



Fundación
Universidad de América

REVISTA DE 
INVESTIGACIÓN

Vol.11 n° 2 julio-diciembre 2018

Ediciones Universidad de América

Directivas

JAIME POSADA DÍAZ
Presidente Institucional y Rector

LUIS JAIME POSADA GARCÍA-PEÑA
Vicerrector de Desarrollo y Recursos Humanos

ANA JOSEFA HERRERA VARGAS
Vicerrectora Académica y de Posgrado

MANUEL CANCELADO JIMÉNEZ
Director General de Investigaciones y Proyección Social

ARMANDO FERNÁNDEZ CÁRDENAS
Subdirector Operativo de Investigaciones

OSCAR RODRÍGUEZ VALDIVIESO
Decano Facultad de Arquitectura

FERNANDO MORENO HERRERA
Decano Facultad de Economía

JULIO CESAR FUENTES ARISMENDI
Decano Facultad de Ingenierías

Editor

M. Sc. Jaime Eduardo Arturo Calvache

Comité Editorial

Ph. D. José Colina Márquez
Universidad de Cartagena, Colombia

Ph. D. Mario Alejandro González M.
Universidad Austral de Chile, Chile

Ph. D. Jaime León Aguilar Arias
Universidad Nacional de Colombia, Colombia

Ph. D. Bárbara Miranda Morales
Universidad de Costa Rica, Costa Rica

Ph. D. Pablo César Manyoma Velásquez
Universidad del Valle, Colombia

Ph. D. Rosa Eugenia Reyes Gil
Universidad Manuela Beltrán, Colombia

Ph. D. (c) César Augusto Sánchez Correa
Universidad Nacional de Colombia, Colombia

Ph. D. Jesús Alfonso Torres Ortega
Universidad de la Salle, Colombia

Ph. D. Claudia Fernanda Villaquirán Raigoza
Universidad del Cauca, Colombia

Comité Científico

Ph. D. Fredy Humberto Escobar Macualo
Universidad Surcolombiana, Colombia

Ph. D. Jorge Ariel Guapacha Martínez
Universidad Nacional del Sur, Argentina

Ph. D. Alberto Medina-León
Universidad de Matanzas, Cuba

Ph. D. (c) Manuel Alejandro Mayorga Betancourt
Universidad Nacional de Colombia, Colombia

Ph. D. Reyna Natividad Rangel
Universidad Autónoma del Estado de México,
México

Coordinadora Gestión Investigaciones

Claudia Caicedo Pinzón

Revisión de estilo

Carlos Bastidas Zambrano

Diseño de portada

Daniela Mijares

Armada digital e impresión

DGP Editores SAS

Publicación semestral
Número de ejemplares: 40
ISSN 2011-639X
e-ISSN: 2590-6062

Indexación

La revista se encuentra registrada en el Índice Bibliográfico Nacional Pubblindex (IBN) de Colciencias así como en Latindex, Ulrich's, REDIB y DOAJ.

Alcance editorial

La *Revista de Investigación* es una publicación arbitrada, de carácter académico científico con periodicidad semestral, editada por la Dirección de Investigaciones de la Fundación Universidad de América (Bogotá-Colombia).

Su objetivo es difundir los resultados de investigaciones científicas y tecnológicas sobre temáticas asociadas específicamente con ingeniería.

La revista está dirigida a investigadores, docentes, estudiantes, empresarios y profesionales que estén interesados en conocer los resultados de investigaciones recientes en el área de las ingenierías.

Reproducción

La responsabilidad del contenido de los artículos corresponde exclusivamente a sus autores y no reflejan el pensamiento de la Fundación Universidad de América.

Se permite la reproducción total o parcial del contenido de esta revista con fines académicos, con la condición de citar la fuente, volumen, número, autor y título del artículo.

Ediciones Universidad de América
Revista de Investigación
Dirección de Investigaciones
Av. Circunvalar No. 20-53 Bogotá, Colombia
PBX: (+57 1) 3376680
revista@uamerica.edu.co
www.uamerica.edu.co

Contenido

Editorial	7
<i>Jaime Eduardo Arturo Calvache</i>	

Artículos de investigación

Interpretación de pruebas de pulso mediante la técnica TDS	9
Pulse tests interpretation by the tds technique	
<i>Freddy Humberto Escobar, Diego Mauricio Patarroyo-Gracia, Alfredo Gbisy-Ruiz</i>	

Metabolitos secundarios de especies de la familia Lauraceae con potencial uso cosmético para el mejoramiento, protección y preservación de la piel	31
Secondary metabolites of lauraceae species and its potential use in cosmetic for the improvement, protection and preservation of the skin	
<i>Luis Enrique Cuca Suarez, Sonia Teresa González Acosta</i>	

Niveles de metales pesados en los sedimentos superficiales de las zonas de playas turísticas de La Guajira, norte de Colombia	49
Levels of heavy metals in surface sediments of the areas of tourist beaches of La Guajira, northern Colombia	
<i>Carlos Doria Argumedo</i>	

Estado del arte de correlaciones para el modelamiento del fenómeno de transferencia de masa en columnas de extracción líquido-líquido	67
State of the art in correlations for mass transfer modeling in liquid-liquid extraction columns	
<i>Sebastian Gómez Páez</i>	

Modelo de simulación como herramienta para la mejora de servicios bibliotecarios	83
Simulation model as a tool for library services improvement	
<i>Brayan Leonardo Gil Guevara, Jorge Armando Puentes Márquez, Andrés Vergara Narváez</i>	

Artículos de revisión

Una revisión del estado actual de los envases para la industria alimentaria	95
Review of the current state of packaging for the food industry	
<i>José Ignacio Nicolao García, Claudia Zárate</i>	

Electrocoagulación en la remoción de contaminantes de efluentes provenientes de fertilizantes nitrogenados. Artículo de revisión	109
Electrocoagulation in the effluent contaminants clearance from nitrogen fertilizers: a review	
<i>Felipe Correa Mabecha, Diana Marcela Cuesta Parra, Anyi Paola Melo Hernández, Laura Juliana Sacristán Yepes</i>	

Revisión del uso de sellos químicos para el control de agua de producción en pozos petroleros	141
Review about the use of chemical seals as a treatment for water control in production wells <i>Juan Sandoval Herrera, Angie Ortega Ramírez, Estefanie Luque Castro, Catherin Moreno León</i>	
Conceptos metodológicos aplicables a la Ingeniería	
La auditoría interna de calidad. Estudio de caso <i>Carolina Quintero Londoño</i>	153
Pautas para la presentación de artículos	175
Guidelines for the presentation of articles	181
Agradecimientos a pares evaluadores	185

EDITORIAL

Como complemento al plan de mejoramiento diseñado en el primer semestre de 2017 y a la participación de nuestro equipo editorial en el curso Currículo Editor, dictado por Colciencias en este segundo semestre del año 2018, para las revistas que se presentaron a la convocatoria de indexación de revistas científicas especializadas en ciencia, tecnología e innovación, *Revista de Investigación* está implementando prácticas internacionales para la gestión, evaluación, calidad de contenidos, metodologías, impacto y visibilidad editorial, las cuales fijamos como ruta para fortalecer esta publicación y afrontar los retos planteados por el nuevo modelo de clasificación de revistas científicas de Colciencias.

Para nuestro equipo editorial fue una experiencia de aprendizaje significativa y muy provechosa; cabe mencionar que este tipo de capacitaciones impartidas por Colciencias fortalecen la gestión científica y editorial de las publicaciones universitarias colombianas.

Otro reto que nos hemos trazado es la publicación de investigaciones asociadas a instituciones y organismos vinculados con la academia y la investigación científica. En este sentido, hemos publicado estudios de universidades nacionales (Universidad Surcolombiana, Universidad del Atlántico Universidad Santiago de Cali, Universidad de Sucre, Corporación Universitaria del Caribe-CECAR, Universidad Tecnológica de Pereira, Universidad de la Guajira, Universidad Nacional de Colombia y Universidad Militar Nueva Granada) e internacionales (Universidad Nacional Experimental Francisco de Miranda y Universidad Nacional del Mar del Plata).

Por otro lado, gracias a la gestión del equipo editorial, la revista fue recientemente incluida en el Directorio de Revistas de Acceso Abierto (DOAJ) y Red Iberoamericana y Conocimiento Científico de Innovación (REDIB). Dichas redes permitirán aumentar la visibilidad e impacto de la revista a nivel internacional.

Este número publica nueve trabajos de investigadores nacionales e internacionales. El artículo *Interpretación de pruebas de pulso mediante la técnica TDS* analiza pruebas de pulso en yacimientos hidrocarbúricos para encontrar la permeabilidad y porosidad entre pozos de yacimiento. El trabajo *Metabolitos secundarios de especies de la familia Lauraceae con potencial uso cosmético para el mejoramiento, protección y preservación de la piel* estudia las propiedades químicas de las especies de la familia Lauraceae que pueden ser aplicadas en la industria cosmética, documentando los metabolitos secundarios y extractos con su respectiva actividad. La investigación *Niveles de metales pesados en los sedimentos superficiales de las zonas de playas turísticas de la Guajira, norte de Colombia* analiza la concentración de metales pesados en sedimentos superficiales en las playas turísticas de La Guajira para conocer los niveles de línea base y contaminación. El artículo *Estado del arte de correlaciones para el modelamiento del fenómeno de transferencia de masa en columnas de extracción líquido-líquido* presenta una revisión de la literatura sobre el modelamiento del fenómeno de transferencia de masa en procesos de separación que utiliza columnas de extracción líquido-líquido. La investigación *Modelo de simulación como herramienta para la mejora de servicios bibliotecarios* identifica los procesos críticos de un sistema de servicios bibliotecarios para que por medio del software

de simulación FlexSim generar se generen estrategias orientadas a la mejora de estos servicios. *Una revisión del estado actual de los envases para la industria alimentaria* analiza el origen de los envases alimentarios tradicionales y su evolución hacia los envases activos e inteligentes de la industria alimentaria. El estudio *Electrocoagulación en la remoción de contaminantes de efluentes provenientes de fertilizantes nitrogenados: Una revisión* expone el desarrollo de la tecnología de electrocoagulación, sus ventajas y desventajas, así como discute sobre las diferentes variables que influyen en la eficiencia de remoción de contaminantes en este proceso. *Revisión del uso de sellos químicos para el control de agua de producción en pozos petroleros* revisa la bibliografía científica sobre el uso de polímeros en sellos químicos utilizados para el control de agua de producción en la industria petrolera.

La sección Conceptos Metodológicos presenta el artículo *La auditoría interna de calidad. Estudio de caso*, en el cual se describe de forma detallada y mediante un estudio de caso cómo se desarrolla e implementa una auditoría interna, incluyendo las correspondientes descripciones particulares en cada una de las etapas de la auditoría.

Como editor de la revista agradezco a todos los colaboradores que de forma directa o no participaron en la culminación exitosa de este número de *Revista de Investigación*. A los autores, pares académicos, equipo editorial y científico, directivas de la Universidad y a nuestros lectores, a todos, muchas gracias. Seguiremos con paso firme en nuestro proyecto para la consolidación de esta revista como una opción académica para la divulgación de los desarrollos científicos y tecnológicos universitarios.

Jaime Eduardo Arturo Calvache
EDITOR

INTERPRETACIÓN DE PRUEBAS DE PULSO MEDIANTE LA TÉCNICA TDS

PULSE TESTS INTERPRETATION BY THE TDS TECHNIQUE

Freddy Humberto Escobar*
Diego Mauricio Patarroyo-Gracia**
Alfredo Ghisays-Ruiz***

Recibido: 13 de diciembre de 2017

Aceptado: 17 de mayo de 2018

Resumen

El análisis de pruebas de presión es la forma más económica de caracterizar un yacimiento. A menudo se usa una prueba de presión como la principal tecnología, ya sea para monitorear el comportamiento del desarrollo de la inversión en tales sistemas, o diagnosticar comportamientos inesperados del pozo o yacimiento. Los resultados de la interpretación de las pruebas de presión se usan para tomar decisiones que conducen a un manejo adecuado del proyecto. Las pruebas de presión proporcionan la información para establecer las características del reservorio, predecir el comportamiento del mismo y diagnosticar daños a la formación. Las pruebas de pulso son una forma de pruebas múltiples inicialmente descritas en 1966. La técnica usa series de tasas y cierres cortos en un pozo activo. Usualmente, los pulsos están formados por periodos alternantes de producción/inyección y cierre que usan la misma tasa de flujo/inyección en cada periodo. La respuesta de presión de los pulsos se mide en el pozo de observación. Puesto que el pulso es de corta duración, la respuesta de presión es pequeña, algunas veces menor de 0.01 psi. Por ende, se requiere normalmente un equipo especial de medición de presión. El método de interpretación de pruebas de pulso más popular es el método de la tangente, el cual requiere graficar la presión contra el tiempo y trazar una recta tangente entre dos valles o picos continuos y paralela al pico entre estos. La principal desventaja de este método estriba en que usa cartas de corrección existentes, las cuales hacen tedioso el análisis. Este estudio presenta el análisis de pruebas de pulso en yacimientos hidrocarburíferos usando el gráfico logarítmico de la presión y la derivada de presión contra el tiempo en el pozo de observación, de modo que se introduce una técnica que utiliza puntos claves y características especiales en el gráfico mencionado para hallar la permeabilidad y porosidad entre pozos del yacimiento. Finalmente, se usan ejemplos sintéticos para aplicar las ecuaciones y verificar su exactitud y practicidad.

