiempo de 48 horas llega a un máximo de absorción de agua de aproximadamente 12,26 veces su peso o de aproximadamente 13 ml agua por gramo de mucílago seco, es una gran cantidad de agua debido a la abundancia de grupos alcohol del mucílago y el cual produce muchos enlaces puentes de hidrógeno.

Tabla 2. Resultados de prueba de hinchamiento del mucílago.

Periodo	Peso inicial (mucílago)	Peso final (mucílago + agua)	Diferencia (absorción de agua del mucílago)	Absorción respecto al peso inicial de mucílago *	% de hinchamiento	Promedio
24h	1,26 g	10,94 g	9,68 mL	8.68	768,2539	
	1,22 g	13 g	11,78 mL	10,65	965,5737	
	1,21 g	11,6	10,39 mL	9,58	858,6776	864,1720
48h	1,26 g	15,82	14,56 mL	12,55	1155,5555	
	1,22 g	19,53	18,31 mL	16,00	1500,8196	
	1,21 g	14,83	13,62 mL	12,26	1125,6198	1260,6649

*Los números se refieren a cuantas veces respecto al peso inicial del polvo aumenta por absorción del agua. Por ejemplo, en la última muestra a 48h la absorción fue de 12,26 veces su peso inicial

Contenido de cenizas

En la tabla 3 se puede apreciar el contenido de cenizas del mucílago seco nos indica una gran cantidad de cenizas que nos da una idea de gran cantidad de materia inorgánica que como en el análisis elemental se observa contiene una cantidad apreciable de K, Ca y Mg.

Tabla 3. Resultados de prueba de cenizas.

Crisol	Peso (g)	Mucílago (g)	Cenizas (g)	% de cenizas	Media
I	25,0896	1,0028	0,1028	10,2512	
II	24,4729	1,0689	0,1155	10,8055	
III	24,2630	1,0100	0,1071	10,6039	10,5535

pH y acidez

La tabla 4 nos muestra que el mucílago disuelto en agua tiene un pH ácido debido a los ácidos glucurónicos contenidos en una cantidad de 14 %, calculados mediante titulación con NaOH.

Tabla 4. Resultados de prueba de pH. Después de esperar un par de minutos el pH metro.

Solución con % de mucílago	pH	Temperatura
1 %	5,450	26,1°C
4 %	5,270	27,0°C
8 %	5,225	24,1°C
Media	5,315	25,7°C

Ácidos glucurónicos

La titulación de acidez de la solución de mucílago nos indica que este tiene un 14,2008 % de ácidos glucurónicos, lo cual explica la acidez de la sustancia.

Resultados de solubilidad

La solubilidad del mucílago es más soluble en agua y soluciones ácidas débiles, pero en solventes orgánicos y alcoholes provocan deshidratación del mucílago por lo que lo precipitan.

Tabla 5. Resultados de pruebas de solubilidad del mucílago.

SOLVENTE	RESULTADOS
Agua destilada	Soluble
Etanol 96°	Insoluble
Alcohol N-propílico	Insoluble
Ciclo hexano	Insoluble
Ácido acético 5 %	Parcialmente soluble
Éter de petróleo	Insoluble

Metabolitos secundarios y proteínas

En la tabla 6 podemos apreciar que los análisis cromatográficos revelan ausencia de metabolitos secundarios pero una pequeña cantidad de proteínas en el mucílago.

Tabla 6. Resultados de análisis cromatográficos y Kjeldahl del mucílago.

ANÁLISIS	RESULTADO
DETERMINACIÓN DE PROTEÍNAS (%) Método Kjeldahl, A.O.A.C Official Methods of Analysis 13 th Edition, 1984	1,80
DETERMINACIÓN DE METABOLITOS SECUNDARIOS Metodología thin layer chromatography (TLC)	Negativos a terpenos, flavonoides, lactonas sesquiterpénicas, alcaloides y taninos.

CONCLUSIÓN

El rendimiento de mucílago obtenido es de 0,8235 % p/p, las fotografías SEM mostraron que el mucílago seco tiene abundancia de surcos, prominencias y poros en una superficie amorfa, la composición centesimal del mucílago comprende: C (45,02%); O (51,09%); Mg (0,25%); S (0,17%); K (0,47%) y Ca (3%). Los análisis físico-químicos arrojaron los siguientes resultados: el pH es de 5,3, las cenizas son de 10,55%, la prueba de hinchamiento del mucílago seco probó su gran capacidad de absorción de agua siendo lo máximo a las 48h de 12,26 veces su peso respecto al inicio. El análisis Kjeldahl revela un pequeño contenido de proteínas de alrededor de 1,8 %. El análisis por cromatografía de capa fina probó la ausencia de terpenos, flavonoides, lactonas sesquiterpénicas, alcaloides y taninos, esto prueba que el mucílago extraído está exento de otros metabolitos lo que prueba su pureza. La ausencia de metabolitos extraños, su gran capacidad de absorción de agua, consistencia mucilaginoso, su carácter ácido y alto contenido de oxígeno y carbono, nos hace llegar a la conclusión de que el mucílago obtenido es un polímero de azúcares con características ácidas.

AGRADECIMIENTO

Se agradece a la Mgr. Mercedes Velarde de la I.E.P Colegio Santa Ana de Tacna por impulsar a desarrollar este trabajo de investigación, también agradecemos a la Universidad Jorge Basadre Ghroman por darnos el apoyo mediante el programa RSU por intermedio del Ing. Edgar Talla. Por último, agradecemos al Ing. Julián Nieto, de la Facultad de Metalurgia, por su apoyo de parte del Laboratorio de Microscopia Electrónica SEM.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Cáceres CN. Taxonomía y usos Tradicionales de las Plantas Medicinales de la Provincia de Candarave – Tacna. [Tesis de grado]. Tacna (Perú): Universidad Nacional Jorge Basadre Groohmann; 2004.
2. Vidal Jorge. Curso de Botánica. 29ª edición. Lima (Perú). Bruño; 1998.
3. Bruneton J. Farmacognosia Fitoquímica Plantas medicinales. 2ª edición. Zaragoza (España): Acribia; 2001.
4. Font Quer P. Diccionario de Botánica. 9ª reimpresión. Barcelona (España): Labor. 1985.
5. Quispe H. Aplicación del mucilago de nopal *Opuntia ficus indica* en la clarificación del agua del río Uchusuma. [Tesis de grado]. Tacna: Universidad Nacional Jorge Basadre Grohman; 2012.
6. Egerton RF. Physical Principles of Electron Microscopy. 2nd. Ed. Basel (Switzerland): Springer; 2016.
7. Ovando M. Modificación de biopolímero extraído de Nopa (*Opuntia ficus indica*) y su aplicación para la remoción de metales pesados en agua. [Tesis posgrado]. San Luis Potosí: Instituto Potosino de Investigación científica y Tecnológica AC; 2012.
8. Nielsen S. Análisis de los Alimentos. Zaragoza (España): Acribia; 2007.
9. Shriner R. Identificación sistemática de compuestos orgánicos. 2da. edición. México: Editorial Limusa – Wiley; 2013.
10. Rojas-Molina I, Gutiérrez-Cortez E, Bah M, Rojas-Molina A, Ibarra-Alvarado C, Rivera-Muñoz E, et al. Characterization of calcium compounds in *Opuntia ficus indica* as a source of Calcium for Human Diet. [Internet]. J Chem. 2015; Article ID 710328. doi: 10.1155/2015/710328. [citado 12 abril de 2019]. Disponible en: <https://www.hindawi.com/journals/jchem/2015/710328/cta/>

EFFECTO DE LA INCLUSIÓN DE DIFERENTES FUENTES LIPÍDICAS EN LA DIETA DE ENGORDE SOBRE EL PERFIL DE ÁCIDOS GRASOS POLIINSATURADOS EN FILETE DE PACO *Piaractus brachypomus*

Wilfredo Vásquez Quispesivana^a, Raúl Porturas Olaechea^a, Fredy Crispín Sánchez^a

RESUMEN

La investigación tuvo como objetivo evaluar el efecto de la inclusión de diferentes fuentes lipídicas en la dieta de engorde sobre el perfil de ácidos grasos poliinsaturados AGPI en los filetes de *Piaractus brachypomus*. Se utilizó cuatro tipos de aceite; palma, maíz, soja y pescado, para elaborar dietas cumpliendo los requerimientos nutricionales de la especie. Se alimentaron durante dos meses con estas cuatro dietas y se utilizó como control un alimento comercial. Se determinó el perfil de ácidos grasos en los aceites, en las dietas y en los filetes de *Piaractus brachypomus* antes y después del experimento. Los niveles de AGPI omega-6 como el ácido araquidónico (AA) y los AGPI omega-3 como el ácido eicosapentaenoico (EPA) y el docosahexaenoico (DHA) fueron analizados. La dieta elaborada con aceite de pescado obtuvo el mejor perfil de AGPI en los filetes (2,11 %; 4,64 % y 7,0 % de AA; EPA y DHA, respectivamente), sin embargo, la fuente lipídica de origen vegetal, que mejor influyó en el incremento de ácidos grasos omega-3 en filete de *Piaractus brachypomus* (3,11 %; 0,82 % y 3,71 % de AA, EPA y DHA) fue el aceite de palma. Se demostró la capacidad de mejorar el perfil de AGPI en filetes de *Piaractus brachypomus*.

Palabras clave: *Piaractus brachypomus*, ácidos grasos, filete, palma, maíz, soja, pescado, alimento.

EFFECT OF THE INCLUSION OF DIFFERENT LIPID SOURCES IN THE DIET ON THE POLYUNSATURATED FATTY ACIDS PROFILE IN *Piaractus brachypomus* FILLET

ABSTRACT

This research evaluated the effect of the inclusion of different lipid sources in the diet on the on the polyunsaturated fatty acids profile PUFA in *Piaractus brachypomus* fillet. Four types of oil were used; palm, corn, soy and fish oil, to formulate diets that comply with

^a Facultad de Pesquería, Universidad Nacional Agraria la Molina, Av. La Molina S/N, Lima 12, Perú, wvasquez@lamolina.edu.pe

the nutritional requirements of the fish. These four diets were supplied for two months and a commercial diet was used as a control. The fatty acid profile was determined for oils, diets and fillets, before and after the experiment. The levels of omega-6 polyunsaturated fatty acids (n-6 PUFA) such as arachidonic acid (AA) and omega-3 polyunsaturated fatty acids (n-3 PUFA) such as eicosapentaenoic acid (EPA) and docosahexaenoic acid (DHA) were analyzed. The best PUFA profile in fillets (2,11; 4,64 and 7,0 % AA; EPA and DHA respectively) was obtained with the diet elaborated with fish oil, however, the best vegetable oil that influenced the increase of PUFA profile in *Piaractus brachypomus* fillet (3,11; 0,82 and 3,71 % of AA, EPA and DHA) was palm oil. It was demonstrated the ability to improve the PUFA profile in *Piaractus brachypomus* fillets.

Key words: *Piaractus brachypomus*, fatty acids, fillet, oil, palm, corn, soy, fish, diet.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años el consumo de pescado de origen marino pelágico ha presentado un aumento a nivel mundial y la razón principal se basa en que es considerado como un alimento saludable, ya que aparte de ser buena fuente de proteínas, es reducido en calorías, grasa saturada y colesterol. Su amplia aceptación se fundamenta, principalmente, en que es un alimento rico en ácidos grasos poliinsaturados AGPI de la serie omega-3 (n-3), a los cuales se les atribuyen propiedades benéficas en cuanto a la disminución del riesgo de sufrir enfermedades cardiovasculares. Además de demostrar un efecto antiinflamatorio y citoprotector¹.

Los peces marinos poseen niveles significativos de AGPI². Mientras que la mayoría de peces de agua dulce, excluyendo a la trucha, contienen relativamente poco de los AGPI n-3. En este grupo se encuentra el paco *Piaractus brachypomus* una especie nativa de importancia económica en toda la Amazonía peruana. Sin embargo, la alimentación de los peces es determinante para el perfil de sus AGPI. Se ha demostrado que la composición de los ácidos grasos de los lípidos de la dieta influye en la composición de los ácidos grasos de los lípidos del músculo del pescado.

Estudios realizados determinaron el pobre aporte de AGPI n-3 de *Piaractus brachypomus*, constituyéndose en un problema nutricional³. Por otro lado, las especies de agua dulce aunque presenten una elevada concentración de AGPI del tipo omega-6 en comparación con los de la serie n-3, tienen la ventaja de presentar mayores concentraciones de AGPI de 18 carbonos de las series n-3 en los tejidos, como el ácido alfa linolénico (ALN 18:3 n-3)⁴. Es a partir de esta ventaja, que estos peces de agua dulce tienen la habilidad de demostrar una mayor capacidad de elongar y desaturar el ácido alfa linolénico a ácido eicosapentanoico (EPA) y ácido docosahexanoico (DHA)⁵. Esta capacidad podría ser utilizada durante el proceso de cultivo, a fin de promover mediante una dieta, a mejorar el perfil de AGPI.

Esto significa que muchas de estas especies pueden transformar un determinado ácido graso en su correspondiente de cadena más larga, con gran eficiencia, permitiendo que en la elaboración de dietas se incluyan aceites vegetales, siempre y cuando estos contengan cantidades adecuadas de ácido alfa linolénico (ALN), que pueden ser convertidos en EPA y DHA por el sistema enzimático del pez⁶, estas consideraciones justifican la necesidad de investigar en una de las principales especies amazónicas, el paco *Piaractus brachypomus* que es ampliamente demandado a nivel regional en la Amazonía y constituye significativamente uno de los principales alimentos proteicos, con la orientación de mejorar su perfil de AGPI saludable.

PARTE EXPERIMENTAL

Lugar y duración de la evaluación

El trabajo de investigación tuvo una duración de dos meses y se llevó a cabo en las instalaciones del centro de producción de la empresa Acuicultura y Pesquera Calicanto S.R.L ubicada en la ciudad de Pucallpa, provincia Coronel Portillo, región Ucayali.

Evaluación de parámetros de producción

Las unidades experimentales constaron de cinco corrales de 25m² instalados dentro de un estanque. Se trabajó con *Piaractus brachypomus* de 200 ± 10 g previamente seleccionados y distribuidos al azar en los corrales. Durante el experimento se realizaron biometrías quincenales y se evaluaron los principales parámetros de producción; tasa específica de crecimiento, tasa de crecimiento absoluto y relativo, factor de conversión del alimento (FCA), factor de condición (K) y supervivencia.

Evaluación de parámetros de calidad de agua

Los análisis físicos y químicos del agua de cultivo de los peces se realizaron semanalmente *in situ* utilizando un kit de análisis de agua HANNA instruments®. El parámetro de temperatura se midió diariamente.

Determinación de la composición química proximal de las dietas y filetes de *Piaractus brachypomus*

Fueron utilizados los siguientes métodos de ensayo:

Proteína (Nx6,25); COVENIN 1195-1980 Alimentos. Determinación de Nitrógeno. Método Kjeldahl.

Grasa total; NTP 201.016 2002 Carne y productos cárnicos. Determinación del contenido de grasa total.

Humedad; NOM-116-SSA1-1994. Determinación de humedad en alimentos por tratamiento térmico. Método por arena o gasa.

Ceniza; NMX-F-607-NORMEX-2013 Alimentos - Determinación de Cenizas en Alimentos - Método de Prueba.

Fibra cruda; AOCS Official Method Ba 6-84. 6th Edition, Rev. Online. 2009 Crude Fiber by Procedure Using Glass Wool.

Determinación de la energía bruta en las dietas experimentales

Se utilizó el método de energía total por bomba calorimétrica, mediante el principio de la oxidación total (combustión total) de una muestra de cada dieta en una bomba calorimétrica.

Determinación del perfil de ácidos grasos poliinsaturados en las fuentes lipídicas y filetes de *Piaractus brachyomus*

Antes de iniciar la alimentación con las cuatro dietas elaboradas y la dieta control, se tomaron tres muestras al azar de *Piaractus brachyomus* del lote proveniente para el experimento, y se determinó el perfil de AGPI para tener valores referenciales iniciales. De igual manera se determinó el perfil de AGPI a las fuentes lipídicas utilizadas en el experimento. Posteriormente después de iniciado el experimento se tomaron tres muestras de *Piaractus brachyomus* por cada corral, a los 30 y a los 60 días del experimento. Se aplicó la metodología AOCS Ce-1b-89 Sixth Edition. 2009. Fatty Acid Composition of Marine Oils by GLC.

Diseño experimental y diseño estadístico

Diseño completamente al azar con cuatro tratamientos (dietas) y un tratamiento control. Cada tratamiento se llevó a cabo en corrales con una densidad de dos peces por metro cuadrado (20 peces por corral, instalados dentro de un estanque).

Para el tratamiento control se utilizó un alimento pelletizado comercial para peces amazónicos. La formulación de las cuatro dietas elaboradas contempló la misma cantidad y tipo de insumos proteicos y energéticos, con excepción en el tipo de fuente lipídica que fue objetivo de la presente investigación; aceites de palma, maíz, soja y pescado con una inclusión del 8 %⁷.

Variable evaluada

La variable evaluada al inicio y a los 60 días de experimentación fue el perfil de AGPI omega-3 y omega-6 en los filetes de *Piaractus brachyomus*. Los resultados se sometieron a un análisis de varianza con un nivel de significancia de 0,05 y una prueba de comparación múltiple de medias de acuerdo con el criterio de Tuckey.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Parámetros de producción

En la tabla 1 se muestran los resultados de los parámetros de producción obtenidos en el transcurso de dos meses de investigación. El FCA con valores entre 1,75 y 2,1 se consideran válidos en relación con los valores reportados de FCA (3,34 - 4,14) en juveniles de *Piaractus mesopotamicus* alimentados con tres niveles de proteína bruta (18 %, 22 % y 26 %)⁸. El factor de condición, generalmente designado como K, reflejó información acerca del estado fisiológico de los peces y del uso adecuado de las fuentes alimenticias y su valor en animales adultos no siempre refleja el estado alimenticio⁹. Con relación a los demás parámetros de crecimiento, como la tasa específica de crecimiento, fue importante tener en cuenta que este parámetro se vio influenciado no solo por el alimento, sino también por el estado fisiológico del pez, la densidad de crianza y la temperatura del agua⁹.

Tabla 1. Parámetros de producción de *Piaractus brachypomus*, obtenidos durante el periodo de 60 días de alimentación con diferentes fuentes lipídicas.

Parámetro	Dieta control Alimento comercial	Dieta 1 con aceite de palma	Dieta 2 con aceite de maíz	Dieta 3 con aceite de soya	Dieta 4 con aceite de pescado
Peso inicial (g)	200 ± 10	200 ± 10	200 ± 10	200 ± 10	200 ± 10
Peso final (g)	350 ± 8	345 ± 9	334 ± 8	340 ± 8	335 ± 6
Ganancia de peso (g)	150	145	134	140	135
Alimento consumido (g)	262,5	261	268	259	283,5
Factor de conversión del alimento (FCA)	1,75	1,8	2	1,85	2,1
Factor de condición, K	2,53	2,59	2,71	2,52	2,58
Talla inicial (cm)	21 ± 1,5	21 ± 1,5	21 ± 1,5	21 ± 1,5	21 ± 1,5
Talla final (cm)	24 ± 1,8	23,7 ± 1,9	23,1 ± 1,8	23,8 ± 1,8	23,5 ± 1,6
Tasa específica de crecimiento (%/día)	1,67	1,67	1,67	1,67	1,67
Tasa de crecimiento absoluto (cm/día)	0,05	0,05	0,04	0,05	0,04
Tasa de crecimiento relativo (%/día)	0,24	0,21	0,17	0,22	0,20

Tabla 2. Parámetros físico químicos de calidad de agua en la producción de *Piaractus brachypomus*.

Parámetro	Valor
Temperatura ambiente (°C)	27,0 ± 1.5
Temperatura agua (°C)	26,0 ± 2
Oxígeno disuelto (ppm)	5,4 ± 0.5
pH	6,5 ± 0.3
Amonio (ppm)	0,0
Nitrito (ppm)	0,0
Alcalinidad (ppm)	62,0 ± 2
Dióxido carbono (ppm)	9,0 ± 1
Dureza (ppm)	32,0 ± 2.5
Conductividad eléctrica (Us)	319,0 ± 5
Sólidos totales disueltos (ppm)	312,0 ± 6

En la tabla 2, los parámetros de calidad de agua registrados para el cultivo de *Piaractus brachypomus* en el presente trabajo se encuentran dentro de lo adecuado⁹, sin embargo, la temperatura del agua de 26°C se encontró por debajo del rango de 28 a 30°C¹⁰. Esto se debe a que en el periodo cuando se realizó la investigación aún alcanzaba la estación más fría del año en la región Ucayali.

Fuentes lipídicas y perfil de ácidos grasos poliinsaturados

Uno de los ingredientes utilizados en la formulación de alimentos para peces fue el aceite de pescado que se utilizó para suministrar energía dietética y ácidos grasos esenciales; sin embargo, este insumo ha alcanzado la meseta de su producción, además que es un recurso finito¹¹. De los insumos mencionados en la tabla 3; los aceites de soya y maíz generalmente son destinados para consumo humano directo, de aquí se tomó en cuenta los costos al ser utilizados como insumo en la elaboración de alimento para peces. Un posible sustituto del aceite de pescado en los alimentos acuícolas es la palma, considerado el segundo aceite vegetal de mayor volumen producido en el mundo. Al respecto, se debe mencionar que el aceite crudo de palma es un insumo regional de la Amazonía, el cual debería ser estudiado con mayor énfasis considerando el aspecto económico.

Tabla 3. Parámetros físico químico de las fuentes lipídicas, en porcentaje.

Parámetro	Aceite de palma	Aceite de maíz	Aceite de soya	Aceite de pescado
Proteína	0,03	0,03	0,00	0,14
Grasa cruda	99,61	99,90	99,84	99,96
Humedad	0,39	0,10	0,16	0,04
Ceniza	0,01	0,01	0,00	0,04
Fibra cruda	0,00	0,00	0,00	0,00
Energía (kcal/kg)	8965,02	8991,12	8985,60	8996,96

En la tabla 6 se reporta el perfil de ácidos grasos de las fuentes lipídicas utilizadas para la elaboración de las dietas del presente experimento. El aceite de pescado fue el único insumo que aportó directamente ARA, EPA y DHA a la dieta, los demás insumos como el aceite de palma, soya y maíz no aportaron estos ácidos grasos. Sin embargo, sí contribuyeron con el aporte de ácidos grasos monoinsaturados como el ácido oleico y de ácidos grasos poliinsaturados como linoleico. El aceite de palma presentó una alta concentración de ácidos palmítico (saturado) y oleico (monoinsaturado)¹², el aceite de palma utilizado en el presente trabajo reportó 39,59 % y 41,70 % correspondientemente.