Palabras clave: prueba de pulso, método de la tangente, técnica TDS.

* Ph.D. en Ingeniería de Petróleos. Profesor titular, grupo de investigación Geosciences, Infraestructure, Productivity, Environment (GIPE), Universidad Surcolombiana, Neiva, Colombia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4901-6057>. fescobar@usco.edu.co

** Ing. Electrónico. Investigador, grupo de investigación Geosciences, Infraestructure, Productivity, Environment (GIPE), Universidad Surcolombiana, Neiva, Colombia. diegopata3361@gmail.com

*** Lic. en Física y Matemáticas, M.Sc. en Geofísica. Profesor, grupo de investigación Geología, Geofísica y Procesos Marino-Costeros, Universidad del Atlántico, Barranquilla, Colombia. alfghi1@gmail.com

Abstract

Well testing is the cheapest way to characterize a reservoir. A well test is often used as the principal technology to monitor either the investment performance of such systems or for unexpected well or reservoir diagnostic behaviors. The results of the well test data analysis are used to make the decisions that lead to a good project management. Well tests provide the information to establish the reservoir characteristics, predicting the operation of the reservoir and diagnosing the damage of the formation. The pulse test is a special form of multiple well testing initially described in 1966. The technique uses a short rate pulse series in the active well. The pulses are usually alternating periods of production or injection and closing, with the same rate during each period of production or injection. The pressure response of the pulses is measured in the observation well. Due to the pulse is of short duration, the pressure response is small, sometimes less than 0.01 psi. Therefore, a special equipment for measuring pressure is usually required. The most popular interpretation methodology for pulse testing is the tangent method which requires plotting the pressures against time data and drawing a tangent between two continuous valleys or peaks and a parallel to the peak between them. The main disadvantage of this method lies in the use of previously designed correcting charts which make the analysis cumbersome. This study presents the analysis of pulse testing in hydrocarbon reservoirs using the log-log graph of the pressure and pressure derivative function versus time at the observer well so a technique that uses characteristic points and features on the mentioned plot is developed to find the interwell permeability of porosity of the reservoir. Finally, synthetic examples are presented with the purpose of verifying the equations reliability, finding that the calculated are very accurate.

Keywords: pulse test, tangent method, TDS technique.

INTRODUCCIÓN

En una prueba, un pozo se abre varias veces durante algunas horas para la producción y luego se cierra en otro período de tiempo. La presión del pulso se observa en otro pozo, llamado pozo de observación. Estas pruebas se realizan principalmente para encontrar conectividad hidráulica entre los dos pozos, o determinar tanto la permeabilidad entre pozos como la porosidad. Este tipo de pruebas se introducen por el método propuesto por Johnson, Greenkorn y Woods (1966), que supone un reservorio infinito y homogéneo con un fluido único y ligeramente compresible y deja de lado los efectos de gravedad y capilaridad y el almacenamiento del pozo. Con base en la solución de fuente de línea, se proporciona la estimación de la transmisibilidad del yacimiento (kh/μ) y la capacidad de almacenamiento de la formación ($\phi c_i h$) para períodos de flujo y cierre de igual duración. También se desarrolla el “método tangente” para la interpretación de las pruebas de pulso. Este método utiliza tablas de corrección para eliminar las tendencias lineales desconocidas de la presión del yacimiento. Si se omite esta corrección, se introducen errores considerables en la estimación de los parámetros del yacimiento. Brigham (1970) presentó un método gráfico modificado del método de Johnson et ál. (1966). Más tarde, Kamal (1983) desarrolló un método para calcular la relación de pulso óptima para alcanzar la respuesta de pulso máxima utilizando flujos desiguales y períodos de cierre.

Vela y Mckinley (1970) examinaron los efectos de la heterogeneidad del área sobre la respuesta a la presión utilizando una solución numérica de la ecuación de difusividad para fluidos ligeramente compresibles. Tongpenyai y Raghavan (1981) estudiaron los cambios en el almacenamiento del

pozo y los efectos de la piel en ambos pozos y no encontraron alteración de la respuesta a la presión debido a estos parámetros.

Ogbe y Brigham (1987) y Dinges y Ogbe (1988) incluyeron el daño y el almacenamiento de pozo según el método de la tangente. El primer estudio usa un factor de corrección de almacenamiento de pozo normalizado para la amplitud de respuesta y el retardo de tiempo. El segundo usa una amplitud adimensional y un retraso de tiempo directamente para tener en cuenta los efectos de almacenamiento del pozo.

Hasta el momento, nadie ha publicado ningún trabajo de la aplicación derivada de presión continua para la prueba de pulso; la aproximación más cercana fue presentada por Fokker, Borello, Verga y Viberti (2017) y Zenith, Foss, Tjønnås y Hasan (2015). En este artículo, la técnica TDS, introducida inicialmente por Tiab (1994), se amplía para desarrollar una herramienta de interpretación práctica y precisa para las pruebas de pulso, en la que se elimina el uso de tablas de corrección. Se encuentra que todas las expresiones proporcionan excelentes resultados; no obstante, la corrección del punto de intersección subestima ligeramente la permeabilidad del yacimiento, aunque sobreestima la porosidad.

MODELO MATEMÁTICO

La distribución de la presión de un yacimiento naturalmente fracturado en cualquier punto dentro de un depósito circular fue presentada por Da Prat, Ramey y Cinco-Ley (1982). La solución espacial de Laplace aplicada a un depósito homogéneo se reduce a:

$$\bar{P}_D(s, r_D) = \frac{K_1[\sqrt{s}r_{eD}]I_0[\sqrt{s}r_D] + K_0[\sqrt{s}r_D]I_1[\sqrt{s}r_d]}{s^2[K_1[\sqrt{s}r_{eD}]I_0[\sqrt{s}] - K_0[\sqrt{s}]I_1[\sqrt{s}r_{eD}]]} C_D \tag{1}$$

$$-S[1 + sSC_D]\sqrt{s}[K_1[\sqrt{s}]I_1[\sqrt{s}r_{eD}] - K_1[\sqrt{s}r_{eD}]I_1[\sqrt{s}]]$$

Por su parte, la derivada de presión está dada por:

$$t_D * P_D' = t_D * {}^{-1}[s\bar{P}_D(s, r_D)] \tag{2}$$

Este modelo solo considera el daño y el almacenamiento de pozo en el pozo activo. Ogbe y Brigham (1987) incluyen la piel en ambos pozos. Por lo tanto, se supone aquí que solo se consideran el almacenamiento de la piel y el pozo del pozo activo.

Las cantidades adimensionales se expresan:

$$t_D = \frac{0.0002637 kt}{\phi\mu c_i r_w^2} \tag{3}$$

$$t_{DA} = \frac{0.0002637 kt}{\phi\mu c_i A} \tag{4}$$

$$t_D = \frac{kh(\Delta P)}{141.2q\mu B} \tag{5}$$

$$t_D * P_D' = \frac{kh(t * \Delta P')}{141.2q\mu B} \tag{6}$$

$$C_D = \frac{0.894C}{\phi C_i h r_w^2} \tag{7}$$

$$r_D = \frac{r}{r_w} \tag{8}$$

$$r_{De} = \frac{r_e}{r_w} \tag{9}$$

$$R = \frac{t_f}{\Delta t_p} \tag{10}$$

Las ecuaciones 1 y 2 se usaron en combinación con el principio de superposición de tiempo para generar varios pulsos en el pozo de observación, para el cual se aplicó la técnica desarrollada más adelante. Un ejemplo de tales pulsos se da en la figura 1, en la que se observa un comportamiento caótico cuando se usaron varias distancias entre el productor y los pozos observadores. Se evidenció que tanto la presión como la derivada están superpuestas.

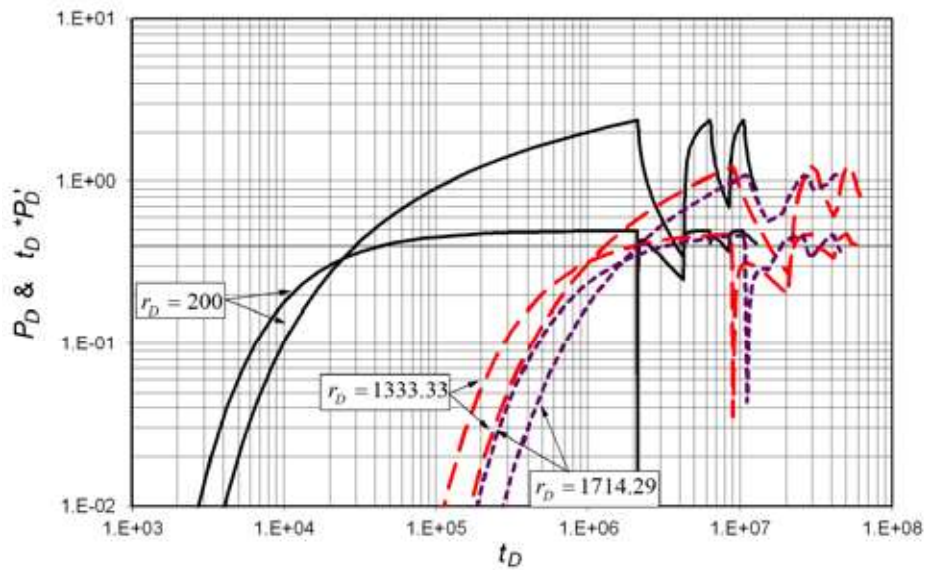


Figura 1. Gráfica adimensional de presión y derivada de presión de pruebas de pulso con diferentes distancias entre pozos y R = 1.

TÉCNICA TDS

TDS (Tiab, 1995) es una técnica de interpretación de pozos innovadora, potente, precisa y práctica que utiliza características y líneas características encontradas en la gráfica logarítmica de la derivada de presión y presión en función del tiempo. Las ecuaciones analíticas se desarrollan para cada régimen de flujo en función de características tales como puntos máximos, puntos mínimos, puntos de inflexión y líneas. Aunque la intersección de las ecuaciones gobernantes de dos regímenes de flujo diferentes no tiene ningún significado físico, permite el desarrollo de más ecuaciones utilizadas con fines de verificación. Se debe tener cuidado en la estimación de la derivada de presión. Los puntos de presión de un período de flujo dado no se pueden usar con el siguiente período de cierre porque se obtendrá una estimación derivada caótica. Luego, para cada período, se debe establecer un punto de presión inicial para que las presiones de un período de flujo no se mezclen con las presiones del siguiente período de cierre. Esto significa que la presión inicial para la estimación de la derivada de presión corresponde al último punto del primer flujo o período de cierre. La derivada de presión se toma individualmente para cada período y luego se vincula para tener un conjunto completo de la función de derivada de presión. El lector debe tener en cuenta que la superposición se considera para los períodos de cierre. Se denomina a esto derivada de presión superpuesta o continua.

El punto de intersección formado por la presión y la derivada de presión adimensional frente al tiempo adimensional dividido por el radio adimensional al cuadrado es único. Tal punto permite encontrar dos expresiones usadas para determinar la permeabilidad y la porosidad, respectivamente. Sin embargo, este punto se ve afectado por el almacenamiento del pozo, por lo que se introducen expresiones empíricas para corregir las coordenadas de dicho punto. También se encontró que la derivada de presión de los pulsos pares muestra un comportamiento negativo de la línea de pendiente unitaria. A partir de tal tendencia, se encontró una ecuación para la estimación de la permeabilidad del yacimiento para el segundo y cuarto pulso. Las expresiones desarrolladas se probaron con éxito con tres ejemplos sintéticos. Es importante señalar que la interpretación solo se puede realizar con el punto de intersección. Las ecuaciones desarrolladas restantes se usan para procesos de verificación.

Análisis del primer pulso

Contrariamente a la prueba de pulso convencional, en la que se requiere la consideración de la duración del pulso y el tiempo de retardo entre el final del pulso y el siguiente pico máximo de presión, la técnica TDS se puede aplicar sin considerar estas situaciones. Como se observa en la figura 2, sin importar los valores R ni la distancia entre los pozos, la derivada de presión y presión sigue un comportamiento unificado con un punto de intersección único entre las curvas derivadas de presión y presión. Si la prueba de pulso se dispara demasiado para que no se vea el punto de intersección, la metodología aquí propuesta no se aplica. Aunque, para fines pedagógicos, los ejemplos se dan con tiempos de prueba largos, también observamos que el punto de intersección se puede ver en un par de horas de prueba.

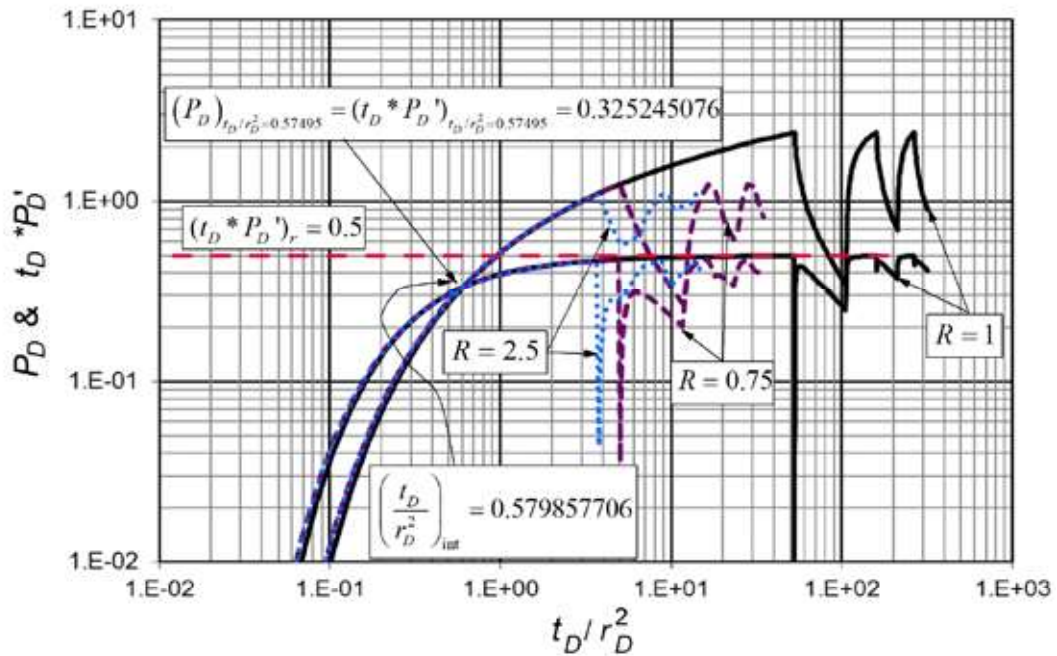


Figura 2. Presión adimensional unificada y derivada de presión versus tiempo adimensional dividido por el radio adimensional cuadrado para pruebas de pulso con diferente distancia entre pozos y diferentes valores R en el pozo de observación.

La unificación mencionada en el apartado anterior fue utilizada por primera vez por Ouan-dlous (1999) y luego fue aplicada por Escobar, Cubillos y Montealegre (2008) para pruebas de in-terferencia. Sin embargo, aquí se trabaja con una corrección muy ligera del punto de intersección. Tal punto de intersección tiene las siguientes coordenadas:

$$(P_D)_{t_D/r_D^2 = 0.579857706} = (t_D * P_D')_{t_D/r_D^2 = 0.579857706} = 0.325245076 \quad (11)$$

$$\left(\frac{t_D}{r_D^2}\right) = 0.579857706 \quad (12)$$

Reemplazando las ecuaciones 5 y 6 en la ecuación 1:

$$k = \frac{45.9246q\mu B}{h(t * \Delta P')_{int}} = \frac{45.9246q\mu B}{h(\Delta P)_{int}} \quad (13)$$

Por su parte, el reemplazo de la ecuación 3 en la ecuación 11 permite encontrar:

$$\phi = \frac{kt_{int}}{2198.92948\mu c_i r^2} \quad (14)$$

A partir de la observación de la figura 2, cuando el pulso es lo suficientemente largo para que el flujo radial se desarrolle en el primer pulso, se observa una línea horizontal en la curva derivada de presión. Esta línea horizontal tiene la siguiente ecuación que rige Tiab (1995):

$$(t_D * P_D')_r = 0.5 \tag{15}$$

Lo que permite encontrar la permeabilidad de la formación una vez que la ecuación 5 ha sido reemplazada en la expresión anterior:

$$k = \frac{70.6q\mu B}{h(t * \Delta P')_r} \tag{16}$$

En el caso hipotético de que el primer pulso sea suficientemente largo para alcanzar el estado pseudoestable, aunque es más esperado para las pruebas de interferencia (el siguiente tratamiento también se aplica a él), el comportamiento tardío de la derivada de presión frente al tiempo adimensional proporciona según el área una pendiente unitaria única (ver la figura 3), cuya ecuación de gobierno Tiab (1994) viene dada por:

$$t_D * P_D' = 2\pi t_{DA} \tag{17}$$

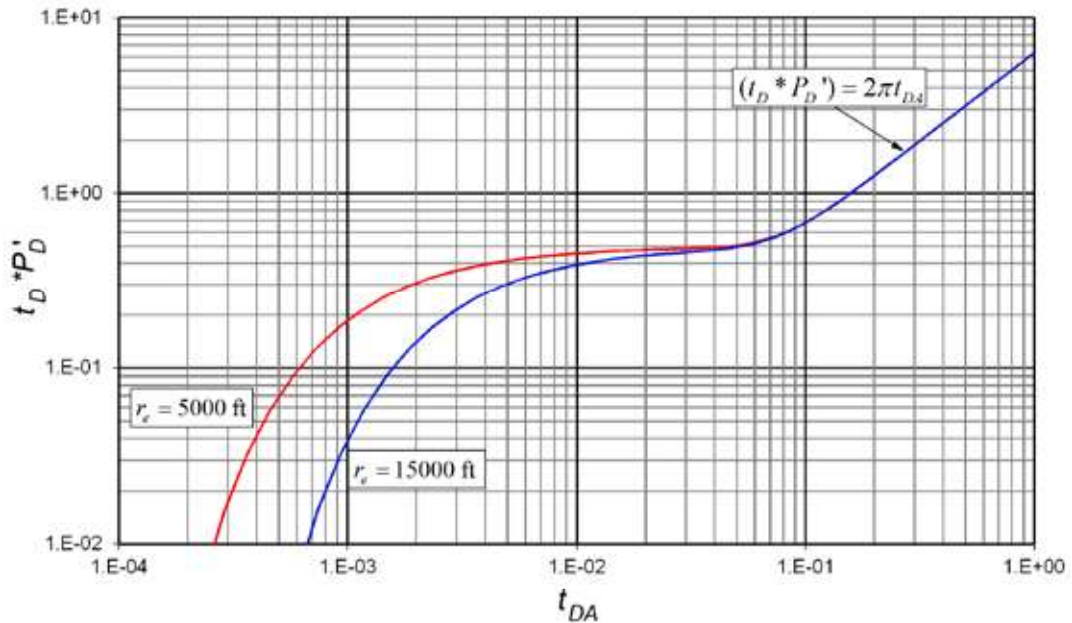


Figura 3. Comportamiento unificado a tiempo tardío de la presión y derivada de presión adimensional versus tiempo adimensional basado en el área para pruebas de pulso con R = 1 y diferente radio de depósito externo, primer pulso.

La combinación de las ecuaciones 15 y 17 implica:

$$A = \frac{kt_{rpssi}}{301.77\phi\mu c_t} \quad (18)$$

Además, el reemplazo de la ecuación 4 y 6 en la ecuación 17 y solucionando para el área da:

$$A = \frac{0.234qBt_{pss}}{\phi c_t (t * \Delta P')_{pss}} \quad (19)$$

Los autores son conscientes de que las condiciones de flujo radial, menos el estado pseudoes-table, no se deben encontrar durante la prueba de pulso. Sin embargo, las ecuaciones desarrolladas también se aplican a las pruebas de interferencia (las ecuaciones para ese caso aún no se han publicado).

Efectos del almacenamiento del pozo y el daño en el punto de intersección

Se cree que los efectos de almacenamiento en el pozo de observación aumentan con el tiempo de latencia y tienden a reducir la amplitud de los primeros pulsos. Sin embargo, si $r > 32[C/(\phi c_t)]^{0.54}$, los efectos de almacenamiento son menores al 5 % de incremento en el tiempo de transición y no afectarán la amplitud. Según Chu, Garcia-Rivera y Raghavan (1980), esto es válido si:

$$\frac{t_D}{r_D^2} > (230 + 15s) \left(\frac{C_D}{r_D^2} \right)^{0.86} \quad (20)$$

Sin embargo, la aproximación presentada aquí por las ecuaciones 13 y 14 es válida para el punto de intersección sin considerar los efectos de almacenamiento del pozo; por lo tanto, se realizó un análisis para el factor de daño del pozo activo en el punto de intersección y no se encontraron efectos. Sin embargo, los pozos se establecieron muy cerca el uno del otro (10 pies) para poder determinar los máximos efectos de almacenamiento sobre la prueba, aunque actualmente ya no se perforan pozos a dichas distancias. Por otro lado, como se observa en la figura 4, el tiempo adimensional dividido por el radio adimensional al cuadrado en la intersección se ve afectado por valores C_D/r_D^2 mayores que 0.001 y la presión adimensional (o derivada por presión) del punto de intersección se ve afectada por el pozo almacenamiento después de valores C_D/r_D^2 mayores que 0.00025.

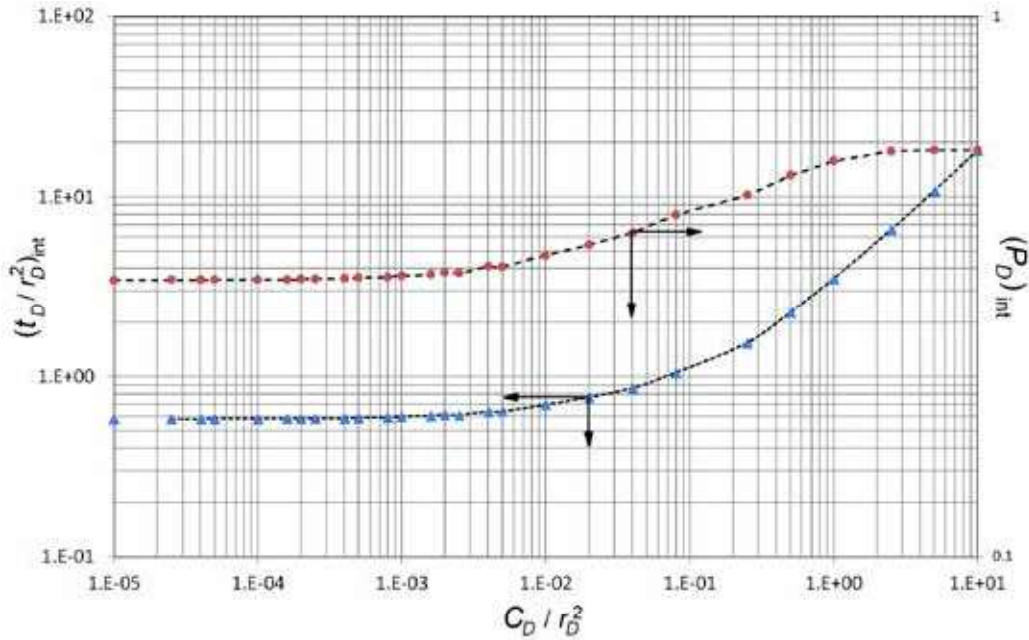


Figura 4. Efecto del almacenamiento del pozo activo en el punto de intersección.

Con base en la figura 4, un factor de corrección fue empíricamente obtenido (coeficiente de correlación al cuadrado >0.999) para el punto de intersección, de modo que las ecuaciones 13 y 14 siguen siendo válidas. Al respecto, se aplica la siguiente corrección:

$$(t * \Delta P')_{int} = \Delta P_{int} = \frac{0.325 \Delta P_{intO}}{0.4 + e^{1.07290474 + 0.776422265 * \ln[CD/r_D^2]}} \quad (21)$$

Como se ve en la figura 4, para valores de C_D/r_D^2 mayores a 5, el efecto del almacenamiento del pozo se vuelve constante; entonces, cada vez que $C_D/r_D^2 > 5$ establece $C_D/r_D^2 = 5$.

$$t_{int} = \frac{0.579 t_{intO}}{0.7 + e^{-1.830074147 + 1.3217409 * [CD/r_D^2]^3 - 0.0717725314 * [\ln(C_D/r_D^2)]^2}} \quad (22)$$

El sufijo intO representa el punto de intersección observado. Tenga en cuenta que las ecuaciones 21 y 22 suponen que se conoce el valor de C_D/r_D^2 . Como se observa en la ecuación 7, se requiere la porosidad desconocida para la estimación de la relación C_D/r_D^2 . Por lo tanto, se puede aplicar un procedimiento de prueba y error. Suponiendo un valor de porosidad, encuentre el coeficiente adimensional de almacenamiento del pozo con la ecuación 7 y luego estime la relación C_D/r_D^2 . Aplique la ecuación 22 y encuentre el tiempo de intersección de corrección; luego, estime la porosidad de la ecuación 14. Use este valor de porosidad nuevamente en la ecuación 7 y repita el procedimiento dos veces más para obtener la convergencia de la porosidad.

Pulsos pares

La derivada de presión durante los pulsos pares tiene una característica única: muestra una línea recta con una pendiente unitaria negativa. Esta línea recta tiene interceptaciones diferentes dependiendo del tiempo de flujo sobre la relación de tiempo de cierre, R , y la duración del pulso. La figura 5 se construyó para $R = 0.5$ y muestra el impacto de la duración del pulso según los parámetros dados en la tabla 1.