El aceite de soya se utiliza principalmente para freír y cocinar, industrialmente forma parte de alimentos para humanos y animales¹², presentó ácidos AGPI como el ácido linoleico y alfa linolénico en un porcentaje de 54 % y 7,38 %, respectivamente; ácidos grasos monoinsaturados como el ácido oleico en un 20,96 % y ácidos grasos saturados como el ácido palmítico en un 10,82 %.

Con respecto al aceite de maíz utilizado, presentó principalmente el AGPI linoleico en un porcentaje de 55,50 %; y ácidos grasos monoinsaturados como el ácido oleico en un 28,49 % y el ácido palmitoleico en un 11,64 %.

El aceite de pescado utilizado fue el único de los cuatro insumos que presentaron los AGPI; AA, EPA y DHA, en valores de 1,24 %; 18,54 % y 11,74 %, respectivamente.

Dietas de engorde para *Piaractus brachyomus* y perfil de ácidos grasos

Con las cuatro fuentes lipídicas se elaboraron cuatro dietas. En la tabla 4 se presentan los parámetros físicos químicos encontrados, los mismos que estuvieron alrededor del 30 % y 29,2 % de proteína de acuerdo a los requerimientos de la especie⁹. Se recomienda un 30 % de proteína para *Piaractus brachyomus*⁴. En este sentido, los valores de proteína en las dietas de experimentación cumplieron con los requerimientos de la especie.

Con respecto a los niveles de grasa, en las dietas elaboradas se superó el 4 % a 6 %⁹, mientras que para la dieta comercial se mantuvo en el margen recomendado.

Los carbohidratos de las dietas sobrepasan el valor de 36 %⁹. La cantidad de energía de las dietas superó ampliamente el requerimiento de 3410 kcal/kg¹³.

En la tabla 6 se muestra el perfil de ácidos grasos en cada dieta elaborada, destacó la dieta elaborada con aceite de palma que presentó la mayor proporción del ácido graso saturado palmítico (32,85 %), esto debido a que el aceite de palma es el insumo que más cantidad de ácido palmítico presentó (39,59 %) en relación a los demás aceites de maíz, soja y pescado (0,0 %; 10,82 % y 15,51 %, respectivamente). La dieta comercial fue la que menor proporción de AGPI presentó (0,00 % de AA, 0,00 % de EPA y 0,14 % de DHA), mientras que la dieta elaborada con aceite de pescado fue la que mayor proporción de AGPI presentó (0,95 % de AA, 14,77 % de EPA y 9,43 % de DHA), esto se debe a que en la dieta comercial se encontró menor porcentaje de grasa (3,60 %).

Tabla 4. Parámetros físico químico de las dietas elaboradas con diferentes fuentes lipídicas, en porcentaje.

Parámetro	Dieta control Alimento comercial	Dieta 1 con aceite de palma	Dieta 2 con aceite de maíz	Dieta 3 con aceite de soya	Dieta 4 con aceite de pescado
Proteína	31,01	31,19	29,83	30,96	29,90
Grasa cruda	3,60	13,71	13,81	14,18	13,86
Humedad	10,10	10,21	10,19	9,73	9,92
Ceniza	9,40	7,40	7,40	7,50	7,40
Fibra cruda	4,03	3,16	2,07	2,12	2,20
CHOs	41,86	34,33	36,70	35,51	36,72
Energía (kcal/kg)	3975,90	4611,60	4565,10	4497,30	4582,30

Filetes de *Piaractus brachyomus* y perfil de ácidos grasos

En la tabla 5 se exponen los parámetros físico químico de los filetes de *Piaractus brachyomus* obtenidos después del periodo de experimentación, en todos los tratamientos los valores están dentro de los valores encontrados por el Instituto Tecnológico Pesquero del Perú; la proteína se encuentra dentro del rango de 15,7 % a 18,7 %¹⁴. *Piaractus brachyomus* es considerado como una especie grasa (mayor al 5 % de grasa)¹⁵. Esta especie presenta una gran fluctuación en el contenido graso de casi 31 veces, el contenido más alto fue observado en el mes de abril (8,7 %), y el más bajo en noviembre (0,82 %)¹⁴.

Tabla 5. Parámetros físico químico, filetes de *Piaractus brachypomus*, en porcentaje

Parámetro	Inicio de experimento	Dieta comercial	Aceite de palma	Aceite de maíz	Aceite de soja	Aceite de pescado	ITP (2009)
Proteína	18,14	18,38	17,41	17,80	18,23	18,38	14,96 – 18,90
Grasa cruda	1,30	2,50	2,30	5,30	3,80	2,80	2,73 – 18,09
Humedad	79,44	77,60	78,50	75,92	76,47	77,90	64,29 – 79,12
Ceniza	1,08	1,55	1,28	1,38	1,71	1,40	0,87 – 1,40
Fibra cruda	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-

Según la tabla 6, para las dietas donde se utilizaron aceites vegetales de palma, maíz y soja, se determinaron valores de ácido araquidónico (AA) de 3,11 %; 1,25 % y 1,38 %, correspondientemente en los filetes de *Piaractus brachypomus* luego del periodo de experimentación. La presencia de AA en estos filetes, considerando que en las fuentes lipídicas no existe representación de AA, se debe al proceso de bioconversión del ácido linoleico, que comprende elongaciones (incorporación de dos carbonos) y desaturaciones (incorporación de un doble enlace) acometidas sucesivamente por las $\Delta 6$, $\Delta 5$ y $\Delta 4$ desaturasas¹⁶. En este caso, los aceites de palma, maíz y soja aportaron niveles de ácido linoleico del orden de 10,52 %; 55,50 % y 54,04 %, respectivamente, que por el proceso de bioconversión se transformaron en AA. Por otro lado, en los filetes de *Piaractus brachypomus* alimentados con dieta comercial, con aceite de palma, maíz, soja y pescado se determinaron valores de 16,20 %; 14,26 %; 23,04 %; 21,28 % y 13,11 % de ácido linoleico. Peces de agua dulce reportaron niveles entre 13,77 % y 26,24 %¹⁷.

Para el caso del ácido alfa linolénico en estudios realizados se encontraron niveles entre 0,25 % a 1,53 %¹⁷ y Andrade *et al.*¹⁷ encontraron valores inferiores al 2,50 %, y en algunas especies no fue detectado.

El mayor porcentaje del ácido linoleico sobre el ácido alfa linolénico es un común denominador en la mayoría de las especies de agua dulce, incluido el *Piaractus brachypomus*, y esto debido a los hábitos alimenticios o al tipo de alimentación en los estanques de cultivo. Por lo tanto, la relación que puede existir entre estos dos importantes ácidos grasos puede ser direccionada según el objetivo de crianza¹⁷.

Los estudios realizados por el Instituto Tecnológico Pesquero del Perú¹⁴ demostraron entre ciertos ácidos grasos, un valor de 0,318 % para el DHA. Se sabe que la composición de ácidos grasos de los filetes de pescado refleja la composición de ácidos grasos del aceite usado en la dieta¹¹. Teniendo en cuenta este enunciado y en relación a los AGPI AA, EPA y DHA, el aceite de pescado es la única fuente lipídica que aportó directamente estos tres AGPI, como se puede observar en la tabla 6. Sin embargo, al comparar con el aporte de AGPI de las dietas, se observó que en las dietas elaboradas con aceite de palma, maíz y soja,

se tuvo presencia de EPA en valores de 2,64 %; 2,42% y 2,44 %, respectivamente, así como DHA en valores de 1,55 %; 1,40 % y 1,46 %, respectivamente. La presencia de estos AGPI en estas dietas se debió a la harina de pescado que aporta estos AGPI.

Mientras que en la dieta con aceite de pescado, el nivel alcanzado de EPA y DHA alcanzó valores de 14,77 % y 9,43%, correspondientemente, esto se debería por la presencia de harina y aceite de pescado como ingredientes, que amplían el nivel de EPA y DHA. Por otro lado, se debe considerar que estos peces de agua dulce tienen la habilidad de demostrar una mayor capacidad de elongar y desaturar el ácido alfa linolénico a EPA y DHA¹⁶.

Según estudios realizados¹⁷ se determinó el pobre aporte de AGPI n-3 de *Piaractus brachypomus*, constituyéndose en un problema nutricional desde el aspecto de aporte de AGPI n-3. Sin embargo, con el presente estudio, se demostró la capacidad de mejorar el perfil de AGPI durante el proceso de cultivo. Lo cual constituye un indicador de la calidad nutricional de esta especie y de la posibilidad de considerarlo como un alimento funcional.

Los peces de agua dulce pueden ser usados como una dieta saludable para humanos, considerando que su calidad nutricional es aún mejor, ya que además de tener considerables cantidades de APGI n-3, los peces de agua dulce contienen mayores niveles de ácido araquidónico que los peces marinos².

Tabla 6. Perfil de ácidos grasos de las fuentes lipídicas, dietas utilizadas y filetes de *Piaractus brachipomus*, en porcentaje.

	Fuente lipídica												Dieta					Filete				
	Palma	Maíz	Soja	Pescado	Comercial	Palma	Maíz	Soja	Pescado	Comercial	Palma	Maíz	Soja	Pescado	Comercial	Palma	Maíz	Soja	Pescado			
Laurico	C12:0	0,43	0,00	0,00	0,14	0,00	0,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00			
Tridecanoico	C13:0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00			
Mirístico	C14:0	0,74	0,00	0,00	6,63	0,40	1,42	0,85	0,89	5,43	1,24	1,44	1,10	1,21	1,26	2,38	0,00	0,00	0,00			
Miristoleico	C14:1	0,00	0,00	0,00	0,18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00			
Pentadecanoico	C15:0	0,00	0,00	0,00	0,51	0,00	0,00	0,00	0,00	0,41	0,13	0,16	0,12	0,14	0,15	0,24	0,00	0,00	0,00			
Cis-10-pentadecanoico	C15:1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,12	0,30	0,45	0,23	0,22	0,32	0,00	0,00	0,00			
Palmitico	C16:0	39,59	0,00	10,82	15,51	13,97	32,85	13,38	12,68	16,32	25,73	23,73	24,88	22,82	23,30	21,30	0,00	0,00	0,00			
Palmitoleico	C16:1w7	0,00	11,64	0,00	8,08	0,68	1,17	1,11	1,07	6,59	2,95	3,28	2,37	2,85	2,88	3,93	0,00	0,00	0,27			
Hexadecadienoico	C16:2w4	0,00	0,00	0,00	0,25	0,00	0,16	0,15	0,16	0,21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,27			
Hexadecatrienoico	C16:3w4	0,00	0,00	0,00	0,18	0,00	0,26	0,25	0,24	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,25			
Heptadecanoico	C17:0	0,00	0,00	0,00	1,01	0,19	0,19	0,17	0,18	0,86	0,20	0,24	0,23	0,22	0,23	0,32	0,00	0,13	0,00			
Cis-10-heptadecanoico	C17:1	0,00	0,00	0,00	1,22	0,00	0,00	0,00	0,00	1,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,13	0,00	0,00	0,00	0,09			
Estearico	C18:0	5,62	1,76	4,36	3,14	4,92	4,80	2,14	3,91	3,16	8,40	8,26	8,36	7,08	7,63	7,52	0,00	0,00	0,00			
Oleico	C18:1 w9c	41,70	28,49	20,96	9,72	22,10	33,74	25,27	20,04	12,30	36,51	31,02	31,18	31,54	31,16	23,62	0,00	0,00	0,00			
Vaccenico	C18:1 w7	0,58	0,62	1,35	2,81	1,31	1,01	1,01	1,51	2,54	2,01	2,20	1,94	1,88	2,03	2,51	0,00	0,00	0,00			
Linoleico	C18:2 w6c	10,52	55,50	54,04	1,32	48,47	17,27	48,45	47,62	11,98	15,01	16,20	14,26	23,04	21,28	13,11	0,00	0,00	0,00			
Alfa-linoléico	C18:3 w3	0,30	0,98	7,38	0,78	6,16	0,95	1,40	5,78	1,36	0,52	0,90	0,56	0,73	1,46	0,83	0,00	0,00	0,17			
Linolénico	C18:3 w4	0,00	0,00	0,00	0,13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,17			
Gama-linoléico	C18:3 w6	0,00	0,00	0,00	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,20	0,41	0,33	0,24	0,24	0,31	0,23	0,00	0,00	0,48			
Estearidónico	C18:4 w3	0,00	0,00	0,00	0,25	0,00	0,23	0,22	0,22	0,20	0,00	0,14	0,00	0,56	0,00	0,48	0,00	0,00	0,00			
Araquidico	C20:0	0,39	0,40	0,34	0,38	0,37	0,36	0,36	0,33	0,33	0,30	0,25	0,24	0,25	0,27	0,27	0,00	0,00	0,00			
Eicosenoico	C20:1w9	0,13	0,25	0,18	1,28	0,28	0,27	0,33	0,30	1,08	0,84	0,72	0,68	0,59	0,62	0,86	0,00	0,00	0,00			
Eicosadienoico	C20:2 w6	0,00	0,00	0,00	0,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,64	0,78	0,79	0,65	0,63	0,55	0,00	0,00	0,00			
Cis-8,11,14-Eicosatrienoico	C20:3 w6	0,00	0,00	0,00	0,17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00			
Eicosatetraenoico	C20:4w3	0,00	0,00	0,00	0,87	0,00	0,00	0,00	0,00	0,65	0,00	0,15	0,00	0,00	0,10	0,47	0,00	0,00	0,00			
Araquidónico	C20:4w6	0,00	0,00	0,00	18,54	0,00	0,00	0,12	0,00	0,95	1,22	2,13	3,11	1,25	1,38	2,11	0,00	0,00	0,00			
Eicosapentaenoico (EPA)	C20:5w3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,64	2,42	2,44	14,77	0,09	1,11	0,82	0,65	0,55	4,64	0,00	0,00	0,00			
Henicosanoico	C21:0	0,00	0,00	0,39	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,86	1,07	1,18	0,78	0,82	0,78	0,00	0,00	0,00			
Behénico	C22:0	0,00	0,15	0,00	0,19	0,33	0,00	0,16	0,33	0,18	0,13	0,13	0,14	0,10	0,13	0,14	0,00	0,00	0,00			
Eritrico	C22:1w9	0,00	0,00	0,00	0,21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00			
Cetoleico	C22:1w11	0,00	0,00	0,00	1,12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,83	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,22	0,00	0,00	0,00			
Adrenico	C22:4w6	0,00	0,00	0,00	0,13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,53	1,12	1,65	0,61	0,63	0,97	0,00	0,00	0,00			
Docosapentaenoico	C22:5w3	0,00	0,20	0,17	2,23	0,18	0,50	0,53	0,55	1,93	0,19	0,63	0,80	0,46	0,42	1,80	0,00	0,00	0,00			
Docosahexaenoico (DHA)	C22:6w3	0,00	0,00	0,00	11,74	0,14	1,55	1,40	1,46	9,43	0,69	2,47	3,71	1,82	1,73	7,00	0,00	0,00	0,00			
Tricosanoico	C23:0	0,00	0,00	0,00	0,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,61	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,31	0,00	0,00	0,00			
Nervonico	C24:1w9	0,00	0,00	0,00	0,51	0,00	0,00	0,00	0,00	0,46	0,00	0,15	0,22	0,10	0,10	0,25	0,00	0,00	0,00			

CONCLUSIONES

En consecuencia, a lo realizado en el presente trabajo de investigación y en función a los resultados obtenidos, se puede concluir que:

La fuente lipídica de origen vegetal, que mejor influye en el incremento de ácidos grasos omega-3 en filete de paco *Piaractus brachypomus* fue el aceite de palma.

La dieta que presentó mejor perfil de ácidos grasos fue la preparada con aceite de pescado, seguida de la dieta elaborada con aceite de palma.

El perfil de ácidos grasos poliinsaturados en filetes de paco *Piaractus brachypomus* fue mejorado con la inclusión de fuentes lipídicas de origen vegetales como el aceite de palma en un 8 %.

Se demostró la capacidad de mejorar el perfil de ácidos grasos poliinsaturados durante el proceso de cultivo de paco *Piaractus brachypomus*.

AGRADECIMIENTO

Los autores agradecen por el apoyo brindado a la presente investigación a las empresas: Acuicultura y Pesquera Calicanto S.R.L ubicada en la ciudad de Pucallpa, provincia Coronel Portillo, región Ucayali.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Valenzuela R, Tapia G, González M y Valenzuela A. Ácidos grasos omega-3 (EPA y DHA) y su aplicación en diversas situaciones clínicas. Rev Chil Nut. 2011; 38(3): 356-367.
2. Steffens W. Effects of variation feeds on nutritive in essential fatty acids in fish value of freshwater fish for humans. Aquaculture. 1997; 151: 97-119.
3. Perea A, Gomez E, Mayorga Y, y Triana C. Caracterización nutricional de pescados de producción y consumo regional en Bucaramanga. Arch Lat Nut. 2008; 58(1): 91-97.
4. FAO. Programa Cooperativo Gubernamental: Nutrición y alimentación de peces y camarones cultivados. Documento de campo No 4, Programa AQUILA I. Brasilia: FAO; 1989.
5. Moreno, J. Cambios en el perfil de ácidos grasos de filete de tilapia nilótica *Oreochromis niloticus* en respuesta a diferentes fuentes lipídicas [Tesis Magister en Producción Animal]. Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia; 2016. [Citado el 20 jun 2016]. Disponible en <http://www.bdigital.unal.edu.co/39433/1/jennymarcelamorenopoveda.2013.pdf>.

6. Turchini G, Francis D, De Silva S. Fatty acid metabolism in the freshwater fish Murray cod (*Maccullochella peelii peelii*) deduced by the whole body fatty acid balance method. *Comp Biochem Physiol B Biochem Mol Biol*. 2006; 144(1): 110-118
7. OTCA, Organización del Tratado de Cooperación Amazónica. Piscicultura amazónica con especies nativas. Lima: Secretaria Pro- Tempore; 2016.
8. Fernandes J; Carneiro D; Sakomura N. Fontes e Níveis de Proteína Bruta em Dietas para Alevinos de Pacu (*Piaractus mesopotamicus*). *R Bras Zootec*. 2000; 29(3): 646-653.
9. Salinas A. Niveles de energía y relación proteína a energía sobre el desempeño productivo y composición corporal del paco (*Piaractus brachypomus*). [Tesis Mg Sc. en Nutrición]. Lima, Perú: Universidad Nacional Agraria La Molina; 2018.
10. Gomes F. Desempenho do tambaqui (*Colossoma macropomum*), da pirapitinga (*piaractus brachypomum*), e do híbrido tambatinga (*C. macropomum xp, brachypomum*) mantidos em viveiros fertilizados na fase de engorda, Dissertação [Tesis de maestría]. Goias, Brasil: Universidad Federal de Goías; 2009.
11. Wing-Keong. Potential of palm oil utilisation in aquaculture feeds. *Asia Pacific J Clin Nutr*. 2000; 473–S476
12. Durand S, Torres J, y Sanhueza J. Aceites vegetales de uso frecuente en Sudamérica: características y propiedades. *Nut Hosp*. 2015; 32(1): 11-19.
13. Miranda D. Digestibilidad de ingredientes y determinación del requerimiento de energía digestible de paco (*Piaractus brachypomus*). [Tesis Mg Sc. en Nutrición]. Lima, Perú: Universidad Nacional Agraria La Molina; 2018.
14. ITP. Instituto Tecnológico Pesquero del Perú. Información nutricional sobre algunos peces comerciales de la Amazonía Peruana, Boletín de investigación. Lima, Perú. 2009.
15. Cortez J. Características bromatológicas de dieciséis especies hidrobiológicas de la Amazonía peruana en época de creciente. *Folia Amazónica*. 1992; 4(1): 111:118.
16. Guillaume J, kaushik S, Bergot P, y Métailler R .Nutrición y alimentación de peces y crustáceos. Edición Mundi-Prensa, España. 2004.
17. Tueroz G. Comportamiento productivo y composición lipídica del paco (*Piaractus brachypomus*) alimentado con diferentes relaciones de ácidos grasos omega 6 a 3. [Tesis Mg Sc. en Nutrición]. Lima, Perú. Universidad Nacional Agraria La Molina. 2019.

EVALUACIÓN DE LA VIDA ÚTIL DE LOS ACEITES DE SACHA INCHI (*Plukenetia huayllabambana* y *Plukenetia volubilis*) MICROENCAPSULADOS

Rafael Alarcón Rivera^a, María del Carmen Pérez Camino^b, Nancy Chasquibol Silva^{*a}

RESUMEN

Los aceites de sachá inchi de los ecotipos *Plukenetia huayllabambana* y *Plukenetia volubilis* se microencapsularon para protegerlos de factores ambientales como el oxígeno, la luz, humedad y de las condiciones de los procesos durante la elaboración de los alimentos. El estudio de la vida útil del producto microencapsulado es muy importante a la hora de utilizarlo como materia prima en el desarrollo de alimentos funcionales. Por todo lo comentado anteriormente, el objetivo del trabajo fue evaluar la vida útil de los aceites de sachá inchi microencapsulados con diferentes materiales de pared (Goma Arábica (GA), Hi-Cap, Maltodextrina (MD) y proteína de suero de leche (WPI)), solos o en mezclas; empleando el método Rancimat® a las temperaturas de 70, 80, 90 y 100°C. Los resultados del tiempo de vida útil extrapolada a 25°C de los microencapsulados de los aceites de sachá inchi fue mucho mayor que el tiempo de vida de los aceites de sachá inchi sin microencapsular. La estabilidad oxidativa y el periodo de inducción (PI), también confirmaron que las microcápsulas obtenidas mostraron una mayor protección frente a la oxidación, siendo el material de pared Hi-cap el que mejor protegió.

Palabras clave: aceite de sachá inchi, estabilidad oxidativa, método Rancimat, microcápsulas.