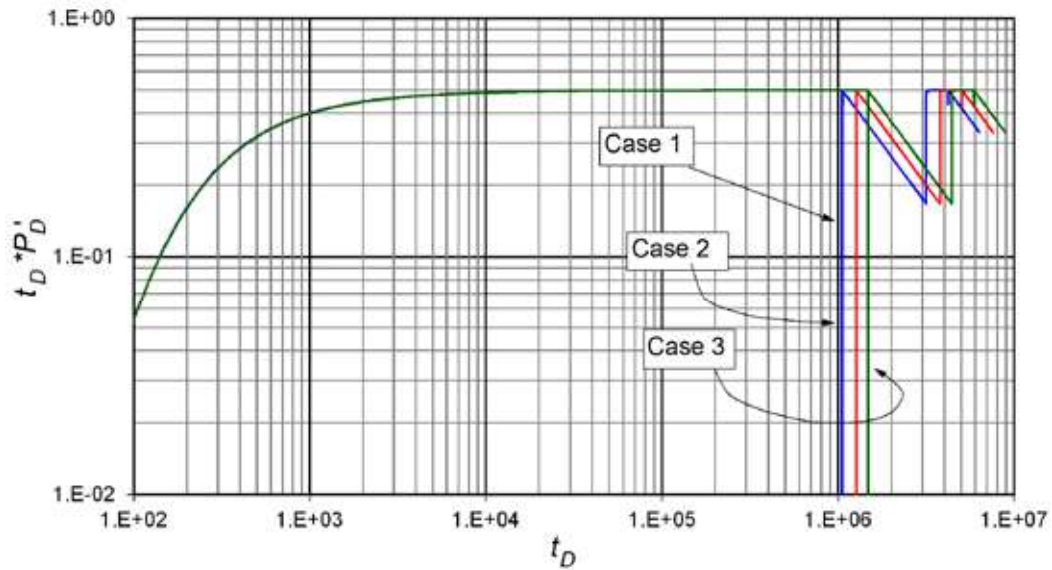


Figura 5. Efecto de longitud de pulso en la derivada de presión para los pulsos pares.

Tabla 1. Longitud de pulso

Case	t_p , hr	Δt_p , hr
1	50	100
2	60	120
3	70	140

Si el tiempo adimensional se multiplica por el tiempo de pulso adimensional (duración del pulso completa), la derivada de presión se unifica en el segundo y cuarto pulso, así como se muestra en la figura 6.

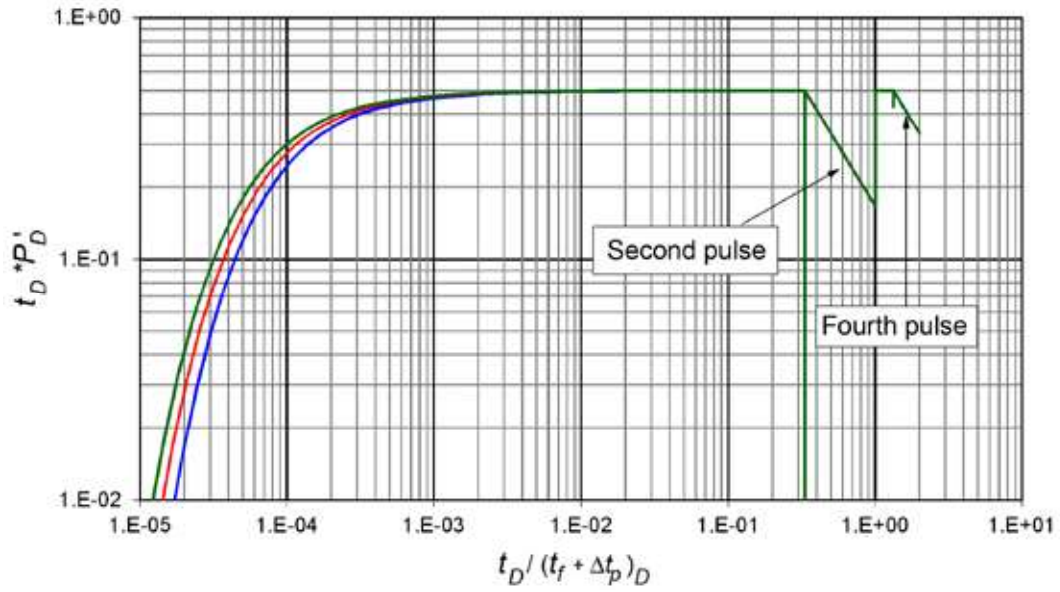


Figura 6. Derivada de presión unificada para el segundo y cuarto pulsos con valores iguales de R pero diferente longitud de pulso.

El efecto de R en la derivada de la pendiente unitaria negativa se evidencia en la figura 7.

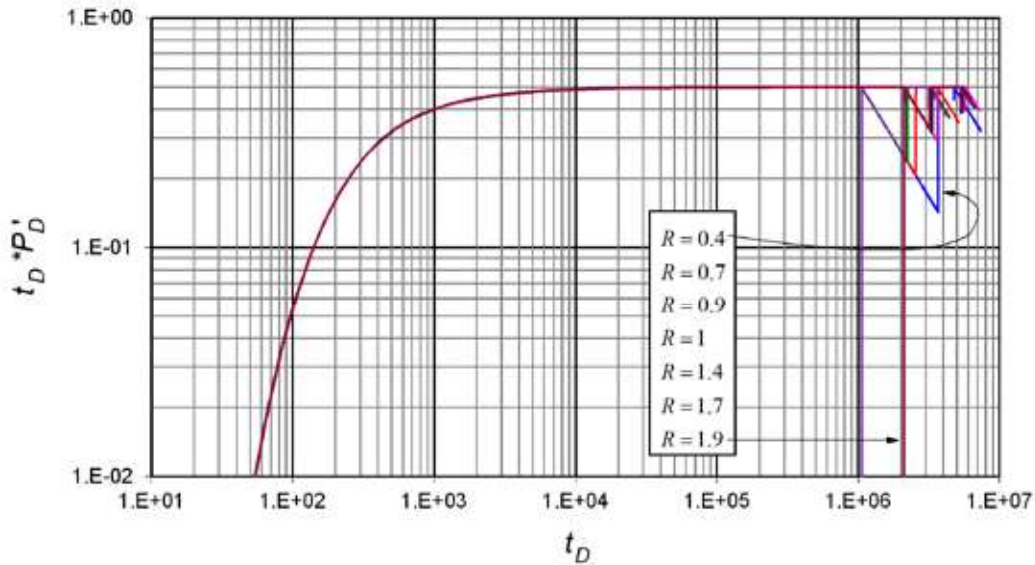


Figura 7. Derivado de presión y presión versus tiempo adimensional para pruebas de pulso con diferentes valores de R , $0.2 \leq R \leq 2$.

El comportamiento de la pendiente unitaria negativa se unificó multiplicando el tiempo adimensional por la longitud del tiempo del impulso adimensional, tal como se advierte en la figura 8.

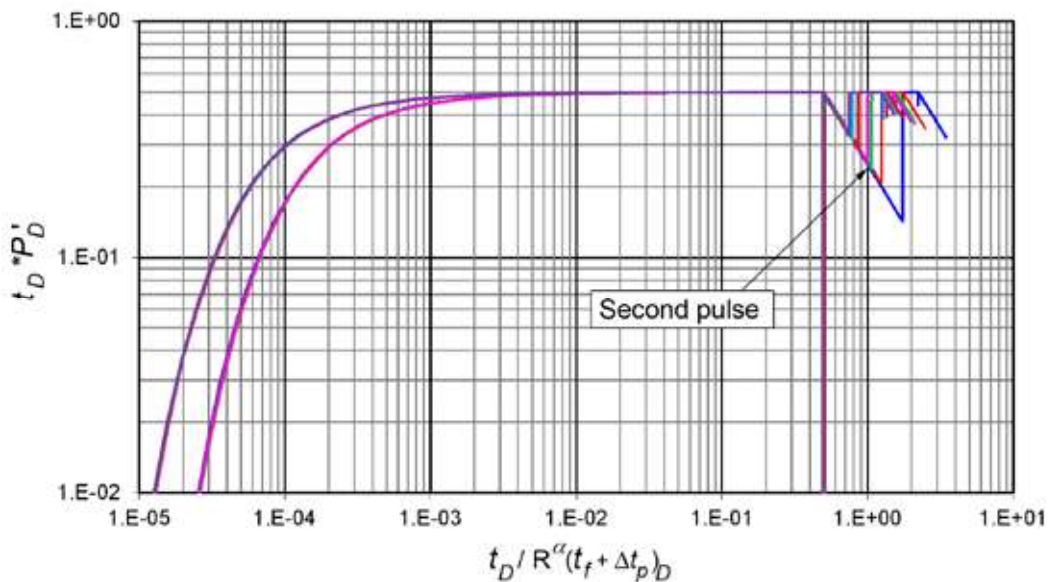


Figura 8. Derivada de presión unificada para el segundo pulso con diferentes valores R, pero diferente longitud de pulso.

La tabla 2 muestra los casos estudiados para diferentes valores de R.

Tabla 2. Valores de R utilizados para la unificación de la derivada de presión de la pendiente unitaria negativa

Caso	t_p , hr	Δt_p , hr	R
1	50	125	0.4
2	50	71.428	0.7
3	50	55.555	0.9
4	50	50	1
5	100	71.428	1.4
6	100	58.823	1.7
7	100	52.631	1.9

La unificación de las derivadas de presión de pendiente unitaria negativa se logró multiplicando el tiempo adimensional por R^α , como se da en las figuras 8 y 9 para el segundo y cuarto pulso, respectivamente.

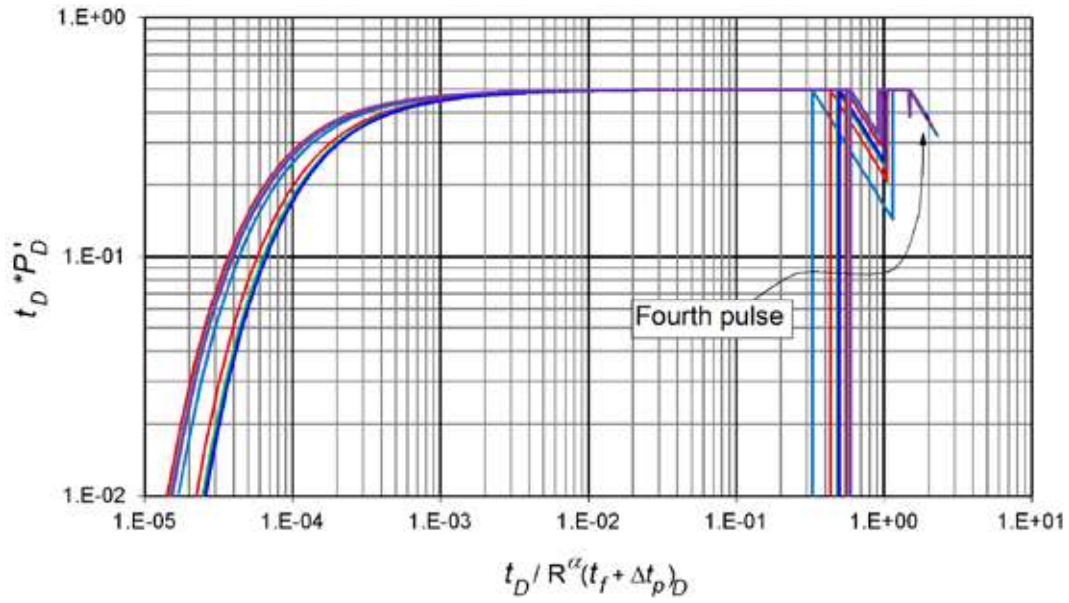


Figura 9. Derivada de presión unificada para el cuarto pulso con diferentes valores R, pero diferente longitud de pulso.

Los valores α se presentan en la tabla 3. Observe que la unificación obtenida en la figura 6 también se mantuvo.

Tabla 3. Valores de α para los pulsos 2 y 4

Número pulso	α	
	R < 1.0	R > 1.0
2	0.6	0.5
4	0.15	0.15

Se obtiene empíricamente una ecuación lineal para la derivada de presión de la pendiente unitaria negativa de las figuras 8 y 9:

$$t_D * P_D' = \frac{\beta R^\alpha (t_f + \Delta t_p)_D}{t_D} \tag{23}$$

Donde β toma los valores de 0.2477 o 0.7371 para el segundo o cuarto pulso, por lo tanto:

$$t_D * P_D' = \frac{0.2477 R^\alpha (t_f + \Delta t_p)_D}{t_D} \tag{24}$$

$$t_D * P_D' = \frac{0.7371R^\alpha (t_f + \Delta t_p)_D}{t_D} \tag{25}$$

Al reemplazar las ecuaciones 3 y 6 en la ecuación 23 y resolver la permeabilidad, se obtiene:

$$k = \frac{141.2qB\mu\beta R^\alpha (t_f + \Delta t_p)}{h(t * \Delta P')t_{nus}} \tag{26}$$

El sufijo *nus* representa la pendiente unitaria negativa, que puede ser *nus2* o *nus4*, dependiendo del tratamiento con el segundo o cuarto pulso.

EJEMPLOS

Se trabajaron tres ejemplos sintéticos de prueba de pulso para la verificación de las expresiones desarrolladas. Se recuerda que la derivada de presión se debe estimar por períodos configurando el valor de presión inicial como el punto de referencia para el cálculo de la caída de presión.

Ejemplo sintético 1

Se simuló una prueba de pulso de presión con la información proporcionada en la segunda columna de la tabla 4.

Tabla 4. Datos de entrada para los ejemplos

Parámetro	Valores		
	Ejemplo 1	Ejemplo 2	Ejemplo 3
ϕ , %	20	20	10
c_p , 1/psi	1x10-5	1x10-5	2x10-5
h , ft	20	20	100
k , md	300	300	200
μ , cp	0.5	0.5	2
B , rb/STB	1.2	1.2	1.35
r_w , ft	0.3	0.3	0.5
r , ft	150	150	225
q , BPD	500	500	300
C , bbl/psi	0.1	0	0
t_p , hr	300	300	200
Dtp , hr	200	200	400

La gráfica logarítmica de presión y derivada de presión versus tiempo se muestra en la figura 10. Se requiere caracterizar el reservorio utilizando el punto de intersección, el régimen de flujo radial y las líneas de pendiente unitaria negativa.

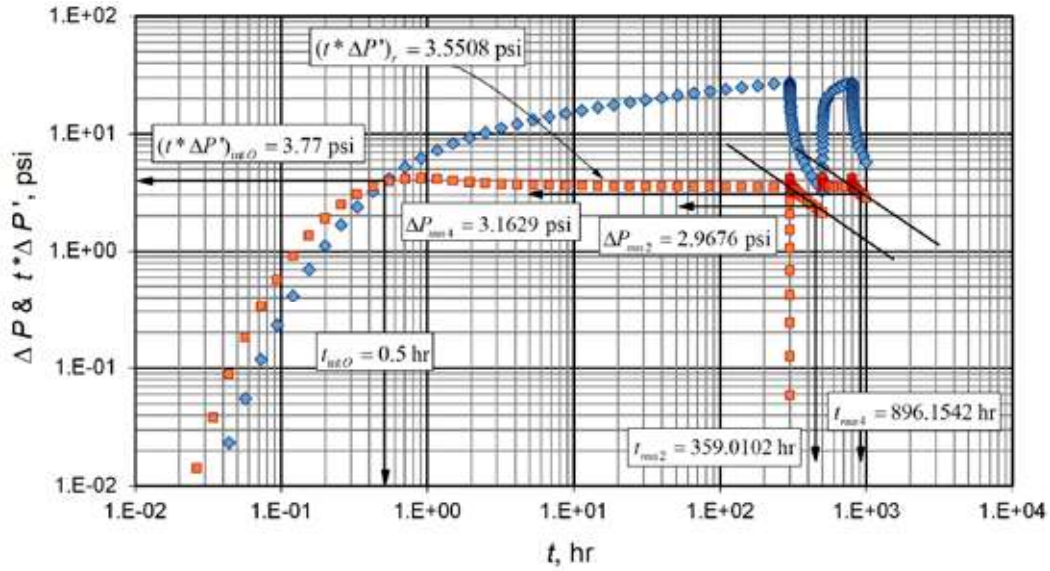


Figura 10. Gráfica logarítmica de presión y derivada de presión versus tiempo para el ejemplo 1.

Solución

La siguiente información se deriva de la figura 10:

$$\begin{aligned}
 (t^* \Delta P')_{intO} &= 3.77 \text{ psi} & t_{intO} &= 0.5 \text{ hr} & (t^* \Delta P')_r &= 3.5508 \text{ psi} \\
 \Delta P_{nus2} &= 2.9676 \text{ psi} & t_{nus2} &= 359.0102 \text{ hr} & \Delta P_{nus4} &= 3.1629 \text{ psi} \\
 t_{nus4} &= 896.1542 \text{ hr}
 \end{aligned}$$

El punto de intersección es corregido utilizando las ecuaciones 21 y 22:

$$\begin{aligned}
 (t^* \Delta P')_{int} &= \frac{0.325(3.77)}{0.4 + e^{1.07290474 + 0.776422265 * \ln[C_D/r_D^2]}} = 2.4 \text{ psi} \\
 t_{int} &= \frac{0.579(0.5)}{0.4 + e^{1.830074147 + 1.3217409 * [C_D r_D^2]^3 - 0.0717725314 * [\ln(0.1)]^2}} = 0.243 \text{ hr}
 \end{aligned}$$

La permeabilidad y la porosidad se estimaron utilizando las ecuaciones 13 y 14, respectivamente:

$$k = \frac{45.9246 q \mu B}{h(t^* \Delta P')_{int}} = \frac{45.9246(500)(0.5)(1.2)}{20(2.4)} = 287 \text{ md}$$

$$\phi = \frac{kt_{int}}{2198.92948\mu c_r r^2} = \frac{(244.3)(0.243)}{2198.92948(0.5)(1 \times 10^{-5})(150^2)} = 0.28 \quad (28)$$

La permeabilidad también se calcula con la ecuación 16 del régimen de flujo radial.

$$k = \frac{70.6q\mu B}{h(t^* \Delta P')_r} = \frac{70.6(500)(0.5)(1.2)}{20(3.5508)} = 298.24 \text{ md}$$

La permeabilidad se estima para los pulsos 2 y 4. Para un tiempo de flujo a una relación de cierre, R, de 1.5, el valor de α es igual a 0.45 para el segundo pulso y 0.15 para el cuarto pulso. La permeabilidad se estima con la ecuación 26 para pulsos segundo y cuarto, respectivamente:

$$k = \frac{70.6q\mu B}{h(t^* \Delta P')_r} = \frac{70.6(500)(0.5)(1.2)}{20(3.5508)} = 298.24 \text{ md}$$

$$k = \frac{141.2(500)(1.2)(0.5)(0.2477)(1.5)^{0.15}(200 + 300)}{20(3.1629)(896.1542)} = 292.6636 \text{ md}$$

Ejemplo sintético 2

Se simuló una prueba de pulso de presión con la información proporcionada en la tercera columna de la tabla 4. Este ejemplo es similar al ejemplo anterior, menos en el coeficiente de almacenamiento del pozo. En la figura 11 se proporciona el gráfico logarítmico de presión y derivada de presión versus tiempo. Se requiere caracterizar el yacimiento utilizando el punto de intersección, el régimen de flujo radial y las líneas de pendiente de unidad negativa.

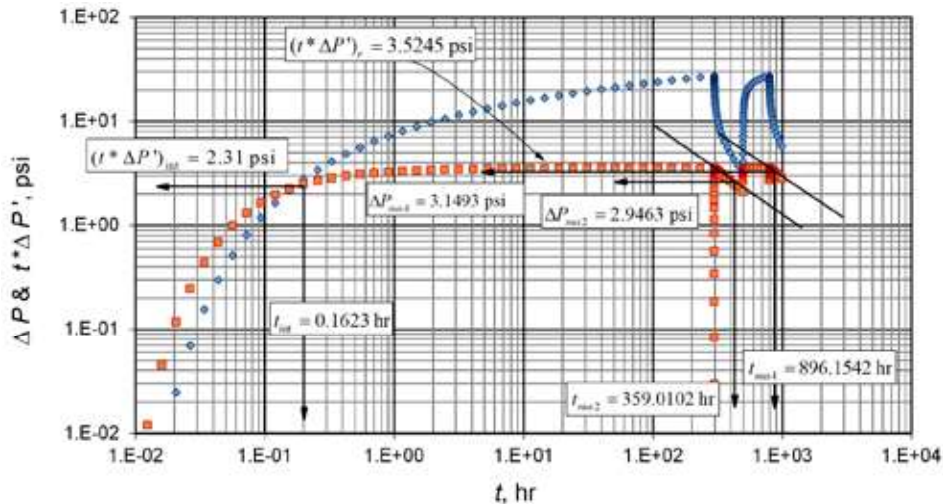


Figura 11. Gráfica logarítmica de presión y derivada de presión versus tiempo para el ejemplo 2.

Solución

La siguiente información se deriva de la figura 11:

$$\begin{aligned}
 (t^* \Delta P)_{int} &= 2.31 \text{ psi} & t_{int} &= 0.1623 \text{ hr} & (t^* \Delta P)_r &= 3.5245 \text{ psi} \\
 \Delta P_{nus2} &= 2.9463 \text{ psi} & t_{nus2} &= 359.0102 \text{ hr} & \Delta P_{nus4} &= 3.1493 \text{ psi} \\
 t_{nus4} &= 896.1542 \text{ hr}
 \end{aligned}$$

El resumen de los resultados se muestra en la tabla 5.

Tabla 5. Resumen de resultados para los ejemplos sintéticos 2 y 3

	Ejemplo 2	Ejemplo 3
Ecuación	k, md	
13	298.21	201.3910
15	300.4682	202.6794
26 (2 nd pulse)	297.6318	198.5401
26 (4 th pulse)	293.9275	200.8768
	ϕ	
14	0.1968	0.0993

Ejemplo sintético 3

Se simuló una prueba de pulso de presión con la información proporcionada en la cuarta columna de la tabla 4. En la figura 12 se representa el gráfico logarítmico de presión y derivada de presión versus tiempo. También se requiere estimar la caracterización del reservorio usando el punto de intersección, el régimen de flujo radial y las líneas de pendiente de unidad negativa.

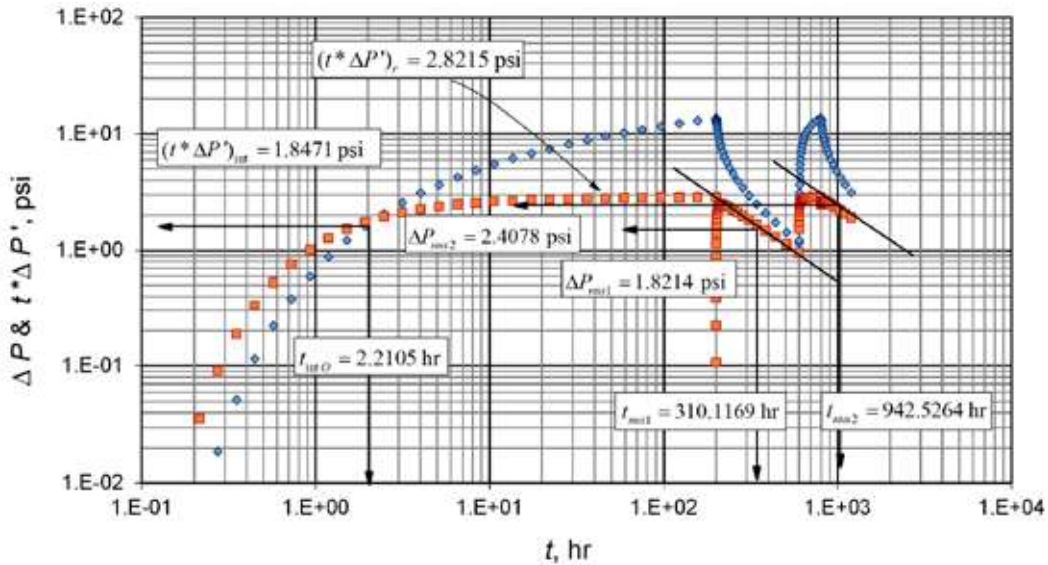


Figura 12. Gráfica logarítmica de presión y derivada de presión versus tiempo para el ejemplo 3.

Solución

La siguiente información se deriva de la figura 12:

$$\begin{aligned} (t^* \Delta P)_{int} &= 1.8471 \text{ psi} & t_{int} &= 2.2105 \text{ hr} & (t^* \Delta P)_r &= 2.8215 \text{ psi} \\ \Delta P_{nus2} &= 1.8214 \text{ psi} & t_{nus2} &= 310.1169 \text{ hr} & \Delta P_{nus4} &= 2.4078 \text{ psi} \\ t_{nus4} &= 942.5264 \text{ hr} & & & & \end{aligned}$$

Los resultados están resumidos en la tabla 5.

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los ejemplos 1 y 2 se simularon bajo las mismas condiciones, excepto el coeficiente de almacenamiento del pozo, con el propósito de verificar la precisión del punto de intersección formado por las curvas derivadas de presión y presión cuando el almacenamiento del pozo afecta dicho punto. Las coordenadas de dichos puntos son 0.1623 hr, 2.31 psi (del ejemplo 2). En el ejemplo 1, las coordenadas del punto de inflexión eran 0.5 h, 3.77 psi. Después de la corrección dada con las ecuaciones 21 y 22, las coordenadas del punto corregido fueron 0.243 h, 2.4 psi, lo que indica que la correlación tiene alguna desviación, aunque el coeficiente de correlación de las ecuaciones empíricas es mayor que 0.999. La permeabilidad del punto corregido proporcionó una desviación de subestimación absoluta del 4.3 % con respecto al valor real, mientras que la porosidad tuvo una desviación absoluta del 40 %. Sin embargo, los valores de permeabilidad encontrados a partir de las líneas negativas de la pendiente unitaria del segundo y cuarto pulso tienen valores de desviación inferiores al 2.5 %, lo que indica que el almacenamiento del pozo no afecta al segundo y cuarto pulso. Se puede observar en los ejemplos 2 y 3 que la ecuación que usa el punto de intersección formado por las curvas derivadas de presión y presión proporciona excelentes resultados cuando el almacenamiento del pozo no afecta el punto de intersección que se da para $C_D/r_D^2 > 0.0001$.

CONCLUSIONES

Se presentan nuevas expresiones para la interpretación de la prueba de presión. Estas ecuaciones se desarrollan con base a las características únicas que se encuentran en la gráfica de la relación derivada de la presión y la presión en función del tiempo y no utilizan ninguna tabla de lectura. La permeabilidad se estima utilizando el punto de intersección formado por la gráfica de derivadas de presión y presión; también se puede encontrar o verificar a partir de las expresiones obtenidas para una tendencia negativa de pendiente unitaria de la derivada de presión observada en los pulsos pares. Por razones prácticas, las expresiones se desarrollan solo para el segundo y cuarto pulso, ya que los pulsos posteriores son más cortos debido a la escala del registro y pueden no verse.