SHELF LIFE EVALUATION OF SACHA INCHI OILS (*Plukenetia huayllabambana* and *Plukenetia volubilis*) MICROENCAPSULATED

ABSTRACT

The sachá inchi oils of ecotypes of *Plukenetia huayllabambana* and *P. volubilis* were microencapsulated to protect from environmental factors such as oxygen, light, moisture and the process conditions during the food processing. The study of the shelf life of the microencapsulated are very important for using them as a raw material in the development

^a Centro de Estudios e Innovación de los Alimentos Funcionales, CEIAF de la Facultad de Ingeniería Industrial, Instituto de Investigación Científica; IDIC., Universidad de Lima, Lima 33. nchasquibol@ulima.edu.pe

^b Departamento de Caracterización y Calidad de Lípidos, Instituto de la Grasa- CSIC, Ctra. Utrera km 1, Edificio 46, E-41013 Sevilla, España.

of functional foods. The objective of this work was to evaluate the shelf life of sacha inchi oils microencapsulated with different wall materials (Gum Arabic (GA), Hi-Cap, Maltodextrin (MD) and whey protein (WPI)), alone or in mixtures; using the Rancimat method at temperatures of 70, 80, 90 and 100 ° C, respectively. The results of the shelf life extrapolated at 25°C of sacha inchi oils microcapsules were longer than sacha inchi oils without microencapsular, oxidative stability index and induction period (PI), also confirmed that the microcapsules obtained showed greater protection against oxidation, being the Hi-cap wall material that best protected the sacha inchi oils

Key words: Sacha inchi oil, oxidative stability index, Rancimat® method, microcapsules.

INTRODUCCIÓN

Las semillas de sacha inchi *Plukenetia huayllabambana* L. y *Plukenetia volubilis* pertenecen a la biodiversidad peruana, sus aceites contienen un alto porcentaje de ácidos grasos poliinsaturados, considerados de gran importancia para la salud humana, debido a que previenen enfermedades cardiovasculares, hipertensión arterial, entre otros¹. El ácido α -linolénico es el principal ácido graso en ambos ecotipos, con porcentajes superiores al 51 y 48 % en *P. huayllabambana* y *P. volubilis*, respectivamente, seguidos de los ácidos α -linoleico y oleico^{2,3}. Esta composición especial de ácidos grasos hace que estos aceites sean muy susceptibles a la oxidación, por factores como el aire, luz, humedad y calor o por su propia naturaleza química⁴. La tecnología de la microencapsulación se está empleando para aumentar la estabilidad y tiempo de vida de los aceites de sacha inchi, al protegerlo de factores ambientales y retardando la aparición de olores y sabores indeseables^{5,6}.

La estabilidad oxidativa de aceites y grasas puede ser estimada utilizando pruebas aceleradas, como el método que usa el equipo Rancimat®⁷, el cual determina rápidamente la estabilidad oxidativa de muestras de aceites o grasas y por consiguiente su período de inducción, mediante la oxidación acelerada de la muestra y el registro constante de los cambios en la conductividad eléctrica del agua, que recoge los compuestos volátiles formados durante la reacción de oxidación⁸. Debido a su automatismo, el método Rancimat® permite obtener respuestas más precisas que con los métodos tradicionales⁹. El presente trabajo tiene por objetivo determinar los índices de peróxido, humedad y evaluar la vida útil de los aceites de sacha inchi microencapsulados, para seleccionar la mejor formulación que permita ser empleada en la elaboración de alimentos funcionales.

PARTE EXPERIMENTAL

Muestras

Las semillas de sacha inchi de los ecotipos *Plukenetia huayllabambana* y *Plukenetia volubilis* fueron obtenidas en la provincia de Rodríguez de Mendoza, departamento de Amazonas y del departamento de San Martín, Perú. El proceso de extracción de los aceites se realizó por

presado hidráulico en frío, en el Laboratorio de Grasas-Aceites y Alimentos Funcionales de la Universidad de Lima. Los aceites fueron almacenados en frascos de color oscuro a una temperatura de 4°C para su microencapsulación y evaluación.

Microencapsulación

Para la microencapsulación de los aceites de sachá inchi *P. huayllabambana* (ASIH), y *P. volubilis* (ASIV), se utilizaron como materiales de pared: goma arábiga (GA), maltodextrina (MD), aislado proteico de suero de leche (WPI) y Hi-cap. Los materiales de pared se hidrataron en agua hasta su homogenización, luego se agregó el aceite, formándose la emulsión aceite en agua (O/W) en el homogenizador Silverson L5M-A, England, a 9000 rpm por 10 minutos. La emulsión fue secada por aspersión en el equipo Mini Spray Dryer, Büchi modelo B-290 Switzerland, a una temperatura de entrada y salida de 150 °C y 80 °C, respectivamente, y con un flujo de 55 mL/min. Los polvos secos fueron recolectados y guardados en bolsas herméticas opacas a -15 °C para los análisis respectivos. Se elaboraron un total de 10 muestras con los aceites de sachá inchi *P. huayllabambana* (ASIH) y *P. volubilis* (ASIV), empleando cinco mezclas de diferentes materiales de pared (tabla 1). Las muestras de microcápsulas obtenidas en un total de 50 g por muestra, se almacenaron en bolsas de aluminio a la temperatura de 15°C por un tiempo de 120 días para su posterior análisis. Se determinaron porcentaje de humedad, rendimiento, índice de peróxido, estabilidad oxidativa y tiempo de vida útil.

Tabla 1. Parámetros físico químico, filetes de *Piaractus brachyomus*, en porcentaje.

Microencapsulados de ASIH	ASIH + Hi-Cap	Microencapsulados de ASIV	ASIV + Hi-cap
	ASIH + GA		ASIV + GA
	ASIH + GA+ MD		ASIV + GA + MD
	ASIH+GA+MD+WPI		ASIV+GA+MD+WPI

Determinación del porcentaje de humedad

El porcentaje de humedad de las microcápsulas de los aceites de sachá inchi se determinó pesando $3 \pm 0,01$ g de microcápsulas en la balanza de humedad halógena Sartorius, modelo MA-30 a 100 °C y 1 atmósfera de presión. Las mediciones se realizaron inmediatamente después de culminar el proceso de microencapsulación. Todos los análisis fueron realizados por triplicado.

Determinación del rendimiento

El rendimiento de las microcápsulas se determinó con la cantidad de microcápsulas en el vaso recolector del spray dryer respecto a la cantidad de muestra ingresada. Todas estas determinaciones se realizaron por triplicado.

Determinación del índice de peróxido

Para determinar el índice de peróxido, se disolvieron $2 \pm 0,01$ g de microcápsulas en 25 mL de la mezcla ácido acético:cloroformo (1:1), a la disolución se añadió 1 mL de KI saturado, y después de agitar durante 1 minuto se dejó reposar durante 5 minutos en la oscuridad para que el yoduro se transforme en yodo empleando el oxígeno procedente de los peróxidos. El yodo formado se valoró con una solución de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 0,01N con solución de almidón al 1% como indicador. Los resultados se expresaron en meq O_2/kg aceite¹⁰.

Determinación de la estabilidad oxidativa

La determinación de la estabilidad oxidativa o período de inducción de los aceites de sachá inchi (*P. huayllabambana* y *Plukenetia volubilis* y), se realizó en el equipo Professional Metrohm Rancimat® (modelo 892). Se pesaron de 2,5-3,0 g aceites de sachá inchi sin microencapsular y microencapsulados en los tubos de reacción del equipo Rancimat. Todas las muestras se sometieron a oxidación a las temperaturas de 70, 80, 90 y 100°C bajo corriente de aire con un caudal de 20 L/h. La exposición de las muestras a estas temperaturas y flujo de aire descomponen a los aceites desprendiéndose compuestos volátiles variando la conductividad eléctrica del agua, este cambio nos da el tiempo de inducción (el tiempo en el que el aceite permanece estable) para cada temperatura, medido en horas. Todas las determinaciones se realizaron por triplicado.

Determinación del tiempo de vida útil

Los tiempos de inducción y estabilidad fueron procesados mediante el software StabNet del equipo Professional Metrohm Rancimat® (modelo 892). Se empleó la técnica de extrapolación lineal para estimar el tiempo de vida útil (tiempo en que el aceite mantiene sus características de calidad) de los aceites de sachá inchi (*P. volubilis* y *P. huayllabambana*) a 25°C sin microencapsular y microencapsulados empleando la fórmula:

$$\text{TVU} = A \times \exp(B \times T);$$

donde:

TVU = tiempo de vida útil; A y B son los coeficientes de regresión en base a los PI y T es la temperatura del tiempo de vida, establecido a 25°C.

Análisis estadístico

Los análisis fueron realizados en triplicado y los resultados se expresaron como el promedio \pm SD, usando software EXCEL (versión 2013).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Porcentajes de humedad y rendimiento

Los porcentajes de humedad de los microencapsulados (tabla 2) fueron menores al 10% y se encuentran dentro de los límites establecidos para los productos comestibles en polvo¹¹. El porcentaje de humedad fue de 3,20 a 5,87 % y de 2,40 a 6,36 % para los microencapsulados de aceite de sachá inchi *Plukenetia huayllabambana* y *P. volubilis*, respectivamente. El porcentaje de humedad más bajo fue el obtenido con el material de pared Hi-cap para ambos

aceites. El flujo de alimentación al equipo de secado influye directamente en el porcentaje de humedad del producto final¹² así como el tiempo que permanece en la cámara de secado donde se puede llegar a una humedad de equilibrio.

En relación a los porcentajes de rendimiento, estos fueron en todos los casos menores del 40 % que es el rendimiento esperado, para el proceso de microencapsulación a nivel de laboratorio.

Índice de peróxidos

Los índices de peróxidos de las microcápsulas (figuras 1 y 2) fueron superiores a 1 meq O₂/kg de muestra, en el tiempo 0 (a excepción de ASIH + Hicap y ASIV + Hicap que fueron 0). Debido a que los ácidos grasos poliinsaturados se ven afectados por la temperaturas, durante el proceso de secado se produce oxidación⁴ en algunos de los aceites microencapsulados, los cuales no fueron protegidos completamente por los correspondientes materiales de pared.

Tras el almacenamiento y hasta los 70 días los valores de peróxidos se encuentran dentro de los valores establecidos por la Norma técnica peruana (NTP) de sachá inchi¹³ que establece un valor máximo de 10 meq O₂/kg aceite, a diferencia de los que ocurre tras 120 días de almacenamiento, donde los índice de peróxidos de algunas de las microcápsulas (ASIH+GA, ASIH+GA+MD, ASIH+Capsul y ASIV+Capsul) se encuentran fuera del límite permitido, debido a la mayor formación de hidroperóxidos y de compuestos orgánicos aromáticos de cadena corta.

Tabla 2. Porcentajes de humedad y rendimiento de las microcápsulas de los aceites sachá inchi.

Aceites	Material de pared	% Humedad	% Rendimiento
ASIH	Hi-cap	3,20 ± 0,03	19,80 ± 5,87
	GA+MD+WPI	3,58 ± 0,09	39,88 ± 1,23
	GA	5,87 ± 0,13	26,45 ± 4,99
	GA+MD	5,01 ± 0,09	29,65 ± 10,77
ASIV	Hi-cap	2,40 ± 0,06	32,96 ± 5,79
	GA+MD+WPI	3,34 ± 0,03	34,28 ± 1,20
	GA	6,36 ± 0,06	30,58 ± 1,12
	GA+MD	4,63 ± 0,06	35,75 ± 1,18

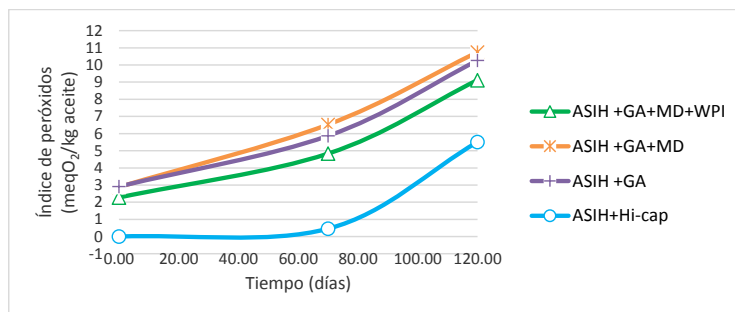


Figura 1. Índice de peróxidos de las microcápsulas de aceite de sachá inchi (*P. huayllabambana*) con diferentes materiales de pared.

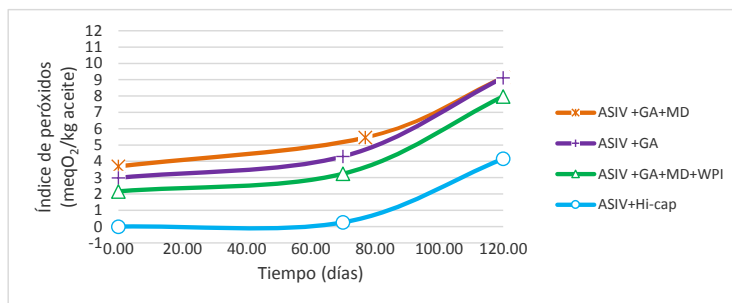


Figura 2. Índice de peróxidos de las microcápsulas de aceite de sachá inchi (*P. volubilis*) con diferentes materiales de pared.

Estabilidad oxidativa

Los tiempos de inducción o periodos de inducción (PI) (figuras 3 y 4) obtenidos en el equipo Rancimat® a las temperaturas de 100, 90, 80 y 70°C para los aceites de sachá inchi sin microencapsular y microencapsulados se reducían a medida que la temperatura aumentaba en el siguiente orden: PI (70°C) > PI (80°C) > PI (90°C) > PI (100°C).

El análisis de los resultados indica que el mayor tiempo de inducción es obtenido con el material de pared Hi-cap comparado con los aceites de sachá inchi sin microencapsular. Los periodos de inducción (PI) y los tiempos de estabilidad tienden a reducirse a la mitad por cada aumento de 10°C de temperatura debido a la elevada insaturación de los aceites de sachá inchi¹⁴.

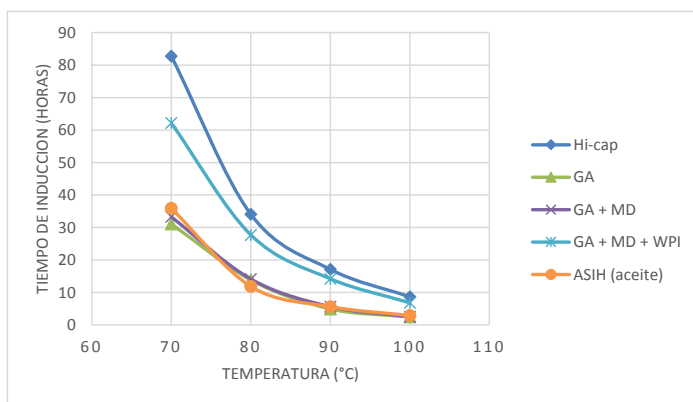


Figura 3. Tiempo de inducción del aceite de sacha inchi *Plukenetia huayllabambana* sin microencapsular y microencapsulados.

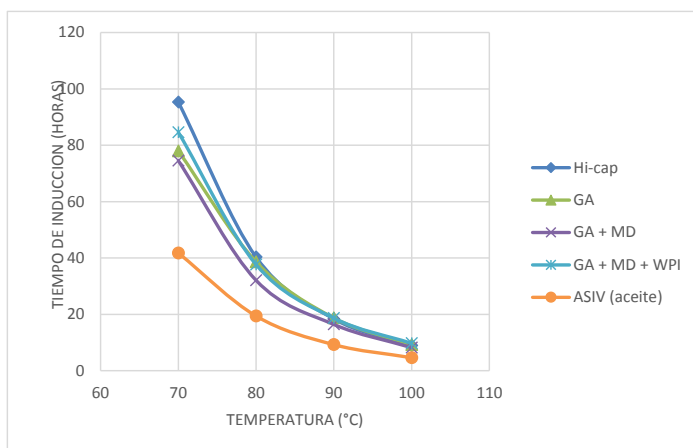


Figura 4. Tiempo de inducción del aceite de sacha inchi *Plukenetia volubilis* sin microencapsular y microencapsulados.

Tiempo de la vida útil

Mediante la representación de la temperatura vs logaritmo del tiempo de inducción correspondiente, y utilizando el software StabNet del equipo Rancimat® se determina, extrapolando, el tiempo de la vida útil, establecido a 25°C (punto rojo en la recta verde) basados en los periodos de inducción a las temperaturas de 70, 80, 90 y 100°C (puntos blancos en la recta verde). En la figura 5 se muestra la recta de una de las muestras estudiadas y que corresponde al aceite de sacha inchi *P. huayllabambana* microencapsulado utilizando Hi-Cap como material de pared.

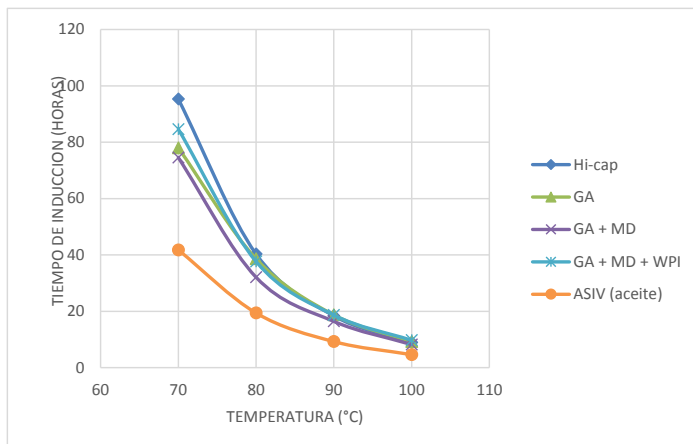
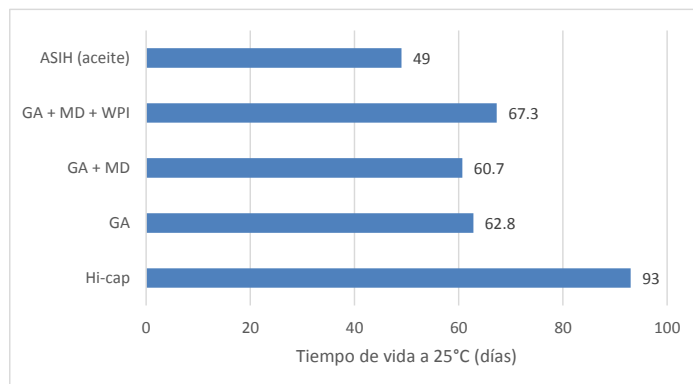


Figura 5. Representación de la temperatura vs log de PI. Extrapolación del PI a 25 °C, (tiempo de vida útil) del aceite de sachá inchi *P. huayllabambana* microencapsulado con Hi-cap como material de pared.

En las figuras 6 y 7 se recogen los tiempos de vida útil, obtenidos extrapolando los log de los PI a 25°C, de los aceites de sachá inchi *P. huayllabambana* y *P. volubilis* sin microencapsular y microencapsulados.

Debido a la alta insaturación de los aceites, la velocidad de oxidación es exponencialmente proporcional a la temperatura mientras que el PI disminuye logarítmicamente con el aumento de la temperatura.

El mayor incremento de vida útil (PI a 25°C) (figura 6) respecto al aceite de sachá inchi *P. huayllabambana* fue para las microcápsulas de ASIH+Hicap (89,8%), seguido por ASIH+GA+MD+WPI (37,35%), ASIH+GA (28,16%) y ASIH+GA+MD (23,88%)¹¹. Por lo tanto, el tiempo de vida útil (PI obtenido extrapolando a 25°C) para el aceite de sachá inchi *P. huayllabambana*, sin microencapsular y microencapsulado fue: ASIH+Hicap > ASIH+ GA + MD+WPI > ASIH+GA > ASIH+ GA+ MD > ASIH.



12

Figura 6. Representación de la temperatura vs log de PI. Extrapolación del PI a 25 °C, (tiempo de vida útil) del aceite de sachu inchi *P. huayllabambana* microencapsulado con Hi-cap como material de pared.

El mayor incremento de vida útil (PI extrapolando a 25°C) respecto al aceite de sachu inchi *P. volubilis* (figura 7), fue para las microcápsulas de ASIV+Hi-cap (213,70 %), seguido de las microcápsulas, ASIV+GA+MD+WPI (82,83 %), ASIV+GA (73,70 %) y ASIV+GA+MD (71,74 %)¹⁴. Por lo tanto, el tiempo de vida útil (PI extrapolado a 25°C) para el aceite de sachu inchi *P. volubilis* sin microencapsular y microencapsulado fue: ASIV+Hi-cap > ASIH+GA+MD+WPI > ASIV+GA > ASIV+GA+MD > ASIV.

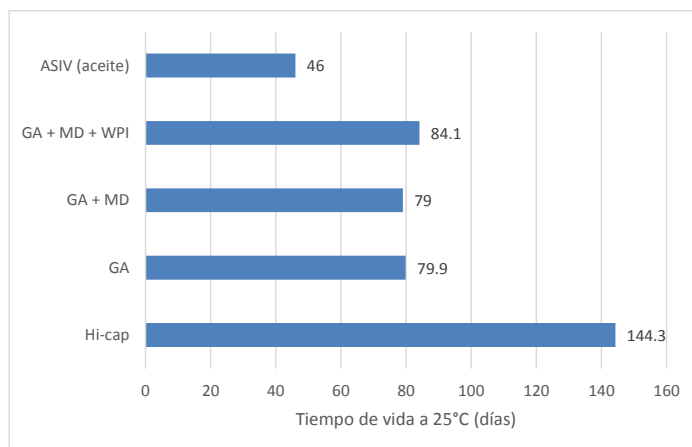


Figura 6. Tiempo de vida útil (PI extrapolando a 25 °C) del aceite de sachu inchi, *P. volubilis* sin microencapsular y microencapsulado con diferentes materiales de pared.

CONCLUSIONES

El índice de peróxidos de todas las microcápsulas se encuentran dentro del límite permisible, según la norma técnica peruana, hasta los 70 días de almacenamiento.

Los resultados de estabilidad oxidativa y periodo de inducción (PI) confirman que la microencapsulación de los aceites de sacha inchi prolongan la vida útil de los aceites de sacha inchi hasta en 89,8 % para el ecotipo *P. huayllabambana* y en 213,7 % para el ecotipo *P. volubilis*. La mayoría de los materiales de pared utilizados en el proceso de microencapsulación protegieron a los aceites de sacha inchi del proceso de oxidación lipídica, siendo el material de pared Hi-cap el que mejor protegió, seguido por la mezcla ternaria (GA+MD+WPI), GA y por último por la mezcla binaria (GA + MD).