Ni el daño ni los efectos de almacenamiento del pozo activo tienen efectos sobre los pulsos pares, pero el almacenamiento del pozo afecta el punto de intersección de las curvas derivadas de presión y presión. A pesar de que las ecuaciones empíricas con coeficientes de correlación superiores a 0.999 se desarrollan para corregir el punto de intersección, el efecto no se elimina por completo y la permeabilidad se subestima ligeramente y la porosidad está muy sobreestimada. Entonces, cuando el almacenamiento del pozo afecta el punto de intersección del procedimiento de corrección, la permeabilidad se estima mejor a partir de las ecuaciones desarrolladas a partir de la pendiente negativa del segundo y cuarto pulso en la derivada de presión.

La metodología desarrollada aquí solo se aplica cuando se ve el punto de intersección. Si es así, solo ese punto es suficiente para encontrar la permeabilidad y la porosidad entre pozos. La estimación de la derivada de presión continua o superpuesta es opcional y se utiliza con fines de verificación.

ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS

Nomenclatura

A	Área de drenaje entre el pozo de observación y activo, ft ²
B	Factor volumétrico, rb/STB
C	Coefficiente de almacenamiento, bbl/psi
ct	Compresibilidad total, psi ⁻¹
h	Espesor del reservorio, ft
k	Permeabilidad horizontal, md
P	Presión, psi
P_i	Presión inicial, psi
q	Tasa de flujo líquida, BPD
R	Relación periodo de flujo con periodo de cierre
r	Distancia entre pozos, ft
r_w	Radio del pozo, ft
S	Parámetro de Laplace
s	Daño mecánico del pozo
t	Tiempo, hr
t_f	Periodo de flujo, hr
Δt_p	Periodo de cierre, hr
t_D	Tiempo adimensional
t_{Da}	Pseudotiempo adimensional
$t_D^*P_D'$	Derivada de presión adimensional
$t^*\Delta_p'$	Derivada de presión, psi

Símbolos griegos

α	Exponente definido en la tabla 2
β	Intersecto de la pendiente unitaria negativa Ec. 23
ϕ	Porosidad, fracción
μ	Viscosidad cp
$/$	Laplace

Sufijos

D	Adimensional
DA	Adimensional basado en área
e	Radio externo del reservorio
i	Inicial
int	Intercepto
$intO$	Intercepto observado

<i>nus</i>	Pendiente unitaria negativa
<i>pss</i>	Periodo de estado pseudoestable
<i>r</i>	Radial
<i>musi</i>	Intercepto de las líneas de flujo radial y pendiente negativa slope lines
<i>rpssi</i>	Intercepto de las líneas de flujo y estado pseudoestable (<i>pressure derivative lines</i>)
<i>wf</i>	Pozo fluyendo
<i>ws</i>	Estática de pozo

REFERENCIAS

- Brigham, W. (1970). Planning and analysis of pulse-tests. *Journal of Petroleum Technology*, 22(05), 618-624. doi:10.2118/2417-PA.
- Chu, W., Garcia-Rivera, J., y Raghavan, R. (1980). Analysis of interference test data influenced by wellbore storage and skin at the flowing well. *Journal of Petroleum Technology*, 32(1), 171-78. doi:10.2118/8029-PA.
- Da Prat, G., Ramey, H., y Cinco-Ley, H. (1982). A method to determine the permeability-thickness product for a naturally fractured reservoir. *Journal of Petroleum Technology*, 34(06), 1-364. doi:10.2118/9906-PA.
- Dinges, D., y Ogbe, D. (1988). A method for analyzing pulse tests considering wellbore storage and skin effects. *SPE Formation Evaluation*, 3(4), 743-750. doi:10.2118/15582-PA.
- Escobar, F., Cubillos, J., y Montealegre, M. (2008). Estimation of horizontal reservoir anisotropy without type-curve matching. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 60(1), 31-38. doi:10.1016/j.petrol.2007.05.003.
- Fokker, P., Borello, E., Verga, F., y Viberti, D. (2017, 12 de junio). Harmonic pulse testing for well and reservoir characterization. En Society of Petroleum Engineers, *SPE Europec featured at 79th EAGE Conference and Exhibition*. Conferencia realizada en París, Francia. doi:10.2118/185815-MS.
- Johnson, C., Greenkorn, R., y Woods, E. (1966). Pulse-Testing: A New Method for Describing Reservoir Flow Properties Between Wells. *Journal of Petroleum Technology*, 18(12), 1-599. doi:10.2118/1517-PA.
- Kamal, M. (1983). Interference and pulse testing-a review. *Journal of Petroleum Technology*, 35(12), 2257-2270. doi:10.2118/10042-PA.
- Ogbe, D., y Brigham, W. (1987). Pulse testing wellbore storage and skin effects. *SPE Formation Evaluation*, 2(01), 29-42. doi:10.2118/12780-PA.
- Ouandlous, A. (1999). *Interpretation of interference tests by Tiab's direct synthesis technique* (tesis de maestría). Universidad de Oklahoma, Oklahoma, EE. UU.
- Tiab, D. (1994). Analysis of pressure and pressure derivative without type-curve matching: vertically fractured wells in closed systems. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 11(4), 323-333. doi: 10.1016/0920-4105(94)90050-7

- Tiab, D. (1995). Analysis of pressure and pressure derivative without type-curve matching-skin and wellbore storage. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 12(3), 171-181. doi:10.1016/0920-4105(94)00040-B.
- Tongpenyai, Y., y Raghavan, R. (1981). The effect of wellbore storage and skin on interference test data. *Journal of Petroleum Technology*, 33(1), 151-160. doi:10.2118/8863-PA
- Vela, S., y McKinley, R. (1970). How areal heterogeneities affect pulse-test results. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 10(02), 181-191. doi:10.2118/2569-PA.
- Zenith, F., Foss, B., Tjønnås, J., y Hasan, A. (2015). Well Testing by Sinusoidal Stimulation. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 18(03), 441-451. doi:10.2118/174552-PA

METABOLITOS SECUNDARIOS DE ESPECIES DE LA FAMILIA LAURACEAE CON POTENCIAL USO COSMÉTICO PARA EL MEJORAMIENTO, PROTECCIÓN Y PRESERVACIÓN DE LA PIEL

SECONDARY METABOLITES OF LAURACEAE SPECIES AND ITS POTENTIAL USE IN COSMETIC FOR THE IMPROVEMENT, PROTECTION AND PRESERVATION OF THE SKIN

Luis Enrique Cuca Suarez*
Sonia Teresa González Acosta**

Recibido: 3 de agosto de 2018

Aceptado: 26 de noviembre de 2018

Resumen

En el país hay una gran variedad de especies pertenecientes a la familia Lauraceae, que es una de las familias más biodiversas de plantas. Estas especies presentan un gran potencial en la búsqueda de compuestos activos para el desarrollo de productos cosméticos. Actualmente los compuestos de origen natural tienen una alta demanda en la industria cosmética por sus características y la seguridad que ofrecen en su uso, en comparación con los de origen sintético. Este artículo de revisión trata sobre las propiedades cosméticas de esta familia, específicamente se tienen en cuenta cualidades de tipo antioxidante, antibacterial, control de la pigmentación y antiinflamatorias, en el que se reporta la actividad biológica encontrada para extractos y metabolitos secundarios extraídos de especies de esta familia.

Palabras clave: antibacterial, antiinflamatoria, antioxidante, cosméticos, despigmentante, Lauraceae.

Abstract

In the country there is a great variety of species belonging to the Lauraceae family, which is one of the most biodiverse families of plants. These present a great potential in the search for active compounds for the development of cosmetic products. At the moment the compounds of natural origin have a high demand in the cosmetic industry, for their characteristics and the security they offer in their use, in comparison with those of synthetic origin. This review article deals with

* Doctor en Ciencias Química. Coordinador Grupo de investigación en Productos Naturales Vegetales, Departamento de Química, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, D. C., Colombia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6535-326X>. lecucas@unal.edu.co

** Estudiante de Maestría en Ciencias Química. Laboratorio de Productos Naturales Vegetales, Departamento de Química, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, D. C., Colombia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5988-159X>. stgonzaleza@unal.edu.co

the cosmetic properties of this family, specifically, such as its antioxidant qualities, antibacterial, control pigmentation and anti-inflammatory function, in which biological activity is reported for extracts and secondary metabolites extracted from species of this family.

Keywords: antibacterial, anti-inflammatory, antioxidant type, Lauraceae, pigmentation control.

INTRODUCCIÓN

El hombre ha usado los recursos naturales para el cuidado de la piel y para mejorar su aspecto, basándose en los conocimientos tradicionales sobre los beneficios cosméticos que brindan las plantas. La industria cosmética actualmente obtiene provecho de estos conocimientos etnobotánicos, como es el caso de los aceites esenciales, que son un grupo importante de metabolitos secundarios, los cuales son usados en perfumes y jabones (González y Bravo, 2017).

El interés por mantener el buen estado y la salud de la piel ha generado un creciente uso de productos de origen natural en las formulaciones cosméticas, gracias a que estos productos en el mercado ofrecen seguridad y eficacia en términos de regenerar, cuidar y proteger la piel (Carrau, Gimeno, Ibáñez, Organero y Rey, 2010). La demanda actual de nuevos ingredientes para la industria cosmética abre un campo de interés en la investigación, acercando la ciencia a la medicina tradicional, lo que implica la identificación de la especie y el aislamiento de los metabolitos que produce la planta, pero no con el interés de sintetizarlos como se ha hecho hasta ahora; por el contrario, se busca que la nueva producción de metabolitos se haga de forma sustentable y amigable con el ambiente.

En el sector cosmético existe la preocupación por el uso sustentable de los productos naturales, ya que la sobreexplotación de la biodiversidad puede llevar a la extinción de las especies que se usan actualmente en la industria. Este es el caso del árbol amazónico *Aniba rosaeodora* (cuya madera proporciona aceite esencial comercial para casas de perfumería) que actualmente se encuentra en peligro de extinción, ya que ha sido explotado indiscriminadamente en selvas de Ecuador, Brasil, Perú y Colombia por su alto contenido de linalol (Sampaio, Maia, Parijós, Souza y Barata, 2012), lo que ha llevado a realizar la búsqueda de este aceite en otras especies y a reformular su método de extracción (Krainovic, de Almeida, da Veiga y Sampaio, 2018).

Colombia es el segundo país más biodiverso, con alrededor de 28 000 especies de plantas reportadas, entre las que se encuentran 10 375 plantas pertenecientes a la división *Magnoliophyta* o plantas con flor (Moreno, Rueda y Andrade, 2018). En esta división encontramos una de las familias más biodiversas de plantas, la familia Lauraceae, para la cual se ha evidenciado un aumento en los estudios de identificación de metabolitos secundarios y actividad biológica desde el año 2000 al primer semestre del 2018. Esto deja ver un gran potencial en la búsqueda de compuestos promisorios para el sector cosmético dentro de las especies de esta familia.

El Gobierno nacional estableció como objetivo estratégico y prioritario que para el año 2032 Colombia se convierta en líder americano en producción y exportación de productos cosméticos con base en ingredientes naturales, pues en la actualidad el país se posiciona en el quinto lugar de exportación de cosméticos y artículos de aseo a nivel de Latinoamérica (Moreno, 2010; "Industria cosmética y de aseo", 2018).

El objetivo de esta revisión es recopilar información sobre algunas propiedades de importancia en el campo cosmético, como son: antioxidante, antibacterial, control de la pigmentación y antiinflamatoria, que se hayan estudiado para especies de esta familia; igualmente, reportar la actividad biológica encontrada para extractos y metabolitos secundarios extraídos de especies pertenecientes

a la familia Lauraceae. Esta revisión propone incentivar el desarrollo de futuras investigaciones que, además de la identificación de metabolitos secundarios, puedan generar las pruebas de toxicidad necesarias para su aplicación en cosméticos, sin dejar de lado que su producción se realice mediante cultivos de plantas agronómicas no alimentarias, las cuales puedan cosecharse para realizar la extracción de los metabolitos que sean de interés, sin generar daño a la especie, así como lo plantea el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (2009).

METODOLOGÍA

Se elaboró una revisión bibliográfica de forma sistemática y estructurada en diferentes bases de datos, Science Direct, Scielo, SciFinder, Scopus, Springerlink, PubMed y Google scholar, en las cuales se buscó y filtró información sobre actividades de importancia o promisorias en el campo cosmético, como son las propiedades de tipo antioxidante, antiinflamatoria, antiséptica y control de pigmentación. La base de datos Scopus brinda de forma inmediata registros estadísticos sobre el tipo de búsqueda y el número de publicaciones. En este caso, para el motor de búsqueda “Lauraceae en todos los campos” se observa un aumento del 25 % de las publicaciones correspondientes a “familia Lauraceae” desde el año 2000, con respecto a los años noventa, con un máximo de 190 publicaciones en el año 2017, lo que evidencia que hay un gran número de estudios enfocados sobre esta familia.

También se encontró que esta familia es muy prometedora para la investigación en campos como la agricultura, bioquímica y farmacología, en esta última se incluye toxicología y farmacéuticos, por tal razón se contempla esta revisión desde el año 2000 hasta el primer semestre del 2018, y aunque en campos como la agricultura se obtiene un mayor registro de publicaciones, es de interés visualizar otro campo de acción que sea innovador para futuras investigaciones dentro de los productos naturales, como lo es la industria cosmética.

DESARROLLO DE TEMA

El daño ambiental por el que atraviesa el planeta, la sobreexplotación de la biodiversidad y la necesidad de generar procesos que sean sustentables y responsables con el ambiente han generado la idea de “volver a lo natural”. Asimismo se evidencia un aumento en la cantidad de consumidores que demandan este tipo de productos, y la industria cosmética no ha sido ajena a estas necesidades (Tundis, Loizzo, Bonesi y Menichini, 2015). Por esta razón algunas compañías se han enfocado en utilizar como materia prima los extractos de plantas y algunos metabolitos secundarios obtenidos de estas, como, por ejemplo, los aceites esenciales para elaborar productos cosméticos. La principal ventaja de usar este tipo de productos es que no suelen generar (en concentraciones muy bajas) reacciones alérgicas en la piel o efectos secundarios a largo plazo, es decir, no se consideran perjudiciales para la piel y el medio ambiente, a diferencia de los productos de origen sintético que con el tiempo pueden llegar a generar este tipo de inconvenientes (Ferraro, Martino, Bandoni y Nadinic, 2015).

Hay que tener en cuenta que los productos naturales suelen presentar compuestos inestables, que pueden sufrir oxidación o reaccionar con otros componentes cuando se tratan de incorporar en una formulación (Armendáriz, Álvarez y Galindo, 2016), por lo que es importante realizar una muy buena preformulación y formulación del cosmético, para evitar algún problema posterior.

A nivel nacional, casas cosméticas como Ana María, utilizan en sus productos cosméticos extractos de caléndula, pepino, romero, aloe vera, cera de abejas y lanolina. A nivel internacional, Natura, que es una casa cosmética brasilera, comercializa algunos productos basados en la explotación comercial de *Cyperus articulatus* Benth (Ciperaceae), semillas de *Dipteryx odorata* (Fabaceae)

y resina de *Protium pallidum* Cuatrec (Burseraceae), en asociación con comunidades de pequeños productores de Pará y Amapá. Compañías internacionales en las áreas de perfumes y cosméticos, como Firmenich, Givaudan, y Dragoco, han mostrado un gran interés en la compra de nuevos aceites esenciales producidos localmente, aunque sin la intención de invertir en la producción (Maia y Andrade, 2009).

Ante este auge es importante aumentar el conocimiento sobre la biodiversidad que tiene el país, trabajar mancomunadamente con la comunidad y desarrollar condiciones óptimas que permitan el uso sostenible de las diferentes especies de la familia Lauraceae para fines cosméticos.

Cosméticos

Los cosméticos se han usado desde la antigüedad, ya sea como maquillaje corporal, en el cuidado del cabello o como perfumes; usos que generalmente estaban relacionados a prácticas mágico-religiosas y/o al estatus social. En la cultura egipcia, por ejemplo, se usaban polvos para blanquear la cara y una máscara negra llamada kohl (fabricaba con galena [PbS]) para perfilar los ojos (Martínez y Laguna, 2014). Es decir que los cosméticos siempre han estado al servicio de la humanidad, ya sea para maquillar o conservar la piel.

¿Pero que es un cosmético? En el 2002, la Comunidad Andina, con el fin de armonizar las legislaciones internas de los países miembros en materia de productos cosméticos y salvaguardar la salud pública, definió los cosméticos como:

Se entenderá por producto cosmético toda sustancia o formulación de aplicación local a ser usada en las diversas partes superficiales del cuerpo humano: epidermis, sistema piloso y capilar, uñas, labios y órganos genitales externos o en los dientes y las mucosas bucales, con el fin de limpiarlos, perfumarlos, modificar su aspecto y protegerlos o mantenerlos en buen estado y prevenir o corregir los olores corporales. (Decisión 516 de 2002, art.1)

Ingredientes naturales para uso en cosméticos

La totalidad de la planta es aprovechable en la búsqueda de ingredientes naturales para el desarrollo de cosméticos. Frutos, flores, hojas, corteza y raíces se usan en la extracción de metabolitos secundarios y otros compuestos que pueden ser usados en la elaboración de este tipo de productos.

Dentro de los componentes que se pueden integrar a las formulaciones de los diferentes tipos de cosméticos se encuentran los extractos de plantas, metabolitos secundarios, aceites esenciales, aceites vegetales, oleorresinas, colorantes, sabia, grasas, ceras, gomas y fragancias, los cuales pueden ser usados por la industria cosmética como principios activos, excipientes, estabilizantes o correctores (fragancias y colorantes).

Aspectos generales de la familia Lauraceae

La familia Lauraceae es la mayor familia de angiospermas, pertenece al orden Laurales dentro de la división Magnoliophyta. Se encuentra dentro de las cinco familias con mayor representación en cuanto al número de especies, aproximadamente 68 géneros y entre 3000-3500 especies, las cuales se encuentran distribuidas en las latitudes tropicales y subtropicales, con grandes centros de dispersión en el sudeste de Asia, Madagascar, América Central y América del Sur (Delgado, 2017).

En Colombia se reconocen aproximadamente 18 de los 68 géneros existentes a nivel mundial (Madriñan, 2015), representados por aproximadamente 236 especies, las cuales se encuentran distribuidas ampliamente por los bosques del territorio nacional. En la tabla 1 se muestra la distribución por géneros de la familia Lauraceae reportados en Colombia. Se observa que los

géneros *Ocotea*, *Endlicheria*, *Nectandra*, *Aniba* y *Persea* son los más representativos en el territorio colombiano en cuanto al número de especies, con 72, 45, 34, 23 y 19, respectivamente (Bernal, Gradstein y Celis, 2015).

Tabla 1. Géneros de la familia Lauraceae en Colombia.

Género	Laboratorio de Botánica y Sistemática	Catálogo de plantas y líquenes de Colombia
<i>Aiovea</i>	6	7
<i>Anaueria</i>	1	1
<i>Aniba</i>	23	20
<i>Beilschmiedia</i>	6	5
<i>Caryodaphnopsis</i>	5	4
<i>Cassytha</i>	1	1
<i>Chlorocardium</i>	1	1
<i>Cinnamomun</i>	1	3
<i>Cryptocarya</i>	1	-
<i>Endlicheria</i>	45	41
<i>Licaria</i>	9	16
<i>Mezilaurus</i>	4	4
<i>Nectandra</i>	34	28
<i>Ocotea</i>	60	75
<i>Persea</i>	17	19
<i>Pleurothyrium</i>	11	16
<i>Rhodostemonodaphne</i>	10	13
<i>Williamodendron</i>	1	1

Dentro de esta familia se han encontrado especies de gran importancia como la *Persea americana*, que es el quinto fruto tropical más importante en términos de área cultivada (Vega, 2012). De su fruto (el aguacate) se extraen ácidos grasos saturados como el ácido mirístico, el ácido palmítico y el ácido esteárico, de gran uso a nivel cosmético por su rápida absorción y su capacidad de protección (Dreher y Davenport, 2013; Ruiz, Arias y Gallardo, 2010). De la *Ocotea quixos* se aislaron dos compuestos, el trans-cinamaldehído y el cinamato de metilo, a los que se les atribuyen propiedades antioxidantes y antimicrobianas (Ballabeni et ál., 2010). En los tallos de la especie *Cinnamomun subavenium* se encontraron agentes blanqueadores de la piel, es decir, que poseen capacidad inhibitoria de la pigmentación a bajas concentraciones (Wang, Chen y Wen, 2011). Esencias muy utilizadas en perfumería y aromaterapia son extraídas de especies como *Aniba roseaodora*, *Cinnamomun camphora*, *Sassafras albidum* y *Ocotea quixos* (Herrera, Barbosa y Gomes, 2010). Estos ejemplos evidencian la importancia económica y el potencial de esta familia en cuanto a la actividad biológica que presentan sus especies para ser usadas en formulaciones de tipo cosmético.

Morfología

La familia Lauraceae se encuentra representada en su mayoría por árboles, a veces arbustos, raramente trepadoras (como el género *Cassytha*). Los árboles, comúnmente grandes, presentan corteza lisa, que al ser cortada libera un olor fuerte a aceites esenciales, que según la especie varía de dulce a fétido. La madera es de color blanca o amarilla. Sus hojas son usualmente alternas, espiraladas,

a veces opuestas (como *Cinnamomum caryodaphnopsis*), simples, usualmente aromáticas al ser es-trujadas; margen de lámina entera, comúnmente con puntos traslúcidos y con venación secundaria (Chanderbali, Werff y Renner, 2001; Delgado 2017).

Las inflorescencias son generalmente axilares, usualmente compuestas con una o pocas flores pequeñas, de color verde claro crema, blancas o amarillas, las cuales pueden ser bisexuales o unisexuales y trímeras. El fruto tiene forma subsférica a elipsoidal, tipo baya con cúpula leñosa a carnosa alrededor del fruto completo o solo en la base (aspecto de bellota), frecuentemente coloreados, o bien como drupa, con un pericarpo carnoso con una semilla (Rohwer, 2000).

Usos tradicionales

La familia Lauraceae reporta una gran variedad de usos etnobotánicos que provienen de la medicina tradicional, en la que se usan diferentes partes de las plantas en forma de infusión o maceración. Por ejemplo, de las especies *Cinnamomum glanduliferum*, *Cinnamomum camphora* y *Nectandra angustifolia* se usa un linimento para hacer masajes que alivian dolores y bajan las inflamaciones; el extracto de hojas de *Ocotea odorifera* se utiliza en el tratamiento de enfermedades de la piel (Yamaguchi, Veiga, do Nascimento, de Vasconcellos y Lima, 2013); el fruto y el aceite de *Persea americana* Miller se usan para fortificar el cabello y como ungüento para calmar el dolor y suavizar los tejidos en la gota (Rozo, 2015); los nativos de la región de Caparrapí emplean el aceite de *Ocotea caparrapi* Dugand para curar picaduras de insectos, o como “contra” para mordedura de serpientes venenosas y la picadura de la raya (Rozo, 2015); la pasta de la hoja de *Litsea glutinosa* se usa en enfermedades respiratorias y como emoliente (Pradeepa et ál., 2011). Como se puede apreciar, son varios los usos que se le han dado a esta familia y de los cuales en algunos casos ya se han comprobado científicamente.

Fitoquímica

Los estudios fitoquímicos adelantados en diversas especies de esta familia han permitido confirmar algunas de estas actividades y también aislar e identificar un gran número de metabolitos secundarios, principalmente de tipo lignano, neolignano, chalconas, alcaloides (Coy y Cuca, 2007), alcaloides aporfínicos (Pabón y Cuca, 2010), terpenos y sesquiterpenos (que forman parte de los aceites esenciales) (Gil, 2016), flavonoides (Liu et ál., 2013) y butanólidos (Pan et ál., 2010), principalmente. A continuación se presentan algunos de los metabolitos secundarios obtenidos de las especies de la familia Lauraceae, para los que se ha encontrado actividad de interés cosmético.

RESULTADOS

Actividad antioxidante

Los antioxidantes son compuestos que pueden inhibir o retardar la oxidación de otras moléculas, impidiendo la iniciación y/o propagación de las reacciones en cadena de los radicales libres. En la actualidad existe un mayor interés por los antioxidantes fitoquímicos, dentro de los cuales podemos encontrar compuestos fenólicos (tocoferoles, flavonoides y ácidos fenólicos), compuestos nitrogenados (alcaloides, derivados de la clorofila, aminoácidos y aminos) o carotenoides, así como el ácido ascórbico (Muñoz y Gutiérrez, 2010), los cuales son capaces de neutralizar los radicales libres y proteger a las células de un posible daño, como lo es el envejecimiento prematuro. A partir de estos antioxidantes se podrían desarrollar productos cosméticos para este fin.

Dentro de los estudios de actividad antioxidante para algunos géneros de la familia Lauraceae, se encontraron tres alcaloides aporfínicos aislados de *Lindera angustifolia*, norisocoridina, boldina

y norboldina (ver figura 1), los cuales mostraron notables efectos de captación de radicales por el método del 2,2-difenil-1-picrilhidrazilo (DPPH), con una concentración media efectiva (EC50) de 14.1 µg/mL, 18.4 µg/mL y 21.8 µg/mL, respectivamente (Zhao, Zhao y Wang, 2006).

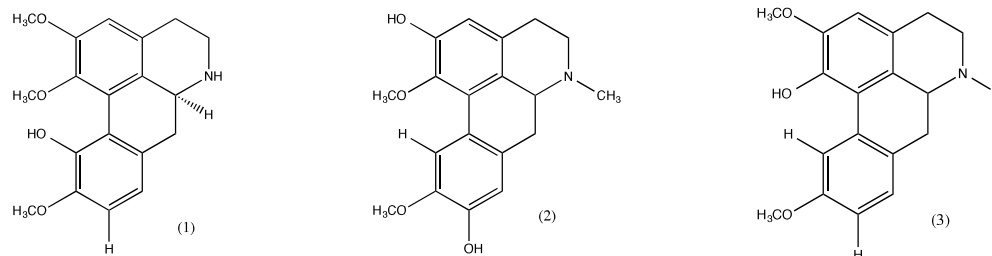


Figura 1. Metabolitos secundarios con actividad antioxidante: norisocoridina (1), boldina (2) y norboldina (3).