El tiempo de vida útil (a 25 °C) de los microencapsulados de aceite de sacha inchi (*P. huayllabambana*), fue: ASIH+Hicap (93,0 días) > ASIH+ GA+MD+WPI (67,3 días) > ASIH + GA (62,8 días) > ASIH+GA+MD (60,7 días) > ASIH (49,0 días); mientras que para el ecotipo *P. volubilis* fue: ASIV+Hi-cap (144,3 días) > ASIH+GA+MD+WPI (84,1 días) > ASIV+GA (79,9 días) > ASIV+GA+MD (79,0 días) > ASIV (46,0 días). Por tanto, el tiempo de vida útil de los microencapsulados de los aceites de sacha inchi fue mucho mayor que los aceites de sacha inchi sin microencapsular.

AGRADECIMIENTO

Los autores agradecen el apoyo financiero del Programa Nacional de Investigación Agraria, PNIA del Ministerio de Agricultura y Riego, al Banco Mundial (Proyecto: 020-2015-PNIA/UPMSI/IE “Microencapsulación de los aceites de sacha inchi *Plukenetia volubilis* y *Plukenetia huayllabambana* y antioxidantes de la biodiversidad peruana. Contribución al desarrollo de alimentos funcionales conteniendo omega 3 para prevenir enfermedades crónicas no transmisibles”) y a la Universidad de Lima-Perú.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Galli C, Marangoni F. N-3 fatty acid in the Mediterranean diet. Prostaglandins Leulot Essent Fatty Acids. 2006; 15(3):129-133.
2. Chasquibol NA, del Aguila C, Yácono JC, Guinda AA, Moreda W, Gómez-Coca RB, Pérez-Camino MC. Characterization of glyceridic and unsaponifiable compounds of sacha inchi (*Plukenetia huayllabambana* L.) Oils. J Agric Food Chem. 2014; 62(41):10162–10169.
3. Triana-Maldonado DM, Torijano-Gutiérrez SA, Giraldo-Estrada C. Supercritical CO₂ extraction of oil and omega-3 concentrate from Sacha inchi (*Plukenetia volubilis* L.) from Antioquia, Colombia. Grasas Aceites. 2017; 68(1): e172. doi: 10.3989/gya.0786161.

4. Calvo P, Castaño A, Lozano M, Gonzales D. Influence of the microencapsulation on the quality parameters and shelf – life of extra –virgin olive oil encapsulated in the presence of BHT and different capsule Wall components. *Food Res Int.* 2012; 45: 256-261.
5. Quispe-Condori S, Saldaña MDA. Microencapsulation of sachá inchi (*Plukenetia volubilis* L.) oil with zein. *Food Process Engineering in a Changing World. Proceedings of the 11th International Congress on Engineering and Food, May 22-26, 2011; Athens, Greece.*
6. Vicente J, de Souza Cezarino T, Barreto Pereira LJ, Pinto da Rocha E, Raymundo Sá G, Domingues Gamallo O, de Carvalho MG, García-Rojas EE. Microencapsulation of sachá inchi oil using emulsion-based delivery systems. *Food Res Int.* 2017; 99: 612-622.
7. Frank J, Geil JV, Freaso R. Automatic Determination of Oxidation Stability of Oil and Fatty Products. *Food Technol.* 1982; 36: 71-76.
8. De Man JM, Tie F, de Man L. Formation of Short Chain Volatile Organic Acids in the Automated AOI Method. *J Am Oil Chemists'Soc.* 1987; 64: 993-996.
9. Rauen A, Estoves W, Barrera D. Determinación del período de inducción de aceite de soja - Correlación entre el Rancimat y otros índices. *Grasas y Aceites.* 1992; 43: 119-122.
10. Kolanowski W, Laufenberg G, Kunz B. Fish oil stabilization by microencapsulation with modified cellulose. *Int J Food Sci Nutr.* 2004; 55(4): 333-343.
11. Huntington D. The Influence of the Spray Drying Process on Product. *Drying Technol.* 2007; 22(6): 1261-1287.
12. Páez M, Ochoa C, Fernández A. Condiciones de operación en secado por aspersión de extracto de levadura: efecto sobre propiedades físicas. *Agron Colomb.* 2016; 34: S602-S605
13. Norma Técnica Peruana 151.400, 2009. Requisitos Aceite Sachá Inchi. Lima, Perú: INDECOPI; 2014.
14. Rodríguez G, Villanueva E, Glorio P, Baquerizo M. Estabilidad oxidativa y estimación de la vida útil del aceite de sachá inchi (*Plukenetia volubilis*). *Sciencia Agropecuaria.* 2015; 155-163.
15. Iparraguirre K. Contribución al estudio de la vida útil de los aceites de sachá inchi (*Plukenetia huayllabambana* y *P. volubilis*) microencapsulados y su importancia en la industria alimentaria. [Tesis para optar el título de Ingeniero Industrial]. Lima: Universidad de Lima; 2019.

**PROPIEDADES FÍSICOQUÍMICAS, FUNCIONALES Y
ESTRUCTURALES DE ALMIDONES NATIVOS Y ACETILADOS
OBTENIDOS A PARTIR DE LA PAPA
(*Solanum tuberosum*) var. 'ÚNICA'**

Patricia Martínez, Fiorela Peña, Yelena Gómez, Guino Vargas, Carmen Velezmore*

RESUMEN

La acetilación es una modificación química de la estructura del almidón que consiste en reemplazar un determinado número de grupos hidroxilos por grupos acetilos empleando anhídrido acético. Este proceso depende de ciertos factores, tales como la fuente de almidón, la concentración del anhídrido acético, el tiempo de reacción y el pH. El objetivo de este estudio fue caracterizar el almidón nativo (obtenido de la papa var. 'Única') y los almidones acetilados, mediante espectroscopía FT-IR, y evaluar sus propiedades fisicoquímicas (contenido de amilosa, color) y propiedades funcionales (poder de hinchamiento, solubilidad, capacidad de retención de agua, propiedades térmicas y propiedades de formación de pasta). Las muestras estudiadas fueron el almidón nativo (AN) y los almidones modificados por acetilación con diferentes concentraciones de anhídrido acético al 5 %, 10 % y 15 % (AAc5%, AAc10% y AAc15%). Los contenidos de amilosa aparente para el almidón nativo y almidón acetilado (AAc15%) fueron 17,3 y 31,4 %, respectivamente. Los parámetros de color no cambiaron con la acetilación. La temperatura y entalpía de gelatinización, así como el perfil de formación de pasta, disminuyeron para los almidones acetilados con respecto al almidón nativo. Durante la prueba de formación de pasta, el almidón acetilado con 15% de anhídrido acético presentó un bajo valor de la viscosidad máxima (1599,4 mPa·s) con respecto al valor observado para el almidón nativo (3065,8 mPa·s).

Palabras clave: almidón acetilado, amilosa, poder de hinchamiento, gelatinización, FT-IR.

Departamento de Ingeniería de Alimentos, Facultad de Industrias Alimentarias, Universidad Nacional Agraria La Molina, Av. La Molina s/n, La Molina, C.P. 12056, Lima, Perú.

* cevs@lamolina.edu.pe

PHYSICOCHEMICAL, FUNCTIONAL AND STRUCTURAL PROPERTIES OF NATIVE AND ACETYLATED POTATO (*Solanum tuberosum*) STARCHES ISOLATED FROM 'ÚNICA' VARIETY

ABSTRACT

Acetylation is a chemical modification of the starch structure that consists of replacing a certain number of hydroxyl groups with acetyl groups using acetic anhydride. This process depends on certain factors, such as starch source, acetic anhydride concentration, reaction time and pH. The aim of this study was to characterize the native starch (isolated from a commercial potato 'Única' variety) and the acetylated starches by FT-IR spectroscopy, and evaluate their physicochemical (amylose content, color) and functional properties (swelling power, solubility, water retention capacity, thermal properties, and pasting profile). The evaluated samples were native starch (AN) and modified starches by acetylation with different concentrations of 5 %, 10 % and 15 % acetic anhydride (AAc5%, AAc10% and AAc15%). The apparent amylose contents for native starch and acetylated starch (AAc15%) were 17,3 and 31,4 %, respectively. The color parameters did not change after the acetylation. Both, the temperature and the enthalpy of gelatinization as well as the pasting profile decreased for the acetylated starches with respect to the AN starch. During pasting test, acetylated starch (AAc15%) showed a low value of the maximum viscosity (1599,4 mPa·s) with respect to the value observed for native starch (3065,8 mPa·s).

Key words: acetylated starch, amylose, swelling power, gelatinization, FT-IR.

INTRODUCCIÓN

El almidón es un polisacárido que se utiliza en la industria alimentaria como agente espesante, estabilizante, gelificante, formador de película, encapsulante e higroscópico, entre otros^{1,2}. Sin embargo, el almidón en su forma nativa tiene poca aplicación debido a su baja solubilidad en disolventes orgánicos comunes que limitan su proceso en la industria alimentaria^{1,2,3}. Estas deficiencias pueden ser superadas realizando una modificación estructural del almidón.

Se han utilizado diferentes métodos físicos, químicos y enzimáticos para la modificación del almidón nativo⁴. La modificación del almidón nativo por acetilación se logra al reemplazar los grupos OH por grupos acetilo (CH_3CO) a lo largo de su estructura polimérica^{5,7}. En la reacción de acetilación, la cantidad de grupos acetilo incorporados en la molécula de almidón, la velocidad y la eficiencia de la reacción, dependen de la naturaleza del reactivo, la concentración, pH, la presencia de catalizador, el tiempo de reacción, el origen botánico del almidón y su tamaño, y las características estructurales del gránulo nativo^{4,7}.

El almidón acetilado se clasifica según su grado de sustitución (GS) en bajo y alto. Los almidones acetilados con bajo GS (<0,1) se usan comúnmente en la industria alimentaria

pues confieren consistencia, textura y estabilidad^{5,9,10}; mientras que los almidones con alto GS (>1,0) se utilizan como sustitutos celulósicos de acetato termoplásticos⁷. El estudio de las propiedades de los almidones acetilados es importante para mejorar en las propiedades finales del alimento o algún proceso industrial^{1,7,8}.

Algunas propiedades fisicoquímicas y funcionales de los almidones acetilados mostraron un aumento en la solubilidad de estos almidones, el poder de hinchamiento, la translucidez, y en la estabilidad de almacenamiento; se redujo la viscosidad, la temperatura de gelatinización, y se eliminó la retrogradación^{4,5,7}. La retrogradación del almidón es el proceso que sigue a la gelatinización, es decir, se produce cuando la dispersión de almidón se enfría. En este proceso, las cadenas lineales de almidón interactúan entre sí, a través de los grupos hidroxilo, por medio de puentes de hidrógeno, formando un precipitado insoluble, y esta interacción genera que se retenga agua en los intersticios del almidón. Existen varios estudios referidos al efecto de la acetilación sobre las propiedades de los almidones de diferentes fuentes⁸. La acetilación del almidón ocasiona una ruptura de los gránulos, disminución relativa de la cristalinidad, así como también, la disminución de la temperatura y entalpía de gelatinización⁸. En otro estudio, la acetilación del almidón de taro mejoró el poder de hinchamiento del gránulo y redujo la solubilidad del almidón; aunque también disminuyeron la temperatura de formación de pasta, así como la temperatura y la entalpía de gelatinización⁸.

La variedad de papa 'Única', es una variedad comercial que ha sido mejorada en la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM), y su contenido de amilosa se encuentra por debajo de lo que comúnmente se encuentra en los almidones de papas nativas. Sin embargo, para algunos usos industriales se necesitan obtener almidones que produzcan geles con baja viscosidad, lo que está relacionado con el contenido de amilosa en el almidón. Así, para evaluar la posibilidad de uso de almidones acetilados, obtenidos de esta variedad de papa; se planteó como objetivo estudiar algunas propiedades fisicoquímicas, funcionales y estructurales de los almidones acetilados.

PARTE EXPERIMENTAL

Materiales y métodos

Se emplearon los almidones: nativo (AN) y acetilados con anhídrido acético (AAc5%, AAc10%, AAc15%), el almidón AN fue extraído de una variedad comercial papa (*Solanum tuberosum*) var. 'Única', adquirida en la UNALM (Latitud: 12°4'35.72"S, Longitud: 76°56'38.9"W) (distrito La Molina, provincia Lima, región Lima, Perú) (Vargas *et al.*⁹).

Reactivos

Las sustancias hidróxido de sodio (NaOH, CAS 1310-73-2), yoduro de potasio (KI, CAS 7681-11-0, pureza 99,5%) y yodo resublimado (I₂, CAS 7553-56-2, pureza 99,8%) fueron adquiridas de la empresa Merck® (Hohenbrunn, Alemania). Los polisacáridos amilosa de papa Tipo III (CAS 9005-82-7), amilopectina de papa (CAS 9037-22-3) y el solvente dimetilsulfóxido (C₂H₆OS, CAS 67-68-5, pureza 99,9%) fueron adquiridos de Sigma-Aldrich

(St. Louis, MO, USA). El agua destilada fue utilizada para la preparación de los geles de almidón y preparación de las soluciones empleadas.

Equipos

Agitador magnético (HEIDOLPH, modelo MR Hei-Tec., Alemania), agitador Vortex (VELP®, modelo Wizard, Scientific, USA), balanza analítica (OHAUS®, modelo Explorer, USA), baño de agua con agitación (GFL, modelo 1083, Alemania), centrífuga (HETTICH, modelo Rotofix 32, Alemania), espectrocolorímetro (KONICA MINOLTA, modelo CM-5, Japón), espectrofotómetro (Thermo Fisher SCIENTIFIC®, modelo GENESYS 10S UV-Vis, USA), espectrofotómetro infrarrojo con Transformada de Fourier equipado (FT-IR) con atenuador de reflectancia total (Thermo Scientific Inc., modelo Nicolet iS10, USA), estufa (MMM, modelo Venticell55, Alemania), multicalorímetro diferencial de barrido con celdas de acero inoxidable Hastelloy® (TA Instruments modelo Multi-Cell DSC, USA), reómetro híbrido con celda de formación de pasta de almidón (SPC) y geometría tipo rotor (TA Instruments, modelo DHR-3, USA), y refrigeradora-congeladora (GENERAL ELECTRIC®, China).

Metodología

Contenido de amilosa aparente

Se utilizó el método colorimétrico de yoduro descrito por McGrance *et al.*¹⁰ con algunas modificaciones, en el que se relaciona el color característico de la reacción de amilosa y amilopectina con el reactivo de yodo (I_2 -KI). Se pesó 20 mg de almidón (base seca) en un tubo de ensayo de 15 mL y se añadió 8 mL de dimetilsulfóxido hasta su disolución, durante 15 min, en un baño de agua con agitación a $85 \pm 0,2^\circ\text{C}$. Luego, esta solución se colocó dentro de un matraz aforado y se diluyó con agua destilada hasta 50 mL. De esta disolución, se tomó 50 μL y se colocó dentro de un matraz aforado donde se adicionó 5 mL de solución de I_2 (0.0025 M)-KI (0.0065 M) y se enrasó el matraz con agua destilada hasta 50 mL con agitación constante. Se extrae una muestra de esta solución y se lleva a un espectrofotómetro para obtener la absorbancia de la muestra a una longitud de onda de 600 nm. Previamente, se realizaron lecturas de absorbancia de mezclas de amilosa y amilopectina puras de papa, y con un contenido de amilosa de 0, 10, 15, 20, 25, 30 y 35 % en masa, con la finalidad de determinar la cantidad de amilosa aparente con ayuda de una curva patrón preparada.

Evaluación del color

Se utilizó el método descrito por Dufossé *et al.*¹¹ empleando el espectrocolorímetro previamente calibrado. Se colocó el portamuestra cilíndrico (58 mm de diámetro y 15 mm de profundidad) que contenía una cantidad de muestra de almidón sobre el puerto de luz (50 mm de diámetro). La información dada por los parámetros L^* , a^* , b^* y ΔE se expresa generalmente como el color total de las muestras en polvo, representando L^* la luminosidad, a^* el cambio de rojo a verde y b^* el cambio del amarillo al azul.

Poder de hinchamiento, solubilidad y capacidad de absorción de agua

Para la determinación del poder de hinchamiento (PH), solubilidad (S) y capacidad de absorción de agua (CAA) se siguió el método descrito por Gani *et al.*¹², para lo cual se pesó

0,6 g (M_0) de muestra de almidón y se mezcló con 30 mL de agua destilada. La suspensión se agitó y se colocó en un baño de agua durante 30 min a 60, 70, 80 y 90 °C. Después, se enfrió la muestra a temperatura ambiente y se centrifugó a $1500 \times g$ durante 30 min. El sobrenadante se retiró cuidadosamente y el sedimento de almidón hinchado se pesó (M_1). El sobrenadante se colocó en placas Petri, y luego se llevó a la estufa a 90°C durante 4 h, hasta obtener un peso constante (M_2). Los valores del poder de hinchamiento, solubilidad y la capacidad de absorción de agua se calcularon a partir de las siguientes ecuaciones:

$$PH = \frac{M_1 \text{ gel (g)}}{(M_0 \text{ almidón} - M_2 \text{ sobrenadante seco (g)})}$$

$$S(\%) = \frac{M_2 \text{ sobrenadante seco (g)}}{M_0 \text{ almidón (g)}} \times 100$$

$$CAA = \frac{M_1 \text{ gel (g)}}{M_0 \text{ almidón (g)}}$$

Propiedades térmicas

Las propiedades térmicas de gelatinización del almidón se determinaron mediante el uso del calorímetro diferencial de barrido según la metodología descrita por Lin *et al.*¹³. Se pesó aproximadamente 20 mg de almidón en cada celda y se añadió agua ultra pura con una micropipeta (v/v, almidón:agua = 1:3), luego se sellaron herméticamente las celdas y se equilibraron a temperatura ambiente durante 1 h para permitir la hidratación completa del almidón. Las celdas con las muestras se calentaron desde 25 hasta 115°C con una velocidad de calentamiento de 2°C/min, y usando una celda vacía como referencia. Los datos obtenidos fueron: la temperatura inicial (T_0), temperatura de pico (T_p), temperatura de conclusión (T_c) y la entalpía de gelatinización (ΔH).

Propiedades de formación de pasta

El perfil de formación de pasta fue determinado según el método de la AACCC14 con algunas modificaciones. La suspensión preparada de almidón al 8 % (p/p, base seca) se mantuvo por 2 min a 40°C, luego, esta suspensión fue calentada hasta 95°C a 6°C/min, durante 8 min. Finalmente, la pasta fue enfriada hasta 50°C a 6°C/min, manteniéndose a 50°C durante 2 min. La velocidad de agitación fue constante e igual 160 rpm.

Espectroscopía Infrarrojo con Transformada de Fourier (FT-IR) con Atenuador de Reflectancia (ATR)

Los espectros registrados de cada almidón fueron analizados usando la metodología informada por Hoyos-Leyva *et al.*¹⁵ dentro del rango espectral de número de onda desde 400 hasta 4000 cm^{-1} con una resolución de 4 cm^{-1} y una velocidad de 200 escaneos por muestra. Previo al análisis, las muestras fueron acondicionadas a $23 \pm 2^\circ\text{C}$ y 0 % humedad relativa por 10 días en un desecador. Los espectros fueron obtenidos empleando el software OMNIC v.9 para la creación de los diagramas espectrales.

Análisis estadístico

Todos los ensayos fueron realizados por triplicado, con preparación individual como ha sido descrito en cada método. Los datos obtenidos se expresaron como media \pm desviación estándar. El análisis de varianza se utilizó para calcular las diferencias significativas y se usó la prueba de discriminación de diferencias múltiples de Fisher, usando $p < 0,05$ como nivel de significancia. El paquete estadístico *Statgraphics* CENTURION XV (*Statgraphics Corp.*, Rockville, MD) fue utilizado para analizar los datos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Contenido de amilosa aparente

El contenido de amilosa aparente para los almidones nativo y acetilados presentaron diferencias significativas ($p < 0,05$) (tabla 1). El almidón nativo de papa ‘Única’ presentó un contenido de amilosa de 17,3 %. Este valor obtenido fue menor a los valores registrados en almidones de papas nativas de Cusco (24,34 – 29,11 %), informados por Martínez *et al.*¹⁶, y, además, el porcentaje de amilosa que evidenció el almidón de papa variedad ‘Única’ se encuentra dentro del rango de los valores obtenidos en almidones de diferentes cultivares de papa de India (15,0 – 23,1 %) informado por Singh *et al.*¹.

Tabla 1. Contenido de amilosa aparente (%) en los almidones de papa nativa y acetilados.

Almidón	Grupos acetilo (%) (*)	Grado de sustitución (*)	Amilosa aparente (%)
AN	--	--	17,3 \pm 0,17 ^a
AAc 5%	0,44 \pm 0,02 ^a	0,02 \pm 0,00 ^a	24,4 \pm 0,40 ^b
AAc 10%	0,87 \pm 0,02 ^b	0,03 \pm 0,00 ^b	29,7 \pm 0,15 ^c
AAc 15%	1,26 \pm 0,01 ^c	0,05 \pm 0,00 ^c	31,4 \pm 0,26 ^d

(*) Vargas *et al.*⁹

Valores promedio \pm desviación estándar; valores en la misma columna con diferentes letras son significativamente diferentes ($p < 0,05$).

La tabla 1 muestra que el contenido de amilosa aparente en los almidones AAc5%, AAc10%, y AAc15% aumentó según el número de los grupos acetilo formados (el símbolo % representa el porcentaje en peso de grupos acetilo en el almidón en base seca) y según el grado de sustitución (número promedio de sitios sustituidos por unidad de glucosa) en el almidón modificado. Este resultado fue similar a los informados por Mbougoung *et al.*¹⁸, con respecto a los almidones acetilados de papa *Sipiera* que registraron mayores contenidos de amilosa aparente (39,16–41,11 %), y por Singh *et al.*¹⁷ con respecto al almidón acetilado de papa comercial con menores contenidos de amilosa aparente (19,5–22,9 %). Betancur *et al.*⁴ sostienen que este incremento en el contenido de amilosa aparente podría deberse a que los grupos acetilo formados en las cadenas de almidón interfieren con la reagrupación de las fracciones amilosa y amilopectina durante el enfriamiento de las moléculas de almidón que han sido sometidas a un proceso de gelatinización. Tal es así que, la creación de más segmentos lineales (amilosa) facilita la absorción de una mayor cantidad de yodo, que se refleja en el contenido de amilosa aparente obtenida, que depende del número de grupos acetilo formados.

Determinación de color

Los parámetros de color L^* , a^* , y b^* de los almidones nativo y acetilados se presentan en la tabla 2. El color blanco es una propiedad física primordial de los almidones y en muchas aplicaciones industriales esta característica es muy significativa, como parámetro de calidad; en general, se busca que los almidones puedan ser utilizados en las formulaciones de productos sin impartir un color adverso (Joaqui y Villada¹⁹).

Tabla 2. Efecto de la acetilación sobre los parámetros de color en los almidones nativo y acetilados.

Almidón	Grupos acetilo (%) (*)	Grado de sustitución (*)	Amilosa aparente (%)
AN	--	--	17,3 ± 0,17 ^a
AAc 5%	0,44 ± 0,02 ^a	0,02 ± 0,00 ^a	24,4 ± 0,40 ^b
AAc 10%	0,87 ± 0,02 ^b	0,03 ± 0,00 ^b	29,7 ± 0,15 ^c
AAc 15%	1,26 ± 0,01 ^c	0,05 ± 0,00 ^c	31,4 ± 0,26 ^d

(*) Vargas *et al.*⁹

Valores promedio ± desviación estándar; valores en la misma columna con diferentes letras son significativamente diferentes ($p < 0,05$).

Los resultados de la evaluación del color en los almidones de papa nativo y acetilados indican que existen diferencias significativas ($p < 0,05$). El valor de L^* para el almidón de papa nativo fue de 95,35. Este valor fue menor con respecto a los valores L^* encontrados en este trabajo para los almidones AAc5%, AAc10% y AAc15% (96,79–96,83), ligeramente mayor al informado por Das *et al.*²⁰ (93,89) para almidón nativo de camote de India y se encuentra dentro del rango de los valores L^* (94,28–96,67) informados por Das *et al.*²⁰ para almidones de camote acetilados con vinil acetato.

El valor de a^* para el almidón nativo de papa fue igual a -0,12 mientras que los valores de a^* para almidones acetilados (AAc5%, AAc10% y AAc15%), estuvieron en el rango de -0,16 y -0,23 con diferencias significativas ($p < 0,05$). Sin embargo, Das *et al.*²⁰ informaron valores positivos de a^* (0,17–0,22) encontrados para almidones de camote acetilados con vinil acetato. Los valores negativos de a^* ubican a estos almidones en la fracción verde, y por estar cercano al valor cero, tienen más tendencia a un color neutro (Joaqui y Villada¹⁹). Por otro lado, los valores de b^* oscilaron entre 1,62 y 2,90, para los almidones acetilados (AAc5%, AAc10% y AAc15%) y el almidón nativo presentó un valor de b^* igual a 3,45; estos valores también presentaron diferencias significativas ($p < 0,05$). Das *et al.*²⁰ informaron mayores valores de b^* (3,06–3,27) para almidones acetilados y un valor de b^* igual a 3,32 para el almidón nativo. Los valores positivos de b^* indican una ligera tendencia al color amarillo.

Poder de hinchamiento, solubilidad y capacidad de absorción de agua

El aumento de los valores del poder de hinchamiento (PH) (tabla 3) de los almidones acetilados, observado a diferentes temperaturas, puede atribuirse a la presencia de los

grupos acetilo formados como resultado de la modificación química estructural realizada. Esta modificación altera la estructura del almidón, ocasionando la ruptura de los enlaces de hidrógeno y permitiendo mayor ingreso del agua en el almidón, lo que finalmente resulta en un mayor PH del almidón acetilado (figura 1) (Betancur *et al.*⁴, Ali & Hasnain²¹).

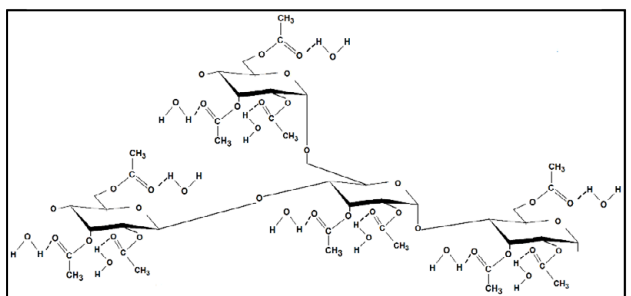


Figura 1. Fórmula estructural del almidón acetilado y sus probables enlaces de hidrógeno.

Para el almidón nativo, el valor de PH a 90°C (15,86 g/g) fue menor con respecto a los valores de PH evaluados en almidones de papas nativas de Cusco (23,9–28,5 g/g)¹⁶, en almidones de papas de la India (58,12–70,15 g/g)¹ y almidón de papa de la India (20,3 g/g)¹⁷. Con respecto a los almidones acetilados, Singh *et al.*¹ informaron acerca de valores muy altos de PH encontrados (64,15–70,58 g/g) mientras que Singh *et al.*¹⁷ informaron acerca de valores de PH (22,8–34,4 g/g) cercanos a los encontrados en este estudio (18,36–21,62 g/g).

Tabla 3. Poder de hinchamiento (PH), solubilidad (S) y capacidad de absorción de agua (CAA) en los almidones nativo y acetilados.

Temperatura (°C)	Almidón (GS)*	PH (g/g)	S (%)	CAA (g/g)
60	AN (0)	4,78 ± 0,06 ^a	1,52 ± 0,28 ^a	4,70 ± 0,05 ^a
	AAc 5% (0,02)	9,54 ± 0,10 ^b	3,29 ± 0,62 ^b	9,23 ± 0,04 ^b
	AAc10% (0,03)	11,13 ± 0,28 ^c	4,08 ± 1,03 ^b	10,68 ± 0,38 ^c
	AAc15% (0,05)	12,56 ± 0,02 ^d	4,80 ± 0,05 ^b	11,96 ± 0,01 ^d
70	AN (0)	13,32 ± 1,12 ^a	4,73 ± 0,06 ^a	12,69 ± 1,05 ^a
	AAc 5% (0,02)	13,67 ± 0,03 ^a	6,14 ± 0,13 ^b	12,83 ± 0,04 ^a
	AAc10% (0,03)	14,00 ± 0,14 ^{ab}	8,14 ± 0,61 ^c	12,86 ± 0,04 ^a
	AAc15% (0,05)	15,30 ± 0,24 ^b	9,67 ± 0,11 ^d	13,82 ± 0,24 ^a
80	AN (0)	15,22 ± 0,09 ^a	6,81 ± 0,02 ^a	14,18 ± 0,08 ^a
	AAc 5% (0,02)	15,57 ± 0,38 ^a	7,41 ± 0,44 ^a	14,42 ± 0,28 ^a
	AAc10% (0,03)	16,50 ± 0,71 ^{ab}	10,17 ± 0,52 ^b	14,82 ± 0,72 ^a
	AAc15% (0,05)	17,17 ± 0,45 ^b	10,29 ± 0,20 ^b	15,41 ± 0,44 ^a
90	AN (0)	15,86 ± 0,20 ^a	8,94 ± 0,20 ^a	14,44 ± 0,15 ^a
	AAc 5% (0,02)	18,36 ± 0,04 ^b	11,56 ± 0,93 ^b	16,24 ± 0,14 ^b
	AAc10% (0,03)	20,81 ± 0,86 ^c	13,61 ± 0,60 ^c	17,98 ± 0,62 ^c
	AAc15% (0,05)	21,62 ± 0,57 ^c	14,07 ± 0,43 ^c	18,58 ± 0,59 ^c

(*) Vargas *et al.*⁹
Valores promedio ± desviación estándar; valores en la misma columna con diferentes letras son significativamente diferentes ($p < 0,05$).

Los resultados de la solubilidad (S) del almidón nativo y de los almidones acetilados presentaron diferencias significativas ($p < 0,05$) (tabla 3). A medida que se incrementa el grado de acetilación aumenta la solubilidad del almidón en el agua, debido a una mayor captación de moléculas de agua y a la ruptura de los enlaces de hidrógeno que produce una mayor movilidad de las cadenas poliméricas (amilosa y amilopectina) y la lixiviación de la amilosa (Ali & Hasnain²¹). Estos valores tendrían una correlación significativa con el contenido de los grupos acetilos formados en almidones de papa acetilados (AAc5%, AAc10%, AAc15%). Para el almidón nativo, el valor de S a 90°C (8,94 %) fue más bajo con respecto a los valores de S informados por Singh *et al.*¹ (10,2–19,2 %) para almidones de papas de la India y por Martínez *et al.*¹⁶ (16,4–20,8%) para almidones de papas nativas de Cusco. Sin embargo, el valor de valor de S encontrado para el almidón nativo fue mayor al valor de S (5 %) encontrado para el almidón de papa de la India informado por Singh *et al.*¹⁷.

La capacidad de absorción de agua (CAA) del almidón nativo y de los almidones acetilados presentaron diferencias significativas ($p < 0,05$) a 60 y 90°C (tabla 3). En este estudio, los valores de CAA para los almidones acetilados son mayores que para el almidón nativo, y aumentaron con el mayor grado de sustitución. Esto demuestra que la tendencia hidrofílica del almidón aumentó con la acetilación, pues se asegura una alta retención de agua que ingresa al gránulo, aumenta el poder de hinchamiento y favorece la gelatinización (Betancur *et al.*⁴, Mbougoung *et al.*¹⁸). El valor de CAA a 90°C (14,44 g/g) obtenido en el almidón nativo, fue menor con respecto a los valores valor de CAA encontrados en almidones de papas nativas de Cusco (18,9–22,7 g/g), informados por Martínez *et al.*¹⁶, y en almidón nativo de papa de Irlanda (42 g/g), informados por Mbougoung *et al.*¹⁸. Los valores de CAA encontrados para los almidones acetilados a 90°C (16,24–18,58 g/g) son menores a los valores de CAA encontrados para almidón acetilado de papa 2425 de Irlanda (40 g/g) informados por Mbougoung *et al.*¹⁸.

Propiedades térmicas de los geles de almidón

Las propiedades térmicas de los geles de almidones nativo y acetilados presentaron diferencias significativas ($p < 0,05$) (tabla 4). Las temperaturas (T_o , T_p y T_c) y la entalpía de gelatinización (ΔH_g) disminuyeron a medida que aumentó el número de grupos acetilo formados, de tal forma que el almidón nativo presentó temperaturas de gelatinización y entalpía más altas que las de los almidones acetilados; lo que coincide con la modificación por acetilación de almidones nativos de diversas fuentes botánicas (Sánchez-Rivera *et al.*⁶, Singh *et al.*¹⁷; Wang y Wang⁵).

Tabla 4. Temperaturas y entalpía de gelatinización de los almidones nativo y acetilados.

Almidón	T _o (°C)	T _p (°C)	T _c (°C)	ΔH _g (J/g)*
AN	62,28 ± 0,26 ^c	65,79 ± 0,25 ^c	72,44 ± 0,26 ^d	15,16 ± 0,18 ^b
AAc5%	59,79 ± 0,12 ^c	64,49 ± 0,16 ^b	70,31 ± 0,15 ^c	13,55 ± 0,93 ^a
AAc10%	59,73 ± 0,04 ^b	64,30 ± 0,11 ^b	69,86 ± 0,01 ^b	13,51 ± 0,04 ^a
AAc15%	58,28 ± 0,28 ^a	62,47 ± 0,17 ^a	69,28 ± 0,15 ^a	13,35 ± 0,28 ^a

*en base seca

Valores promedio ± desviación estándar; valores en la misma columna con diferentes letras son significativamente diferentes ($p < 0,05$).

Tal como se observa en la tabla 4, la temperatura de gelatinización fue menor en el almidón AAc15% con respecto a los otros almidones acetilados (AAc5% y AAc10%). Estos resultados indican una desorganización de la doble hélice de la amilopectina (Núñez-Santiago *et al.*³) y una menor estabilidad del almidón después de la acetilación (Ali & Hasnain²¹). Esta menor estabilidad de los almidones acetilados se atribuye a la desorganización del ensamblaje interno del almidón debido a la pérdida de las fuerzas de atracción intramolecular e intermolecular, lo que resulta en una pérdida eventual de la región cristalina que conduce a una hidratación y gelatinización más fácil de los gránulos de almidón químicamente modificados, y por consiguiente una disminución de la temperatura de gelatinización (Ali & Hasnain²¹, Núñez-Santiago *et al.*³, Singh *et al.*¹⁷, Wang y Wang⁵). El almidón acetilado AAc15% (GS 0,05), presentó la entalpía de gelatinización más baja comparada con los demás almidones AAc5% y AAc10%. Este resultado puede atribuirse a la presencia de los grupos acetilos y al incremento en el número de enlaces de hidrógeno en las moléculas de almidón, lo que favoreció la gelatinización a baja temperatura (Singh *et al.*¹⁷).

Mbougung *et al.*¹⁸ afirmaron que la disminución de la temperatura de gelatinización del almidón acetilado con respecto al almidón nativo es una de las numerosas ventajas conseguidas con la modificación del almidón por acetilación, lo que permite emplear a estos derivados en procesos cuando un agente espesante debe gelificarse a temperaturas más bajas o simplemente reducir los costos energéticos durante la fabricación de los productos donde se utilizan estos derivados. Los resultados obtenidos son similares a los informados por Singh *et al.*¹ para almidones de cuatro variedades de papa de India, por Simsek *et al.*⁸ para almidones de dos variedades de frijol de México, y por Singh *et al.*¹⁷ para almidón de papa de India empleando diferentes concentraciones de anhídrido acético.

Propiedades de formación de pasta

Cuando la suspensión de almidón se calienta, la viscosidad aumenta gradualmente hasta alcanzar un valor máximo, denominada viscosidad máxima, que representa el período desde el hinchamiento de los gránulos hasta la ruptura de la red de almidón (Núñez-Santiago *et al.*³, Sánchez-Rivera *et al.*⁶, Bello-Pérez *et al.*⁷). En la figura 2 se observa el perfil de formación de pasta de los almidones estudiados, donde la curva continua observada en la parte superior, indica el cambio de temperatura durante las etapas de calentamiento, mantenimiento y

enfriamiento en la formación de la pasta. Cuando el almidón se calienta en exceso de agua, sus gránulos se hinchan y al mismo tiempo, parte de sus componentes (amilosa y amilopectina) se solubilizan, dando lugar a una suspensión de partículas hinchadas y dispersas en una fase continua. A la concentración ensayada (8 %, p/p, base seca), el valor máximo de viscosidad del almidón AN fue 3065,8 mPa·s a una temperatura de 90°C; comportamiento similar presentaron los almidones AAc5%, AAc10%, y AAc15%, con menores valores de viscosidad máxima (2066,7; 2006,6 y 1599,4 mPa·s, respectivamente). Se pudo observar que a una acetilación del 15 %, la máxima viscosidad de formación de pasta se redujo a la mitad con respecto a la viscosidad del almidón nativo.

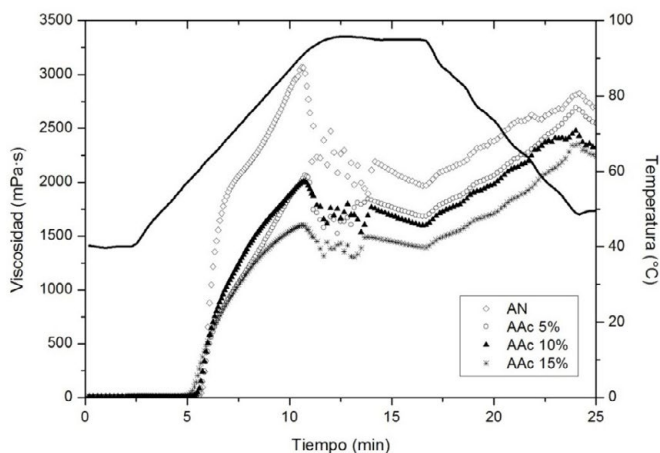


Figura 2. Perfil de formación de pasta de los almidones nativo y acetilados.

Espectroscopía Infrarrojo por Transformada de Fourier (FT-IR) con atenuador de reflectancia (ATR)

La espectroscopía FT-IR se utiliza para evaluar la organización de la región externa de los gránulos de almidón; el modo ATR se reconoce como un método de análisis de superficie, pues el haz infrarrojo penetra aproximadamente 2,0 mm en la superficie del gránulo de almidón (Hoyos-Leyva *et al.*¹⁵). La presencia de los grupos acetilo formados en los almidones modificados fue evidenciado mediante esta técnica espectroscópica. Los espectros de FT-IR de los almidones nativo y acetilados (figura 4) muestran bandas anchas de absorción en el rango de 3000–3700 cm^{-1} y 1641,57–1644,02 cm^{-1} correspondientes a las vibraciones de estiramiento y de flexión, respectivamente, de los grupos hidroxilos (OH) presentes en las unidades de glucosa que conforman las cadenas de amilosa y amilopectina. Estas bandas de absorción son similares a las bandas IR informadas por Hoyos-Leyva *et al.*¹⁵, Colussi *et al.*²³ y Shah *et al.*²². Además, en todos los espectros FT-IR se observa una señal cercana a 2928 cm^{-1} que corresponde a la frecuencia de estiramiento asimétrico del grupo metileno (–CH₂) (Shah *et al.*²²) y una banda ancha en el rango de 993,33–994,60 cm^{-1} asignada a las frecuencias de estiramientos de los enlaces C–OH (Chi *et al.*²).

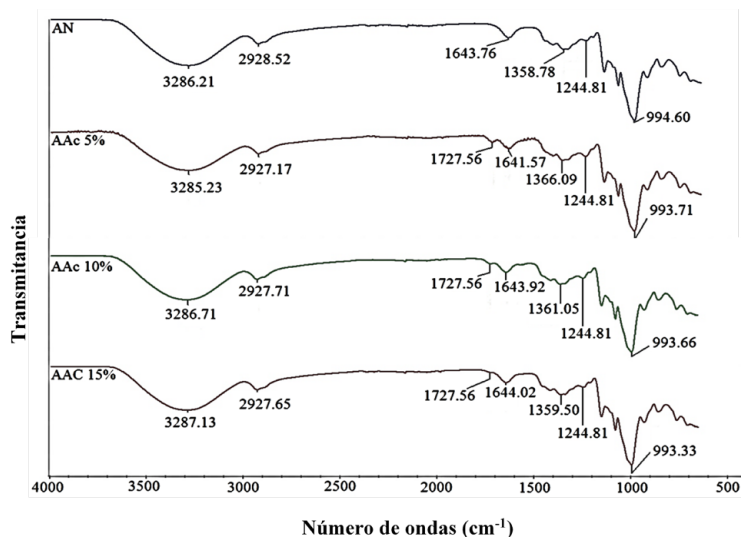


Figura 3. Espectros FT-IR para los almidones nativo y acetilados.

Los espectros FT-IR para los almidones AAc5%, AAc10%, y AAc15%, mostraron una nueva señal a $1727,56\text{ cm}^{-1}$ correspondiente a la vibración del grupo carboxilato ($-\text{COO}-$). Estas evidencias encontradas fueron similares a los resultados informados por Shah *et al.*²² y Colussi *et al.*²³. La aparición de bandas de absorción en el rango de $1358-1366\text{ cm}^{-1}$ y a $1244,81\text{ cm}^{-1}$, fueron asignadas a la vibración simétrica de los grupos CH_3 y las vibraciones de estiramiento del enlace $\text{C}-\text{O}$, respectivamente; valores similares fueron informados por Shah *et al.*²² y Colussi *et al.*²³. Además, Chi *et al.*² y Mbougueng *et al.*¹⁸ informaron que estos resultados confirmarían la presencia de grupos acetilos en los almidones modificados.

CONCLUSIONES

Mediante la espectroscopía FT-IR, se confirmó la presencia de los grupos acetilos en la estructura de los almidones modificados. Los almidones de papa acetilados mostraron un aumento en el contenido aparente de amilosa, con respecto al almidón nativo. La acetilación produjo una disminución en la viscosidad máxima durante la formación de pasta y este efecto fue mayor en los almidones acetilados con mayor porcentaje de grupos acetilos. Los almidones acetilados presentaron menores temperaturas y entalpías de gelatinización con respecto al almidón nativo; mientras que el poder de hinchamiento, solubilidad y capacidad de absorción de agua, aumentaron según el grado de sustitución de los grupos hidroxilos. Futuras investigaciones sobre la aplicación de los almidones modificados en alimentos se deben desarrollar dependiendo de la calidad de producto que se requiera comercializar.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a INNÓVATE PERÚ por el apoyo financiero en los Convenios N° 121-FINCYT-ECL-2014 y N° 139-PNICP-PIAP-2015. De igual manera, los autores agradecen a la Mg.Sc. Lena Téllez Monzón del Centro de Investigación en Química, Toxicología y Biotecnología Ambiental (CIQTOBIA) de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional Agraria La Molina, por su colaboración en el registro de los espectros FT-IR empleando el Espectrofotómetro Infrarrojo con Transformada de Fourier con Atenuador de Reflectancia.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Singh J, Kaur L, Singh N. Effect of Acetylation on Some Properties of Corn and Potato Starches. *Starch/Stärke*. 2004; 56: 586-601.
2. Chi H, Xu K, Wu X, Chen Q, Xue D, Song C, Zhang W, Wang P. Effect of acetylation on the properties of corn starch. *Food Chem*. 2008; 106: 923-92.
3. Núñez-Santiago C, García-Suarez FJ, Román-Gutiérrez AD, Bello-Pérez LA. Effect of reagent type on the acetylation of barley and maize starches. *Starch/Stärke*. 2010; 62(9): 489-497.
4. Betancur AD, Chel GL, Cañizares HE. Acetylation and characterization of *Canavalia ensiformis* starch. *J Agric Food Chem*. 1997; 45: 378-382.
5. Wang Y, Wang L. Characterization of acetylated waxy maize starches prepared under catalysis by different alkali and alkaline-earth hydroxides. *Starch/Stärke*. 2002; 54: 25-30.
6. Sánchez-Rivera MM, Flores-Ramírez I, Zamudio-Flores PB, González-Soto RA. Acetylation of banana (*Musa paradisiaca* L.) and maize (*Zea mays* L.) starches using a microwave heating procedure and iodine as catalyst: Partial characterization. *Starch/Stärke*. 2010; 62:155-164.
7. Bello-Pérez L, Agama-Acevedo E, Zamudio-Flores P, Mendez-Montealvo G, Rodríguez-Ambríz S. Effect of low and high acetylation degree in the morphological, physicochemical and structural characteristics of barley starch. *LWT Food Sci Technol*. 2010; 43(9): 1434-1440.
8. Simsek S, Ovando-Martínez M, Whitney K, Bello-Pérez L. Effect of acetylation, oxidation and annealing on physicochemical properties of bean starch. *Food Chem*. 2012; 134(4): 1796-1803.
9. Vargas G, Martínez P, Velezmoro C. Propiedades funcionales de almidón de papa (*Solanum tuberosum*) y su modificación química por acetilación. *Sci agropecu*. 2016; 7(3): 223-230.
10. McGrance S, Cornell H, Rix C. A simple and rapid colorimetric method for the determination of amylose in starch products. *Starch/Stärke*, 1998; 50(4): 158-163.
11. Dufossé L, Mabon P, Binet A. Assessment of the coloring strength of *Brevibacterium linens* strains: spectrophotometry versus total carotenoid extraction/quantification. *J Dairy Sci*. 2001; 84(2): 354-360.

12. Gani A, Nazia S, Rather SA, Wani SM, Shah A, Bashir M, Masoodi FA, Gani A. Effect of γ -irradiation on granule structure and physicochemical properties of starch extracted from two types of potatoes grown in Jammu & Kashmir, India. *LWT Food Sci Technol.* 2014; 58(1): 239-246.
13. Lin J, Kao W, Tsai Y, Chang Y. Effect of granular characteristics on pasting properties of starch blends. *Carbohydr Polym.* 2013; 98(2): 1553-1560.
14. AACC International. Approved Methods of Analysis, 11th Ed. Method 76-21.01. General Pasting Method for Wheat or Rye Flour or Starch Using the Rapid Visco Analyser. St. Paul, MN (U.S.A.): AACC International; Approved November 3, 1999. doi: 10.1094/AACCIIntMethod-76-21.01.
15. Hoyos-Leyva JD, Alonso-Gomez L, Rueda-Enciso J, Yee-Madeira H, Bello-Perez, LA, Alvarez-Ramirez J. Morphological, physicochemical and functional characteristics of starch from *Marantha ruiziana* Koern. *LWT Food Sci Technol.* 2017; (83): 150-156.
16. Martínez P, Málaga A, Betalleluz I, Ibarz A, Velezmoro C. Caracterización funcional de almidones nativos obtenidos de papas (*Solanum phureja*) nativas peruanas. *Sci agropecu.* 2015; 6(4): 291-301.
17. Singh N, Chawla D, Singh J. Influence of acetic anhydride on physicochemical, morphological and thermal properties of corn and potato starch. *Food Chem.* 2004; 86(4): 601-608.
18. Mbougung P, Tenin D, Scher J, Tchiégang C. Influence of acetylation on physicochemical, functional and thermal properties of potato and cassava starches. *J Food Eng.* 2012; 108(2): 320-326.
19. Joaqui D, Villada H. Propiedades ópticas y permeabilidad de vapor de agua en películas producidas a partir de almidón. *Rev Bio Agro.* 2013; 11(2): 59-68.
20. Das AB, Singh G, Singh S, Riar CS. Effect of acetylation and dual modification on physico-chemical, rheological and morphological characteristics of sweet potato (*Ipomoea batatas*) starch. *Carbohydr. Polym.* 2010; 80(3): 725-732.
21. Ali TM, & Hasnain, A. Physicochemical, morphological, thermal, pasting, and textural properties of starch acetates. *Food Rev Int.* 2015, 32(2): 161-180.
22. Shah A, Masoodi FA, Gani A, Ahmad B. Physicochemical, rheological and structural characterization of acetylated oat starches. *LWT Food Sci Technol.* 2017; 80: 19-26.
23. Colussi R, El Halal SL, Pinto VZ, Bartz J, Gutkoski LC, da Rosa E, Dias AR. Acetylation of rice starch in an aqueous medium for use in food. *LWT Food Sci Technol.* 2015; 62(2): 1076-1082.

REMOCIÓN DE LIGNINA EN EL PRETRATAMIENTO DE CASCARILLA DE ARROZ POR EXPLOSIÓN CON VAPOR

Ricardo Aaron Naveda Rengifo^{*b}, Paola Aurelia Jorge Montalvo^a,
Lisveth Flores del Pino^a, Lizardo Visitación Figueroa^{a,b}

RESUMEN

El presente estudio evaluó la remoción de la lignina de la cascarilla de arroz, mediante la explosión con vapor a diferentes condiciones de severidad. El proceso de remoción de lignina evaluado como lignina Klason fue realizado en muestras con pretratamiento a presiones de 0,4; 0,6; 0,8 y 1,0 MPa, tiempos de 6, 8, 10 y 12 minutos con una descompresión de entre 5 a 7 segundos; se logró una remoción de lignina desde 18,02 % hasta 12,7 % a 1,0 MPa y 12 min de compresión, factor de severidad de 3,3. La evaluación por FTIR de la cascarilla sin pretratamiento, con pretratamiento a 0,4 MPa y 12 min, 1,0 MPa y 12 min, nos presenta una reducción de la transmitancia generada por los picos que corresponden a la presencia de lignina –OH (2920 cm⁻¹), C-H y C-O (1320 y 1360 cm⁻¹), C-O-C a (1060 cm⁻¹) entre otros. La evaluación por microscopia de barrido electrónico (SEM) demostró el grado de remoción del tejido superficial de la cascarilla de arroz asociado con la remoción de lignina. El pretratamiento por explosión con vapor de la cascarilla de arroz mejora el potencial de hidrólisis de la cascarilla de arroz para la formación de azúcares reductores que puedan ser aprovechados en la producción de etanol G-2, debido a la remoción de lignina y exposición de la celulosa y hemicelulosa.

Palabra clave: explosión con vapor, cascarilla de arroz, lignina Klason, FTIR, SEM

LIGNINE REMOTION FROM RICE HUSK PRETREATMENT BY STEAM EXPLOSION

ABSTRACT

The present study evaluated the removal of lignin from the rice husk, by means of steam explosion at different severity conditions. The process of lignin removal was evaluated as lignin Klason was performed in samples with pretreatment at pressures of 0.4; 0.6; 0.8 and 1.0 MPa, times of 6, 8, 10 and 12 minutes with a decompression of between 5 to 7 seconds;

^a Centro de Investigación en Química, Toxicología y Biotecnología Ambiental CIQTOBIA Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima - Perú

^b Centro Modelo de Tratamiento de Residuos CEMTRAR - Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima – Perú

* aanaveda@gmail.com

it is a lignin removal from 18.02 % up to 12.7 % at 1.0 MPa and 12 min compression, factor of 3.3 severity. The evaluation by FTIR of the husk without pretreatment, with pretreatment at 0.4 MPa and 12 min, 1.0 MPa and 12 min, shows a reduction in the transmission generated by the peaks corresponding to the presence of lignin -OH (2920 cm^{-1}), CH and CO (1320 and 1360 cm^{-1}), COC a (1060 cm^{-1}) among others. The promoter per screening electronic microscopy (SEM) showed the degree of introducción Sud cantidades of the surface of the rice associated with the following of the lignin explicar. The pretreatment of the steam explosion of the rice husk improves the potential of rice husk hydrolysis for the formation of reducing sugars that can be exploited in the production of G-2 ethanol, due to the removal of lignin and the exposure of cellulose and hemicellulose.

Key words: steam explosion, rice husk, lignin klason, FTIR, SEM.

INTRODUCCIÓN

La cascarilla de arroz es un residuo lignocelulósico que se obtiene de la producción de arroz a partir de la planta *Oryza sativa*. En el Perú, según el Instituto de Innovación Agraria (INIA), es el primer producto en área sembrada y cosechada 0,38 millones de hectáreas durante el 2014¹. De acuerdo a la FAO, en el 2014 se sembró 162,7 millones de hectáreas produciendo aproximadamente 741 millones de toneladas de arroz que contiene entre 20 - 21 % de cascarilla², generando aproximadamente 150 millones de toneladas de este residuo que tiene un buen potencial para el desarrollo en la producción de etanol 2G.

Los residuos lignocelulósicos de cascarilla de arroz compuestos de celulosa, hemicelulosa y lignina, pueden ser reaprovechados para la hidrólisis de celulosa como fuente principal de azúcares. Se requiere remover las barreras naturales que impiden el ataque microbiano, así como la minimización de la degradación de los azúcares a compuestos inhibitorios^{3,4,5}.

La lignina se encuentra unida a la celulosa y hemicelulosa, su diversidad estructural compuesta principalmente por tres tipos de fenilpropano (p-hidroxifenil, guaiacil, y siringil) unidos entre ellos por enlaces éter y carbono-carbono; así como su heterogenicidad química dificultan su biodigestibilidad^{6,7} e impiden el ataque microbiano de la celulosa y hemicelulosa.

El pretratamiento por explosión con vapor es un método que involucra parámetros críticos del proceso como el uso de altas temperaturas (o presiones) en un corto tiempo de tratamiento seguido de descompresión rápida que modifica la estructura de la pared celular de la cascarilla de arroz, dejando un material de color marrón, indicativo de la hidrólisis de hemicelulosa fácilmente soluble en agua; una fracción de un material insoluble en agua compuesto por celulosa, residuos de hemicelulosa y lignina^{8,9}.

En el pretratamiento por explosión con vapor de los residuos lignocelulosicos el pH del material residual y del lixiviado puede caer a valores ácidos, esto es atribuido a la formación de ácidos orgánicos, como el ácido acético formado a partir de los grupos acetilo de la

hemicelulosa¹⁰. Esta acidez produce la autohidrólisis de la hemicelulosa⁹. Dependiendo de la severidad del tratamiento (Ro) se pueden producir dos tipos de reacciones: la depolimerización por hidrólisis ácida y la condensación - repolimerización de la lignina^{8,9,10,11}.

$$Ro = \log \left(txe^{\frac{T-100}{14,75}} \right)$$

Donde Ro es el factor de severidad, t es el tiempo en minutos y T es la temperatura en °C. La transformación de la estructura química de la lignina puede ser evaluada por la aparición, disminución o desaparición de grupos funcionales y enlaces característicos como los grupo hidroxilo -OH^{12,13}, carbonilo C=O que puede corresponder a los ésteres alifáticos encontrados en la lignina y la hemicelulosa¹⁴, así como los enlaces C-O unidos a polisacáridos o anillos aromáticos en residuos de lignina, entre otros¹⁵.

El objetivo del presente trabajo fue evaluar la influencia del pretratamiento con explosión de vapor a temperatura o presiones bajas sobre el contenido de lignina en la estructura de la cascarilla de arroz, como paso previo para la hidrólisis enzimática.

PARTE EXPERIMENTAL

Toma de muestra y acondicionamiento

Los residuos de cascarilla de arroz semilla de la planta *Oryza sativa*, fueron recolectados de la ciudad de Chiclayo producidos por la Asociación Peruana de Molineros de Arroz (APEMA) y Molino Sudamérica, en mayo del 2017. Estos fueron secados a temperatura ambiente manteniendo una humedad entre 8 a 12 %. Las dimensiones de las muestras fueron 9,2 – 10,7 mm de largo, 2,1 – 3,8 mm de ancho por 0,8 a 1,7 mm de espesor, resultados similares a los obtenidos por otros estudios^{16,17}, debido a esto los residuos no fueron triturados por tener un tamaño cercano a 7 mm adecuado para el pretratamiento por explosión con vapor.

Pretratamiento de explosión con vapor:

La explosión de vapor fue realizada utilizando un equipo que está compuesto de un tanque de acero inoxidable de 15 L acoplado a un generador eléctrico de vapor diseñado para el presente proyecto. Se colocó 300 g de residuos de cascarilla de arroz con una humedad promedio de 8,78 %, el tanque fue rellenado con vapor saturado a presiones de 0,4; 0,6; 0,8 y 1,0 MPa manteniendo una temperatura entre 130 - 180 °C, los tiempos de reacción utilizados fueron 6, 8, 10 y 12 min, el tiempo de descompresión estuvo entre 5 a 7 s. Luego de los tratamientos se midió el valor del pH del líquido generado por la explosión de vapor. El diseño utilizado en los pretratamientos fue bifactorial completo, donde la unidad experimental fue la cascarilla de arroz, los factores fueron la presión (MPa) y el tiempo de residencia (minutos), y la variable respuesta fue el contenido de lignina de la cascarilla de arroz (porcentaje).

Caracterización química

Determinación de la lignina insoluble en ácido (LIA)

El contenido de lignina en las muestras fue determinado conforme a lo establecido por el reporte técnico de la National Renewable Energy Laboratory OF United States NREL/TP-510-42618. El principio de este método se basa en someter a la biomasa al ataque de un ácido fuerte que hidroliza y disuelve todos los carbohidratos, quedando solo la lignina en la fase sólida. Bajo este principio, la lignina puede ser cuantificada y clasificada de dos maneras, lignina insoluble en ácido (LIA) y lignina soluble en ácido (LSA). La primera es aquella parte sólida que queda luego del ataque con el ácido y se cuantifica por gravimetría, mientras que la segunda es aquella que llegó a ser solubilizada y pasó a formar parte del lixiviado y puede ser cuantificada mediante cromatografía. Para efectos de la presente investigación, se considerará solo la LIA conocida como lignina Klason.

Microscopia de barrido electrónico (SEM)

Las muestras fueron observadas por la parte interna y externa de su superficie utilizando microscopia electrónica de barrido (SEM), dos muestras tratadas por explosión con vapor CT-1 (4 Bar, 12 min) y CT-2 (10 Bar, 12 min) así como una muestra no tratada ST. Las imágenes fueron obtenidas utilizando un microscopio electrónico modelo Q250 Analytical. Para el análisis las muestras fueron secadas y cubiertas con una película de oro, se utilizó una aceleración de voltaje de 20 kV. Las imágenes fueron obtenidas a 75 y 370 magnificaciones.

Espectroscopia infrarroja con transformada de Fourier

Para examinar los cambios en la estructura química de las muestras sin y con pretratamiento ST, CT-1 y CT-2 fueron analizadas utilizando un Espectrofotómetro Infrarrojo con Transformada de Fourier (FTIR) modelo Nicolet iS10, en el espectro entre 4000 a 600 cm^{-1} .

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización química

El contenido de lignina en las muestras de cascarilla de arroz encontrada en el presente estudio fue de 18,02 %, este valor se encuentra en el rango (18,2 - 24,6 %) ¹⁸, es superior a 10,9 % ¹⁹ e inferior a 20,4 - 33,7 % ²⁰, las diferentes especies utilizadas en los cultivos de arroz son responsables de estas variaciones. La humedad y el contenido de cenizas determinada fueron 8,78 y 18,75 %, respectivamente se encuentran en el rango de 4,55 - 10,57 % y 9,29 - 30,18 %, determinado por otros estudios ².

Tabla 1. Composición química de la cascarilla de arroz.

Componente	Contenido %
Lignina	18,02 ± 0,87
Humedad	8,78 ± 0,41
Cenizas	18,45 ± 0,38
Extractivos	1,98 ± 0,01

Nota: Resultados ± Desviación Estándar para dos muestras por triplicado

El contenido de extractivos en la muestra de cascarilla de arroz fue 1,98 %, está formado de sustancias de bajo peso molecular, carbohidratos solubles, flavonoides, terpenos, lignanos entre otras sustancias⁸.

Pretratamiento por explosión con vapor

Efecto sobre el pH

El pH del lixiviado de cascarilla de arroz después de la explosión con vapor disminuye hasta valores entre 4,2 - 4,4 con el incremento del factor de severidad. Esto se debe a la rápida formación de ácidos orgánicos de cadena corta como el ácido acético generado a partir de los grupos acetilo de la hemicelulosa^{21,10}. El incremento del tiempo de exposición al vapor disminuye ligeramente el valor del pH independientemente del valor de la temperatura, debido a la mayor oxidación de la materia orgánica termalmente descompuesta⁸. Los valores bajos de pH promueven la autohidrólisis de la hemicelulosa y deshidratación de los azúcares liberados que pueden producir hidroximetilfurfural^{8,9}.

Tabla 2. Valor de pH, material extractable y contenido de lignina en el material sólido remanente después del pretratamiento de la cascarilla de arroz por explosión con vapor, bajo diferentes condiciones de temperatura y tiempos de residencia.

Presión MPa	Temperatura °C	Tiempo min	Factor de Severidad	pH	% Extractables	% Lignina
0,4	129,1	6	1,6	6,8 ± 0,8	2,0 ± 0,7	15,9 ± 0,1
0,4	129,1	8	1,8	6,9 ± 0,9	2,0 ± 0,7	15,6 ± 1,1
0,4	129,1	10	1,9	6,8 ± 0,7	2,6 ± 0,2	16,9 ± 0,7
0,4	129,1	12	1,9	6,2 ± 0,3	3,4 ± 0,8	17,4 ± 0,2
0,6	147,4	6	2,2	7,0 ± 0,4	2,4 ± 0,0	14,9 ± 1,5
0,6	147,4	8	2,3	6,2 ± 0,0	2,9 ± 0,2	14,3 ± 0,3
0,6	147,4	10	2,4	6,7 ± 0,6	2,2 ± 0,0	17,1 ± 0,5
0,6	147,4	12	2,5	5,9 ± 0,1	3,6 ± 0,0	15,0 ± 1,0
0,8	161,9	6	2,6	6,4 ± 0,5	3,5 ± 0,3	14,6 ± 0,4
0,8	161,9	8	2,7	5,4 ± 0,9	3,0 ± 0,0	13,7 ± 0,6
0,8	161,9	10	2,8	5,0 ± 0,4	3,0 ± 1,1	14,9 ± 0,6
0,8	161,9	12	2,9	3,8 ± 0,9	3,5 ± 0,7	13,5 ± 0,7
1,0	174,1	6	3,0	---	6,2 ± 0,3	14,2 ± 0,4
1,0	174,1	8	3,1	4,4 ± 0,1	6,2 ± 0,5	13,4 ± 0,8
1,0	174,1	10	3,2	4,4 ± 0,2	4,5 ± 0,0	12,8 ± 0,6
1,0	174,1	12	3,3	4,2 ± 0,0	6,1 ± 0,5	12,7 ± 1,2

Nota: Resultados ± Desviación Estándar para dos muestras por triplicado

Efecto sobre el contenido de extraíbles y lignina

En el rango de presión utilizada en la presente investigación se observa que al incrementar el tiempo a presiones entre 0,4 y 0,6 MPa el porcentaje de lignina inicialmente (8 primeros minutos) se reduce por la depolimerización de la lignina generada por la autohidrólisis (escisión del enlace β -O-4 éter en medio ácido), seguida por un incremento de este (minuto 12) debido a reacciones de condensación y repolimerización entre los productos de descomposición de la hemicelulosa y la lignina^{11,10}, también se observa un incremento de los extraíbles debido al incremento de los productos de descomposición de la hemicelulosa y lignina. En el rango de presiones entre 0,8 y 1,0 MPa el porcentaje de lignina disminuye con el tiempo debido a la depolimerización de la lignina, se incrementa el contenido de extraíbles por la formación de productos de descomposición de la hemicelulosa y depolimerización de la lignina. En el rango de temperaturas y presiones trabajados se observa una reducción del porcentaje de lignina con el incremento del factor de severidad debido a que se favorecen la reacción de depolimeración de la lignina en lugar de la de condensación.

Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)

Los espectros FTIR de muestras tratadas CT-1 y CT-2 de cascarilla de arroz bajo diferentes tratamientos, presentan disminución de la absorción dominante con respecto a la muestra no tratada ST en los picos: a 3340 cm^{-1} atribuidas a vibraciones tipo stretch de los grupos -OH asociados a la estructura de la celulosa y lignina; a 2920 cm^{-1} atribuida a C-H asociado a la estructura de la celulosa y hemicelulosa^{12,13}; a 1739 cm^{-1} atribuidos a la vibración stretch del grupo carbonilo (C=O), asociado a los ésteres alifáticos de lignina y la hemicelulosa¹⁴; a 1320 y 1360 cm^{-1} atribuidos a los grupos C-H y C-O de anillos aromáticos de polisacáridos o residuos de lignina; a 1060 cm^{-1} atribuido a C-O-C del anillo piranósico vibración tipo esqueleto, relacionado a la lignina, celulosa y hemicelulosa¹⁵. El tratamiento CT-2 presentó la mayor reducción en la transmitancia de los picos esto se asocia a un menor contenido de lignina.

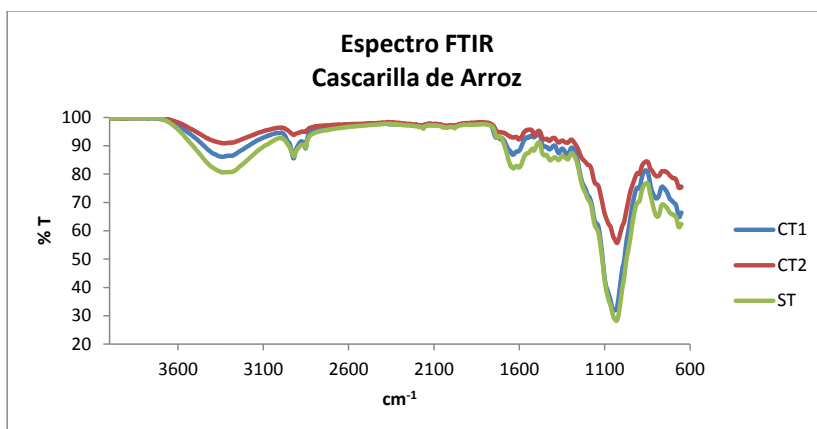


Figura 1. Espectro FTIR de la cascarilla de arroz, sin y con tratamiento por explosión de vapor.

Microscopia de barrido electrónico

La morfología típica de la cascarilla de arroz determinada por la microscopia de barrido electrónica (SEM) mostró que la superficie externa tiene forma globular con células epidérmicas dispuestas en surcos lineales, con crestas salpicadas con protuberancias globulares y con menor frecuencia con pelos (tricomas) similar a lo reportado por otros estudios²². Se observa que la muestra sin tratamiento ST presenta una superficie lisa y regular tanto en las protuberancias globulares como en los pelos. La muestra con tratamiento suave CT-1 de forma similar a la muestra ST presenta una superficie lisa con algunas fracturas en el pelo. Por otro lado la muestra con tratamiento con mayor factor de severidad presenta mayor remoción de la superficie lisa (desaparición de la lignina) tanto en la protuberancia globular como el pelo, también se observa mayor contenido de restos de la superficie como partículas sobre la superficie, ver figura 2. Esto es un claro indicativo de la remoción de la lignina de la pared celular de la cascarilla de arroz, dejando expuesta las cadenas de celulosa y hemicelulosa mejorando su potencial para posterior hidrólisis ácida o enzimática de la cascarilla de arroz.

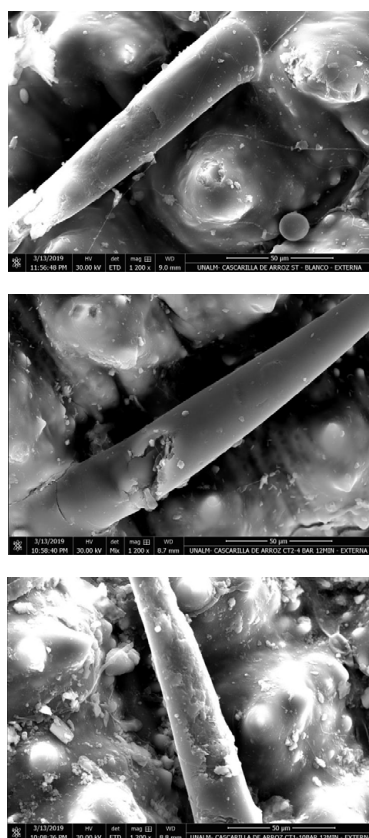


Figura 2. Cascarilla de arroz cara externa sin tratamiento (superior), con tratamiento por explosión con vapor 0,4 MPa 12 minutos (medio), con vapor 1,0 MPa 12 minutos (inferior).

CONCLUSIONES

El pretratamiento por explosión con vapor empleando un factor de severidad de 3,3 reduce el contenido de lignina evaluada como lignina klason de la cascarilla de arroz por un proceso de depolimeración verificado por la reducción de la transmitancia de los principales grupos funcionales asociados a la lignina y cambios estructurales de la superficie evaluados en el SEM. Esta modificación de la superficie mejora el potencial de hidrólisis de la cascarilla de arroz pretratada para la formación de azúcares reductores que pueden ser aprovechadas en la producción de etanol G-2.

AGRADECIMIENTO

Se agradece al Programa Nacional de Innovación Agraria – PNIA, Fondo Concursable Investigación Estratégica Priorizada del concurso N° 2-IE-PNIA-2016, patrocinadores del Proyecto Producción de etanol de 2da generación G-2 a partir de residuos agroindustriales de caña, arroz y maíz, por su apoyo en el desarrollo de la presente investigación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Sistema Integrado de Estadística Agraria, SIEA. Anuario Estadístico de la producción Agrícola y Ganadera 2015. Lima, Perú: Ministerio de Agricultura y Riego; 2016.
2. Zou Y, Yang T. Chapter 9 - Rice Husk, Rice Husk Ash and Their Applications. Rice Bran and Rice Bran Oil, Chemistry, Processing and Utilization. 1st edition. Urbana, Illinois (USA): AOCS Press/Academic Press; 2019, pag: 207-246.
3. Kumar P, Barrett DM, Delwiche MJ, Stroeve P. Methods for pretreatment of lignocellulosic biomass for efficient hydrolysis and biofuel production. *Ind Eng Chem Res.* 2009; 48: 3713–3729.
4. Nitsos C, Matsakas L, Triantafyllidis K, Rova U, Christakopoulos P. Investigation of different pretreatment methods of Mediterranean-type ecosystem agricultural residues: characterisation of pretreatment products, high-solids enzymatic hydrolysis and bioethanol production. *Biofuels.* 2018; 9(5): 545-558.
5. Matsakas L, Raghavendran V, Yakimenko O, Persson G, Olsson E, Rova U, et al. Lignin-first biomass fractionation using a hybrid organosolv - steam explosion pretreatment technology improves the saccharification and fermentability of spruce biomass. *Bioresour Technol.* 2019; 273: 521-528.
6. Fu C, Mielenz J, Xiao X, Ge Y, Hamilton CY, Rodriguez JM, et al. Genetic manipulation of lignin reduces recalcitrance and improves ethanol production from switchgrass. *Proc Natl Acad Sci USA.* 2011; 108: 3803-3808.
7. Wang Y, Gong X, Hu X, Zhou N. Lignin monomer in steam explosion assist chemical treated cotton stalk affects sugar release. *Bioresour Technol.* 2019; 276: 343-348.
8. Pereira L. The chemistry involved in the steam treatment of lignocellulosic materials. *Quim Nova.* 2003; 6: 863-871.

9. Bonfiglio F, Cagno M, Rey F, Torres M, Böthig S, Mendez P, et al. Pretreatment of switchgrass by steam explosion in a semi-continuous pre-pilot reactor. *Biomass Bioeng.* 2019;12: 41 – 47.
10. Moniruzzaman M. Effect of Steam Explosion on the Physicochemical Properties and Enzymatic Saccharification of Rice Straw. *Appl Biochem Biotechnol.* 1996; 59(3): 283-297.
11. Chua MGS, Wayman M. Characterization of Autohydrolysis Aspen (*P. tremuloides*) Lignins. Part 1. Composition and Molecular Weight Distribution of Extracted Autohydrolysis Lignin. *Can J Chem.* 1979; 57: 1141-1149.
12. Tomczak F, Satyanarayana KG, Sydenstricker THD. Studies on lignocellulosic fibers of Brazil: part III e morphology and properties of Brazilian curaua fibers. *Compos A Appl Sci Manuf.* 2007; 38: 2227 – 2236.
13. Brígida AIS, Calado VMA, Gonçalves LRB, Coelho MAZ. Effect of chemical treatments on properties of green coconut fiber. *Carbohydr Polym.* 2010; 79: 832 - 838.
14. Romanzini D, Ornaghi HL, Amico SC, Zattera AJ. Preparation and characterization of ramie-glass fiber reinforced polymer matrix hybrid composites. *Mater Res.* 2012; 15: 415 - 420.
15. Boonterm M, Sunyadeth S, Dedpakdee S, Athichalinthorn P, Patcharaphun S, Mungkung R, et al. Characterization and comparison of cellulose fiber extraction from rice straw by chemical treatment and thermal steam explosion. *J Clean Prod.* 2016; 134 (Part B): 592 - 599.
16. Fang M, Yang L, Chen G, Shi Z, Luo Z, Cen K. Experimental study on rice husk combustion in a circulating fluidized bed. *Fuel Process. Technol.* 2004; 85: 1273–1282
17. Rodríguez M. Determinación de la Composición Química y Propiedades Físicas y Químicas del Pulido de Arroz (*Oryza sativa* L.). [Tesis Ciencia de los Alimentos]. Valdivia: Universidad Austral de Chile; 2007.
18. Valverde A, Sarria B, Monteagudo J. Análisis comparativo de las características fisicoquímicas de la Cascarilla de arroz. *Scientia et Technica.* 37(1): 255-260. doi: 10.22517/23447214.4055
19. De Oliveira J, Pinheiro G, Oliveira K, Mello S, Silveira G, Guerra A, et al. da Rosa E. Cellulose fibers extracted from rice and oat husk and their application in hidrogel. *Food Chem.* 2017; 221: 153 – 160.
20. Quispe I, Navia R, Kahhat R. Energy potential from rice husk through direct combustion and fast pyrolysis: a review. *Waste Manag.* 2017; 59: 200–210.
21. Dekker R, Wallis A. Enzymic Saccharification of Sugarcane Bagasse Pretreated by Autohydrolysis - Steam Explosion. *Biotechnol Bioeng.* 1983; 25(12): 3027-3048.
22. Genieva SD, Turmanova SC, Dimitrova AS, Vlaev LT. Characterization of rice husks and the productions of its thermal degradation in air or nitrogen atmosphere. *J. Therm. Anal. Calorim.* 2008; 93: 387–396.

REMOCIÓN DE MATERIA ORGÁNICA EN REACTOR ANAEROBIO DE MANTO DE LODOS DE FLUJO ASCENDENTE EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES DEL CAMAL DE HUANCVELICA

Jerson Castro Olarte^a, Yon Cecilio Cabrera^b, Teresa Jesús Gonzales Huamán^c,
Liliana Sumarriva Bustinza^d

RESUMEN

En la presente investigación se evaluó un nuevo sistema de tratamiento primario para aguas residuales industriales, se utiliza el “Reactor anaerobio de manto de lodos de flujo ascendente” (UASB), aplicado a la remoción de materia orgánica. El sistema a escala piloto fue diseñado para las aguas residuales del Camal Municipal de Huancavelica, el cual se bombeó después del pre tratamiento (cámara de reja gruesa y desarenador) al tanque de almacenamiento de 350 litros para realizar el tratamiento del agua residual en el reactor UASB a escala laboratorio. Se evaluó la eficiencia de remoción de materia orgánica en un reactor UASB, para un tiempo de retención hidráulico (TRH) de 14 horas con un caudal de circulación de 35mL/min se obtuvo una eficiencia mínima de remoción de Demanda Química de Oxígeno (DQO) de 33,66 % y una máxima eficiencia de 76,90 % todo ello en un rango de temperatura de agua residual de 10°C y 19°C. También para este TRH de 14 horas la cantidad de sólidos suspendidos totales disminuyó de 524,34mg/L a 365,04mg/L, obteniéndose una eficiencia de remoción de sólidos suspendidos totales de 30,28%. El tratamiento primario reactor UASB es una alternativa para remover la materia orgánica y sólidos suspendidos totales, aplicado para aguas residuales del Camal Municipal de Huancavelica y en localidades con condiciones de clima y altitud similares; el diseño se optimizó para un TRH de 14 horas para el reactor UASB el cual elevó la eficiencia de remoción de materia orgánica

Palabras clave: reactor UASB, tratamiento anaerobio, tiempo de retención hidráulico, carga orgánica.

^a Facultad de Ciencias de Ingeniería, Instituto de Investigación, Universidad Nacional de Huancavelica. Avenida Agricultura 319-321, Paturpampa, Huancavelica, Perú. Email: *jersoncastro2907@gmail.com

^b Ingeniero Consultor

^c Universidad Nacional de Huancavelica, Perú.

^d Departamento de Química, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Educación “Enrique Guzmán y Valle”.

REMOVAL OF ORGANIC MATTER IN AN UPFLOW ANAEROBIC SLUDGE BLANKET REACTOR IN THE TREATMENT OF WASTEWATER IN A SLAUGHTERHOUSE IN HUANCAVELICA

ABSTRACT

This research evaluated a new system of primary treatment for industrial waste water, an "Anaerobic Upflow sludge blanket Reactor" (UASB) was used for the removal of organic matter. The pilot scale system was designed for the wastewater of the Municipal Slaughterhouse in Huancavelica, which was pumped after the pre-treatment (coarse screen and grit removal) to the storage tank of 350 liters for later to perform the treatment of wastewater in UASB reactor scale laboratory. The removal efficiency of organic matter in an UASB reactor was evaluated, for a hydraulic retention time (HRT) of 14 hours with a flow rate of 35mL/min, the minimum efficiency of Chemical Oxygen Demand (COD) removal was 33.66% and maximum efficiency was 76.90% in a temperature range of wastewater from 10 °C to 19 °C. Also for this HRT of 14 hours the amount of total suspended solids decreased from 524.34mg/L to 365.04mg/L, obtaining a removal efficiency of total suspended solids of 30.28%. The UASB reactor primary treatment is an alternative to remove the organic matter and total suspended solids applied for wastewater from the Municipal Slaughterhouse of Huancavelica and cities situated in places with similar climate and altitude; the design was optimized for a HRT of 14 hours for the UASB reactor, which increased the efficiency of organic matter removal.

Key words: UASB reactor, anaerobic treatment, hydraulic retention time, organic load.

INTRODUCCIÓN

La Universidad Nacional de Huancavelica, como universidad pública, recibe recursos financieros provenientes del Fondo de Desarrollo Socioeconómico del Proyecto Camisea "FOCAM", destinados exclusivamente a la investigación científica, tecnológica e innovación.

El Camal Municipal de Huancavelica, ubicado en el distrito de Huancavelica; centro poblado: *Paltarumi – Chuñuranra*, a una altitud de 3 715 msnm, cuenta con una planta de tratamiento de agua residual, la cual tiene las siguientes operaciones y procesos unitarios como: cribado, desarenador, trampa de grasa, tanque séptico, sedimentadores, lecho de secado y como último el humedal artificial. El sistema de tratamiento presenta deficiencia en el diseño de las operaciones y procesos unitarios como: dimensionamiento incorrecto del cribado, desarenador, tanque séptico, sedimentador, lecho de secado y humedal artificial.

En este sistema de tratamiento, desde que empezó a operar en el año 2011, no se realizó el mantenimiento respectivo, y el monitoreo del agua tratada. Como resultado del diagnóstico realizado se pudo observar que el efluente del tratamiento tiene un color gris oscuro; el color

del effluente es un indicador que el sistema de tratamiento es ineficiente.

Como consecuencia del vertido sin tratamiento al ambiente del agua residual del camal municipal de Huancavelica, se contaminan los suelos y los cuerpos de agua, además de incrementar el riesgo de la salud por la proliferación de malos olores producto de la degradación natural de la materia orgánica.

Por ello, la investigación científica realizada busca alternativas técnicas de solución de bajo costo a la problemática del tratamiento, disposición y la reutilización inadecuada de las aguas residuales del Camal Municipal de Huancavelica.

Dado al alto contenido de materia orgánica biodegradable presente en el agua residual de camales municipales, se utilizó la tecnología del reactor UASB ya que los procesos anaerobios suelen ser técnicas viables y económicamente más factibles para su tratamiento.

Los métodos de tratamiento del agua residual en mataderos se pueden dividir en dos grupos: anaerobios y aerobios. Los tratamientos anaerobios permiten un alto grado de reducción de la DBO, producen una menor cantidad de lodos y permiten la obtención de biogás que puede ser reutilizado en el propio matadero; los tratamientos aerobios ayudan a la transformación del nitrógeno orgánico y amoniacal en nitrato y no generan fuertes olores como los anaerobios¹.

La ventaja de los reactores UASB es que los costos de operación y mantenimiento son relativamente bajos. El reactor UASB es empleado para tratar aguas residuales industriales y domésticas. La investigación tuvo como objetivo evaluar la eficiencia de remoción de materia orgánica en un Reactor Anaerobio de Manto de Lodos de Flujo Ascendente (UASB) para el tratamiento de aguas residuales del Camal Municipal de Huancavelica.

PARTE EXPERIMENTAL

Muestra

El tipo de muestra es no probabilística, por ello se trabajó con caudales de 50L/día y 58L/día. Estos caudales se determinaron porque el reactor UASB tiene un volumen útil de 29 litros y los tiempos de retención hidráulico a investigar fueron de 14 y 12 horas.

Equipo experimental

Para realizar el estudio se utilizó un reactor UASB construido de polietileno, con capacidad de 29 litros. El reactor UASB se instaló en el Camal Municipal de Huancavelica, se inoculó con lodo anaerobio (en un 30 % del volumen útil) proveniente del CITRAR-UNI. En el fondo del reactor se colocó un aproximado de 20 canicas, para proveer una distribución uniforme del flujo.

Respecto a otro tipo de la distribución uniforme. En el fondo del reactor se colocó grava para proveer una distribución uniforme del flujo, la que ocupó aproximadamente un 4 % del volumen útil del reactor².

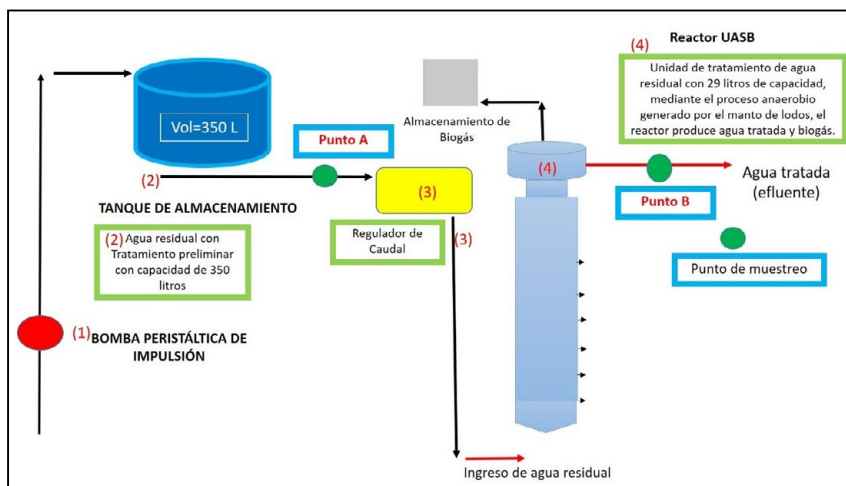


Figura 1. Esquema general de la investigación.

Las aguas residuales industriales del Camal Municipal de Huancavelica, luego de un pretratamiento (cámara de rejas gruesas y desarenador), se llena al tanque de almacenamiento de 350 litros a través de una bomba de impulsión peristáltica. Posterior a ello se instaló un regulador de caudal para mantener una circulación de agua residual constante al reactor UASB como se observa en la figura 1.

Para el arranque del reactor UASB se utilizó el lodo proveniente del reactor anaerobio de manto de lodos y flujo ascendente de CITRAR-UNI este lodo se tomó a una altura de 1,50 metros del UASB debido a que hay investigaciones asegurando que a dicha altura la eficiencia del lodo es la mejor³. El 2 de mayo se inoculó, se añadió agua residual hasta 20 cm luego se inoculó 7,5 litros de lodo al reactor UASB, luego de esto el reactor UASB se cubrió con plástico negro para evitar el crecimiento de algas al igual que los circuitos de las mangueras. Se inicia el arranque con TRH de 14 horas con un caudal de 35 mL/min.

Técnicas e instrumentos

Técnica	Instrumentos
Observación	Digestor DBR-200 y colorímetro portátil DR-900: para determinar la DQO. pHmetro digital HI 8424: para determinar el pH y la temperatura del agua residual. Termómetro ambiental con base de madera: para determinar la temperatura del ambiente. Cinta métrica: para determinar la altura de lodo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se presenta los resultados de las mediciones de los parámetros DQO, sólidos suspendidos totales, temperatura ambiental, temperatura del agua residual, aceites y grasas y pH.

Los tiempos de retención hidráulica reales estudiados dadas las condiciones de campo fueron 14 horas (2 mayo al 20 junio), 12 horas (21 de junio al 13 julio). Como la eficiencia de remoción de materia orgánica disminuía en un TRH de 12 horas es por ello que se retomó el tiempo de retención hidráulico de 14 horas del 27 de julio al 7 de setiembre para encontrar mejores eficiencias de remoción de DQO.

La operación del reactor UASB inició 2 de mayo del 2017, inoculando 7,5 litros de lodo. El tiempo para la aclimatación del lodo inoculado al reactor UASB fue de 30 días.

Comportamiento de la temperatura

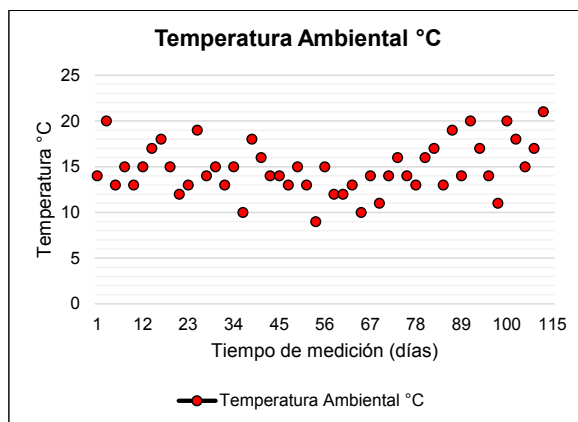


Figura 2. Temperatura ambiental (°C) en función al tiempo acumulado de la investigación (días).

Los resultados de medición de la investigación, muestra la temperatura mínima 9°C y máxima 21°C, siendo la temperatura ambiental promedio 14,78°C en todo el periodo de investigación, el cual fue de 115 días, como se observa en la figura 2.

Los resultados de la medición de la investigación, muestra la temperatura del agua residual una máxima de 19,9°C, mínima de 10,3°C y promedio de 14,7°C en todo el periodo de investigación el cual fue de 115 días, como se observa en la figura 3.

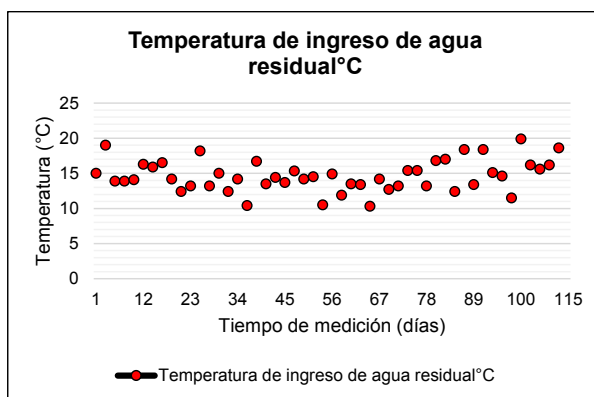


Figura 3. Temperatura de ingreso del agua residual (°C) en función al tiempo acumulado de la investigación (días).

Los resultados de la medición muestran la temperatura del agua residual una máxima de 19,5°C, mínima de 10,4°C y promedio de 14,8°C durante los 115 días de la investigación, como se observa en la figura 4.

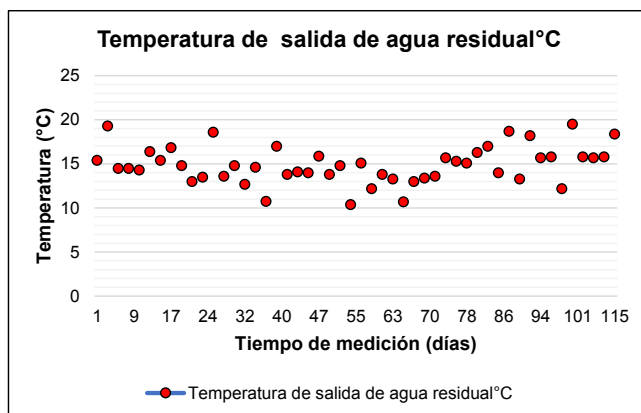


Figura 4. Temperatura de salida del agua residual (°C) en función al tiempo acumulado de la investigación (días).

Si se realiza una comparación de las temperaturas dentro del reactor y la temperatura del ambiente para el día en que se realizó el perfil, se puede observar que la temperatura del reactor se mantuvo en un rango de 20 a 30 °C, mientras que la temperatura del ambiente tuvo rangos de temperatura entre 8 y 32,8 °C, lo que demuestra un rango favorable⁴.

Comportamiento del potencial de hidrógeno (pH)

Para el punto A (punto de ingreso al reactor UASB) se obtuvo el mínimo valor de pH 6,57, máximo 8,01 y en promedio 7,38; para el punto B (punto de salida del reactor UASB) se obtuvo el mínimo valor de pH 6,99, máximo 8,32 y en promedio 7,61 durante los 115 días, como se observa en la figura 5.

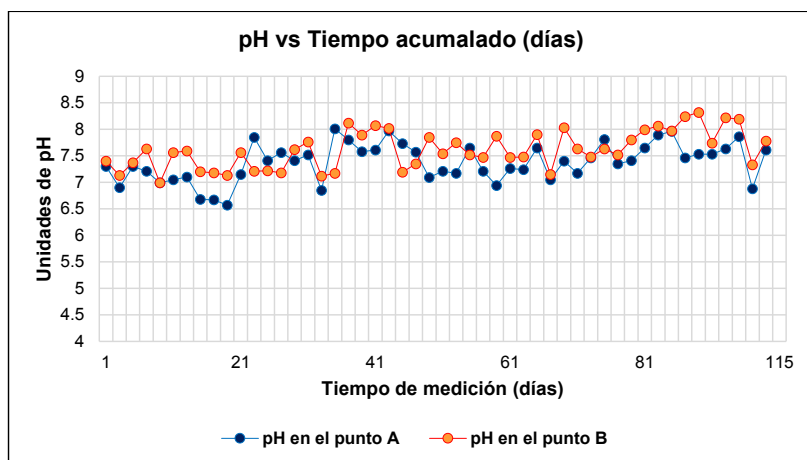


Figura 5. Potencial de hidrógeno promedio (pH) en función al tiempo acumulado de la investigación (días).

El agua residual que ingresa al reactor UASB (Punto A) tiene el pH entre 6,57 y 8,01 favorable para el desarrollo hidrolítico acidogénico y metanogénico. El efluente del reactor UASB (Punto B) tiene el pH entre 6,99 y 8,32; por lo cual estos resultados de pH se encuentran óptimos para la digestión anaerobia.

En cuanto al pH, durante el periodo observado, se mantuvo cercano a la neutralidad con un valor de $7,3 \pm 0,3$. Este valor se encuentra dentro del intervalo recomendado para el mantenimiento de las bacterias metanogénicas. El agua residual de rastro, por la sangre desechada en el proceso, contiene cantidades significativas de proteínas y, al llevarse a cabo el metabolismo de éstas, se produce la liberación de amonio, produciendo bicarbonato de amonio y generando alcalinidad, lo que ayudó a mantener un valor de pH cercano a 7 en el caso de los dos reactores anaerobios⁵.

Concentración de aceites y grasas

Se realizaron los análisis en el laboratorio RCJ (LABS UNIVERSAL) de la ciudad de Huancayo el 16/08/2017. Se determinó la concentración de sólidos suspendidos totales para un TRH de 14 horas con un caudal de circulación de 35 mL/min; tenemos en el punto A una mínima de 522,42 mg/L, máxima de 901,01 mg/L y en promedio 709,49 mg/L. Para el punto B una mínima de 365,04 mg/L, máxima de 895,05 mg/L y en promedio 623,76 mg/L.

En reactores UASB, la formación de nata puede ocurrir en dos lugares distintos: i) al interior del separador trifásico, en la interface de liberación de los gases formados durante la digestión anaerobia; y ii) en la superficie del decantador. Independiente del lugar donde la nata llegue a formarse o acumularse, la cantidad y sus características van a depender, esencialmente, de las características del agua residual, en términos de la presencia de sólidos en suspensión y de la cantidad de aceites y grasas⁶.

Concentración de sólidos suspendidos totales

Se determinó la concentración de aceites y grasas para un TRH de 14 horas con un caudal de circulación de 35 mL/min; tenemos en el punto A una mínima de 28,33 mg/L, máxima de 38,02 mg/L y en promedio 33,32 mg/L. Para el punto B una mínima de 27,09 mg/L, máxima de 28,66 mg/L y en promedio 27,64 mg/L.

El contenido de sólidos en un agua residual afecta directamente la calidad de lodo que se produce en el sistema de tratamiento o disposición. La eficiencia de remoción de SST en los dos reactores, tuvo un comportamiento variable, puesto que presentó una fluctuación bastante amplia con un máximo valor que supera el 40 % y un mínimo de 2 % en el reactor UASB para temperatura promedio de 17°C⁷.

Eficiencias de remoción de demanda química de oxígeno

Las eficiencias de los parámetros son calculadas en base a los resultados, en A (ingreso de agua residual al reactor UASB) y B (salida de agua residual del reactor UASB).

Tabla 1. Eficiencias de remoción de DQO evaluados para un tiempo de retención hidráulico de 14 horas en el reactor UASB.

EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE DQO EN EL REACTOR UASB				
días	Caudal (L/día) Ingreso a reactor UASB	Punto A (Entrada al reactor UASB) mg/L	Punto B (Salida del reactor UASB) mg/L	Eficiencia de remoción DQO (%)
21/05/17	50	780	527	32,44
29/05/17	50	963	464	51,82
30/05/17	50	715	451	36,92
31/05/17	50	777	454	41,57
01/06/17	50	588	368	37,41
02/06/17	50	1047	586	44,03
07/06/17	50	704	467	33,66
09/06/17	50	247	63	74,49
10/06/17	50	407	94	76,90
13/06/17	50	313	120	61,66
14/06/17	50	573	235	58,99
15/06/17	50	964	343	64,42
20/06/17	50	996	460	53,82
13/08/17	50	949	589	37,93
16/08/17	50	1120	637	43,13
17/08/17	50	1063	615	42,14
18/08/17	50	914	551	39,72
21/08/17	50	1067	678	36,46
22/08/17	50	776	402	48,20
23/08/17	50	812	441	45,69
25/08/17	50	827	449	45,71
28/08/17	50	904	394	56,42
07/09/17	50	1044	416	60,15
PROMEDIO				48,86
MÁXIMO				76,90
MÍNIMO				32,44

La eficiencia de remoción de Demanda Química de Oxígeno (DQO) para un tiempo de retención hidráulico de 14 horas, se obtuvo una mínima de 32,44 %, máxima de 76,90 % y el promedio fue 48,86 %, como se observa en la tabla 1 y en la figura 6.

Tabla 2. Eficiencias de remoción de DQO evaluados para un tiempo de retención hidráulico de 12 horas en el reactor UASB.

EFICIENCIA DE REMOCIÓN DE DQO EN EL REACTOR UASB				
días	Caudal (L/día) Ingreso a reactor UASB	Punto A (Entrada al reactor UASB) mg/L	Punto B (Salida del reactor UASB) mg/L	Eficiencia de remoción DQO (%)
26/06/17	58	952	622	34,66
27/06/17	58	1280	874	31,72
29/06/17	58	904	595	34,18
30/06/17	58	979	618	36,87
04/07/17	58	949	585	38,36
06/07/17	58	1057	643	39,17
07/07/17	58	1083	646	40,35
10/07/17	58	929	537	42,20
11/07/17	58	988	576	41,70
13/08/17	58	849	501	40,99
		PROMEDIO		38,02
		MÁXIMO		42,20
		MÍNIMO		31,72

La eficiencia de remoción de Demanda Química de Oxígeno (DQO) para un tiempo de retención hidráulico de 12 horas, se obtuvo una mínima de 31,72 %, máxima de 42,20% y el promedio fue 38,02 %, como se observa en la tabla 2 y en la figura 7.

Asimismo, de las pruebas realizadas en el estudio, se puede afirmar que para una temperatura del agua residual de 10 a 19 °C en el reactor UASB, al evaluar el TRH de 14 horas, por 92 días, se obtuvo un porcentaje de remoción de DQO máxima de 76,90% y la mínima fue de 32,44 %. Posteriormente, se disminuyó el TRH a 12 horas, por 23 días, el porcentaje de DQO máxima fue de 42,20 % y la mínima fue de 31,72 %.

Según Seghezzeo se utilizaron reactores anaeróbicos para temperaturas 7-18°C con tiempo de retención hidráulico de 4-14 horas. Por ello la investigación empezó con el arranque del reactor UASB, el 2 de mayo del 2017 con un TRH (tiempo de retención hidráulico) de 14 horas hasta el 20 de junio, del 21 de junio al 13 de julio se continuó con tiempo de retención hidráulico de 12 horas. Como la eficiencia de remoción de materia orgánica disminuía en un TRH de 12 horas es por ello que se retomó el tiempo de retención hidráulico de 14 horas del 27 de julio al 7 de setiembre para encontrar mejores eficiencias de remoción de DQO.

Los resultados de la baja eficiencia de remoción de DQO es debido al efecto de las bajas temperaturas del ambiente, como también podría deberse a que el TRH con el que se opera es muy corto como para permitir un tiempo apropiado de contacto entre la materia orgánica y los microorganismos que la consumen. También se debe prolongar el periodo de arranque del reactor UASB, ya que en la presente investigación se tuvo un periodo de arranque de 30 días.

La remoción de materia orgánica expresada como DQO se evaluó para tres TRH: 36, 24 y 12 horas. Al evaluar el TRH de 36 h, por 28 días, se obtuvo un porcentaje de remoción de DQO promedio de 88 %. Posteriormente, se disminuyó el TRH a 24 h, el porcentaje de DQO promedio fue de 87 %. Finalmente, se evaluó por 22 días el reactor para un TRH de 12 h y una CO (carga orgánica) de 17 kg/m³d, obteniéndose un porcentaje de remoción de DQO promedio de 79 %, estos resultados se presentaron a una temperatura de 37°C⁸.

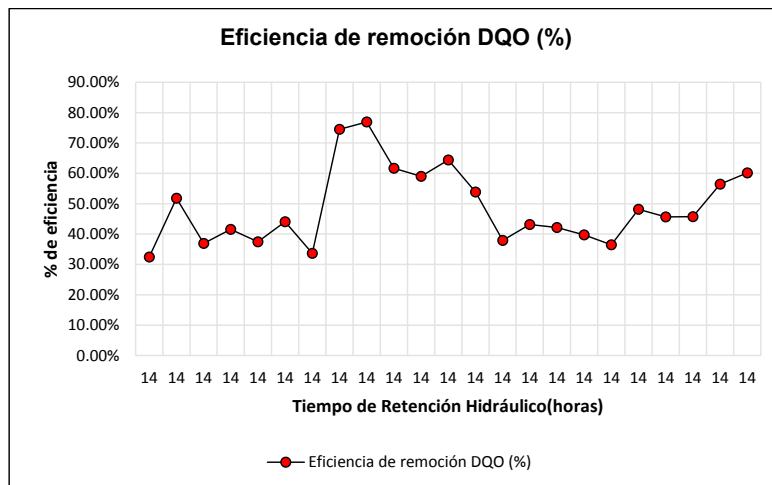


Figura 6. Eficiencia de remoción de DQO en el reactor UASB para un TRH de 14 horas.

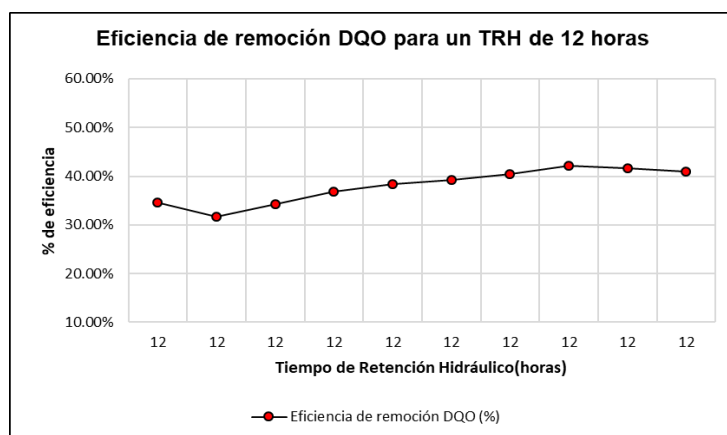


Figura 7. Eficiencia de remoción de DQO en el reactor UASB para un TRH de 12 horas.

De esta forma, se observa el tendiente creciente de la eficiencia del reactor UASB en la medida que se aumenta el tiempo de retención hidráulico.

Los resultados indican que con cuatro TRH de operación (14, 12, 10 y 8 horas) la remoción de DQO total sobrepasa el 49 %, siendo el mejor resultado para un TRH de 14 horas con 60,7 % de remoción promedio de DQO total, la más baja remoción resultó para un TRH de 4 horas con 25,3 % de remoción promedio de DQO total, todo ello fue con un digestor de lodo⁹.

A bajas temperaturas (6-16°C) el reactor debe operarse a una VCO (carga orgánica volumétrica) máxima de 0,6 kgDQO/m³d, ya que en esta condición se logra obtener una buena remoción de materia orgánica total y particulada, mientras que al operar con VCO (carga orgánica volumétrica) mayores disminuye notoriamente la eficiencia del reactor¹⁰.

Altura de lodo

La altura de lodo del UASB está condicionado por el crecimiento de la biomasa y por la velocidad ascensional aplicado ambos originan su crecimiento, el crecimiento por biomasa es lento, en los cuatro meses de operación creció el lodo de 42 cm al inicio del arranque del reactor UASB a 76 cm al finalizar la investigación con una velocidad ascensional de 0,12 m/h y 0,14 m/h, no se purgó del reactor UASB debido a que el crecimiento por biomasa es lento.

La expansión del lodo es producida por la velocidad ascensional variada por cada TRH. Se aprecia que hay una relación directamente proporcional de la altura de lodo a la velocidad ascensional aplicado, la altura de lodo en un 96 % es afectado por la velocidad ascensional, el porcentaje que hace falta para el 100 %, probablemente es por el crecimiento biológico de biomasa en el reactor UASB. Entonces, la velocidad ascensional es un parámetro clave en la expansión de lodo del reactor UASB, se facilita también su expansión por las características floculentas del lodo⁹.

El reactor UASB operando con aguas residuales urbanas no puede operar a Vs (velocidad de sedimentación) de 0,7 m/h ya que se produce el lavado de biomasa y expansión de la cama de lodos disminuyendo la eficiencia global de remoción y la de materia orgánica debida a sólidos suspendidos. A Vs (velocidad de sedimentación) de 0,5 m/h se logra mantener una concentración de biomasa adecuada en el reactor y esta biomasa prevalece en forma granular, aunque presenta bordes más irregulares¹⁰.

CONCLUSIONES

En la investigación se obtuvieron óptimas remociones de materia orgánica, lo cual es medida como DQO, para un tiempo de retención hidráulico de 14 horas se obtuvo una eficiencia de remoción máxima de 76,90 % de DQO y un promedio de 48,86 % de DQO, como se observa en la tabla 1. Para un tiempo de retención hidráulico de 12 horas se obtuvo una eficiencia de remoción máxima de 42,20 % de DQO y un promedio de 38,02 % de DQO, como se observa en la tabla 2. Lo cual se concluye que el reactor anaerobio de manto de lodos de

flujo ascendente (UASB) como tratamiento primario remueve la materia orgánica del agua residual del Camal Municipal de Huancavelica.

Se evaluó la concentración de sólidos suspendidos totales para un TRH de 14 horas con un caudal de circulación de 35 mL/min; tenemos en la entrada al reactor UASB una mínima de 522,42 mg/L y una máxima de 901,01 mg/L. A la salida del reactor mínima de 365,04 mg/L y una máxima de 895,05 mg/L. Se concluye que el reactor UASB influye en la baja producción de lodo debido a la digestión anaerobia.

El agua residual en el reactor UASB tuvo un pH dentro del rango de 6,57 y 8,32. Se concluye que el agua residual que ingresa al reactor UASB tiene el pH favorable para el desarrollo hidrolítico acidogénico y metanogénico. Por lo cual estos resultados de pH se encuentran en los rangos entre 6,50 y 8 óptimos para la digestión anaerobia⁶.

El reactor UASB fue capaz de mantener una temperatura promedio 14,89 °C siempre por encima de la temperatura ambiental que tuvo una temperatura promedio de 14,79 °C. Para una temperatura del agua residual de 10 a 19 °C y manteniendo un tiempo de retención hidráulico de 14 horas en el reactor UASB, se han logrado valores máximos de remoción de 76,90 % en DQO.

AGRADECIMIENTO

Agradecimiento al Instituto de Investigación de la Universidad Nacional de Huancavelica por el apoyo brindado durante la realización de esta investigación. Nuestro agradecimiento al Ing. Yon Cecilio Cabrera por el apoyo incondicional a la presente investigación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Chaux G, Rojas G, Bolaños L. Producción más limpia y viabilidad de tratamiento biológico para efluentes de mataderos en pequeñas localidades Caso: Municipio de El Tambo (Colombia). *Rev Bio Agro*. 2009; 7(1): 102-114.
2. Caldera Y, Madueño P, Griborio A, Fernández N, Gutiérrez E. Effect of the organic load in the performance the UASB reactor treating slaughterhouse effluent. [Internet]. *Rev Téc Fac Ing Univ Zulia*. Agosto de 2005; 28(2). [citado 15 jun 2019]. Disponible en: http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0254-07702005000200003.
3. De la cruz Martínez LA, Orellana Rivas V. Caracterización del desagüe industrial de la pasta de pota para la remoción de carga orgánica utilizando un sistema combinado de UASB y lodos activados. [Tesis de grado] Lima, Perú: Universidad Nacional de Ingeniería; 2011.
4. García CC. Evaluación de la capacidad de remoción de materia orgánica de las aguas residuales de los rastros en reactor UASB. [Tesis de maestría]. Morelia: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo; 2012.

5. Reyes MD. Tratamiento de aguas residuales provenientes de rastro mediante un sistema de biodegradación anaerobia – aerobia. [Tesis de maestría] México: Universidad Nacional Autónoma de México; 2009.
6. De lemos CA. Reactores anaerobios. Principios del tratamiento biológico de aguas residuales. Pasto (Colombia): Universidad de Nariño; 2013.
7. Sierra Ramírez DC, Vivas Albarracín C. Diseño e implementación de una unidad piloto de tratamiento biológico no convencional para los vertimientos generados en el matadero de macanal (Corpochivor). [Tesis de grado]. Bogotá (Colombia): Universidad de la Salle; 2005.
8. Caldera Y. The effect of hydraulic retention time in the functioning of the USAB reactor in slaughterhouse effluent treatment. *Multiciencias*. 2003; 3(1):33–40.
9. Quispe JA. Estudio de la remoción de carga orgánica en un reactor anaerobio de manto de lodos de flujo ascendente con digestor de lodos aplicado a una localidad ubicada a una altitud de 3800 msnm. [Tesis de grado]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería; 2014.
10. Gonzáles P, Chamy R, Poirrier P. Tratamiento anaerobio de aguas residuales urbanas mediante un reactor UASB en clima templado frío. [Internet]. Valparaíso: Pontificia Universidad Católica de Valparaíso; 2000. [Citado 13 mayo 2019]. Disponible en: <https://pdfs.semanticscholar.org/38eb/792aa1b906026068d58d0d53616365aea986.pdf>

INFORMACIONES

Con una gran acogida se llevó a cabo el Curso de:

APLICACIONES DE LA QUÍMICA A LA CRIMINALÍSTICA

El sábado 21 de setiembre de 9:00 a.m. a 7:00 p.m. en el Auditorio de la SQP

OBJETIVOS DEL CURSO

- Fundamentos de las aplicaciones que la química aporta a la investigación de un supuesto delito.
- Las diferencias entre la investigación química y toxicológica relacionada con el ámbito legal y forense.
- Curso formativo para conocer el trabajo del perito especializado en Química frente al especialista en Toxicología.
- Importancia del estudio científico pericial, para colaborar con la Medicina Legal o Forense y con el Sistema Judicial.

DOCENTE INVITADO

Dr. César López Matayoshi

Especialista en Criminalística, Toxicología Forense y Análisis Químico e Instrumental
Profesor de la Sección de Química y de la Sección de Ciencias Farmacéuticas.
Facultad de Ciencias y Filosofía. Universidad Cayetano Heredia (Lima-Perú)
Investigador Postdoctoral del Grupo de Investigación en Ciencias Forenses
Instituto de Investigación Sanitaria San Carlos – Universidad Complutense (Madrid – España)

PROGRAMA DEL CURSO
(Sábado 21 de setiembre del 2019)

- 9:00 – 9:30** **Apertura del curso**
- 9:30 – 11:30** **Fundamentos de la Química y estudio Químico – Toxicológico, relacionados con la Criminalística**
Definiciones de la química para comprender su colaboración en la investigación legal y forense como ciencia experimental. Conceptos de la toxicología para diferenciarla con la Química Forense y conocer su metodología multidisciplinaria.
- 11:30 – 11:45** **Descanso**
- 11:45 – 13:45** **Investigación Química y Estudio Químico – Toxicológico**
Estudio de muestras e indicios durante la investigación judicial, análisis de pinturas, investigación de incendios, examen de restos disparos, etc. Estudio de muestras durante una investigación judicial tóxicos en sujeto vivo, cadáver y el medio ambiente o laboral.
- 13:45 – 14:45** **Tiempo para almorzar**
- 14:45 – 16:45** **Análisis Químico y estudio Químico – Toxicológico**
Tratamiento de la muestra forense. Protocolos y ensayos analíticos. Análisis Instrumental. Interpretación de resultados.
- 16:45 – 17:00** **Descanso**
- 17:00 – 19:00** **Aplicaciones e investigación de la Química y Toxicología, relacionados con la Criminalística**
Investigación y desarrollo relacionado con la química y toxicología forense.