De la *Aniba riparia* se obtuvo el riparin A (ver figura 2), un alcaloide tipo alcanida, para el cual se obtuvo una capacidad antioxidante de EC50 de 296.2 µg /mL; por su parte, mediante la prueba 2,2-azino-bis-(3-etilbenzotiazolin-6-sulfónico) (ABTS) se obtuvo una concentración media efectiva de EC50 de 450.1 µg/ mL (Araújo et ál., 2016). De forma similar se determinó la capacidad antioxidante para el extracto de madera y para el aceite esencial extraído de las hojas de *Aniba canelilla*, en el que la actividad de captación de radicales (DPPH) de los aceites fue baja (EC50 de 198.17 ± 1.95 µg /mL), en comparación con la del extracto de metanol de la madera, en el que se observa una alta capacidad antioxidante (EC50 4.41 ± 0.12 µg/mL) (da Silva, Sousa, Andrade y Maia, 2007).

Otro estudio similar trabajó con 20 extractos metanólicos de ramas y hojas para evaluar su actividad antioxidante por DPPH. Entre los géneros trabajados se encontraban: *Aniba*, *Endlicheria*, *Licaria*, *Mezilaurus*, *Ocotea*, *Pleurothyrium* y *Rhodostemonodaphne*, en los que se observó mayor actividad antioxidante para los extractos de *Endlicheria sericeae* (EC50 9.77 µg.mL⁻¹), *Licaria martiniana* (EC50 6.96 µg.mL⁻¹, ramas), *Mezilaurus itauba* (EC50 de 10.74 µg.mL⁻¹, hojas) y *Ocotea minor* (EC50 8.21 µg.mL⁻¹, hojas, y 9.08 µg.mL⁻¹, ramas) (Veiga, Yamaguchi y Alcántara, 2012).

De los aceites esenciales extraídos de ramas y hojas de la especie *Endlicheria citriodora* se obtuvo un alto potencial antioxidante, con un EC50 de 15.52 y 13.53 µg/ mL, identificando el geranato de metilo (ver figura 2) como el constituyente principal (93 %) de estos aceites (Yamaguchi et ál., 2013).

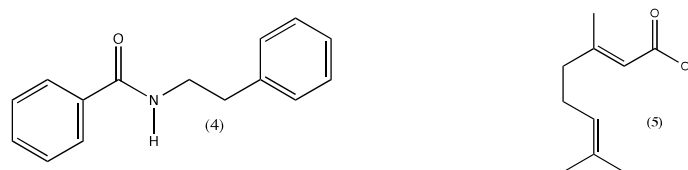


Figura 2. Metabolitos secundarios con actividad antioxidante: riparin A (4) y geranato de metilo (5).

Se aisló kunstlerone (ver figura 3) de la corteza del tallo de *Beilschmiedia madang*. Este compuesto mostró una actividad de captación de radicales DPPH muy fuerte, con una concentración media inhibitoria de (IC50) de 68.7 mM (Salleh, Ahmad, Yen, Zulkifli y Sarker, 2016). Dos nuevos alcaloides de fenantreno, beilschglabrinés A y B (ver figura 3), que se aislaron de la corteza del

tallo de *Beilschmiedia glabra*, fueron probados para la eliminación de radicales DPPH. Se encontró para beilschglabrin A una buena actividad antioxidante (IC₅₀ 115.9 mM) (Ahmad et ál., 2016)

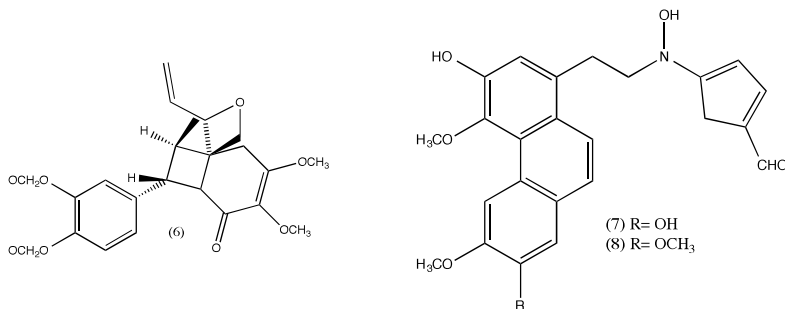


Figura 3. Metabolitos secundarios con actividad antioxidante: kunstlerone (6), beilschglabrin A (7) y B (8).

Para el extracto metanólico de *Cassytha filiformis*, la actividad antioxidante se estimó utilizando DPPH y se encontró que este presenta una fuerte actividad antioxidante, cuyo valor fue IC₅₀ 14 mg/mL (Raj, Singh, Samual, John y Siddiqua, 2013). En cinco especies de *Cinnamomum*, *C. burmanni*, *C. cassia*, *C. pauciflorum*, *C. tamala* y *C. zeylanica*, se realizó un estudio antioxidante para los extractos de hojas, encontrando que *Cinnamomum zeylanica* exhibió el mayor contenido fenólico total y mayor actividad antioxidante CE₅₀ 92.1±0.06 µg.mL⁻¹ (Prasad et ál., 2009).

Del aceite esencial de la corteza de *Cinnamomum altissimum* Kosterm se caracterizaron como componentes mayoritarios linalool (36.0 %), eugenol de metilo (12.8 %), limoneno (8.3 %), a-terpineol (7.8 %) y terpinen-4-ol (6.4 %) (ver figura 4), encontrando que el aceite muestra una buena actividad antioxidante, con un valor de IC₅₀ de 38,5 ± 4,72 µg.mL⁻¹ (Abdelwahab et ál., 2017)

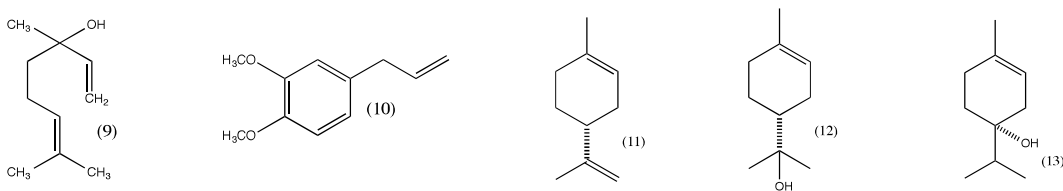


Figura 4. Metabolitos secundarios con actividad antioxidante: el linalool (9), eugenol de metilo (10), limoneno (11), a-terpineol (12) y terpinen-4-ol (13).

Para el aguacate variedad Hass, que es el fruto de la especie *Persea americana* Mill, se realizó la evaluación de la actividad antioxidante por dos métodos químicos DPPH y ferric reducing/antioxidant power (FRAP), y por dos métodos biológicos, inhibición de oxidación de lipoproteínas de baja densidad (LDL) y por curvas de crecimiento de levaduras, obteniendo muy buenos resultados para DPPH, con un IC₅₀ de 165.10 5 ± 4.36 mM. En el ensayo de inhibición del estrés oxidativo sobre el crecimiento de *S. cerevisiae* el extracto de aguacate obtuvo el mayor efecto protector, con una concentración celular de 1.96 × 10⁷ cells/mL (Moreno, Ortiz y Restrepo, 2014). Para esta misma variedad se evaluó el contenido fenólico total y la capacidad antioxidante para la pulpa, la cáscara y la semilla, encontrando que la cáscara y la semilla poseen mayor contenido fenólico total. Por el método de captura del radical ABTS se evaluó la capacidad antioxidante, en el que cáscara y semilla presentaron las mayores actividades antioxidantes, equivalente al análogo soluble de vitamina E (Trolox) (791.5 µmol TEAC / g y 645.8 µmol TEAC / g), en comparación con la pulpa (15.2 µmol TEAC/ g) (Daiuto, Tremocoldi, Alencar, Vieites y Minarelli, 2014).

De las hojas de *Laurus nobilis* se extrajeron e identificaron dos ácidos fenólicos, ácido cumárico y ácido 2-hidroxicinámico (ver figura 5). Para el extracto se evaluó la actividad antioxidante por dos métodos, obteniendo en DPPH un IC50 de 94.73 ± 0.49 mM y un porcentaje de inhibición de 73.55 ± 1.91 % para la inhibición de la oxidación de los lípidos mediante la peroxidación del ácido linoleico. Lo que demuestra que el *L. nobilis* puede ser considerado una buena fuente de antioxidantes (Muñiz et ál., 2013).

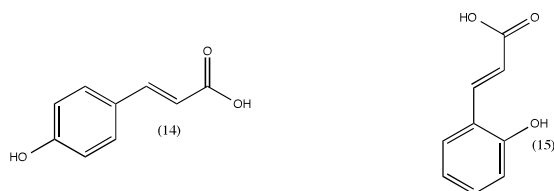


Figura 5. Metabolitos secundarios con actividad antioxidante: ácido cumárico (14) y ácido 2- hidroxicinámico (15).

Del extracto etanólico de las hojas de *Nectandra grandiflora* se realizó un fraccionamiento guiado por bioensayo, el cual condujo al aislamiento del ácido protocatecuico y de dos flavonoides glicosilados, afzelina y quercetrina (ver figura 6), que mostraron actividad de captación de radicales libres hacia el DPPH del 16 y 73 % a $50 \mu\text{mol L}^{-1}$; estos se compararon con antioxidantes comerciales como la rutina con 81 % a $50 \mu\text{mol L}^{-1}$ y butil hidroxitolueno (BHT) (9 % a $50 \mu\text{mol L}^{-1}$), evidenciando una muy buena actividad captadora de radicales libres (Ribeiro et ál., 2005).

En el aceite esencial de la *Ocotea* sp. se encontraron como principales constituyentes el α -pineno (42 %), p-cimeno (14.6 %), β -pineno (12.7 %) (ver figura 6). La actividad antioxidante que se reporta para este aceite esencial muestra una efectiva reducción en la concentración de DPPH con un IC50 31.1 mg/ml (Oliveiro, González, Güette, Jaramillo y Stashenko, 2010).

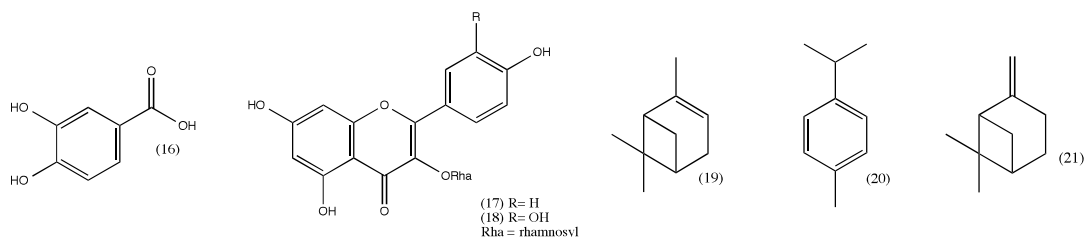


Figura 6. Metabolitos secundarios con actividad antioxidante: ácido protocatecuico (16), afzelina (17), quercetrina (18), α -pineno (19), p-cimeno (20) y β -pineno (21)

Según los estudios realizados, los antioxidantes de origen natural podrían presentar beneficios como potenciales compuestos antienviejecimiento. Se ha encontrado también que estos incrementan las actividades anticancerígena y antimicrobiana (Costa y Santos, 2017), lo cual favorecería su uso en productos cosméticos, ya sea como principios activos o como conservantes, debido a que pueden evitar la oxidación de los lípidos presentes en los cosméticos.

Agentes aclaradores de la piel

Los agentes aclaradores, también conocidos como despigmentantes, son productos cosméticos cuya función es corregir manchas cutáneas que aparecen en la piel con el paso del tiempo, por la acumulación de melanina o debido a factores como la exposición solar o el embarazo (Lemmel, 2002).

Se han realizado investigaciones en la búsqueda de posibles metabolitos secundarios con potencial despigmentante o con efecto blanqueador en la piel. Dentro de los que se encuentran la evaluación de los efectos de los inhibidores de la pigmentación de la piel con sistemas *in vitro* e *in vivo* para encontrar agentes de blanqueamiento de la piel sin problemas citotóxicos. De los tallos de *Cinnamomum subavenium* se aislaron linderanolide B y subamolida A (ver figura 7), los cuales mostraron inhibición de la enzima tirosinasa a bajas concentraciones y estuvieron libres de citotoxicidad en células de la piel humana. Con ayuda de acoplamiento molecular, en un modelo virtual de tirosinasa humana, linderanolide B y subamolida A mostraron inhibición de esta enzima (Wang et ál., 2011).

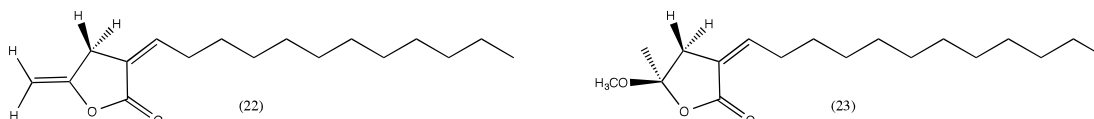


Figura 7. Metabolitos secundarios con acción aclaradora de la piel: linderanolide B (22) y subamolida A (23).

En los aceites esenciales extraídos de ramas y hojas de la especie *Endlicheria citriodora* se caracterizaron la citotoxicidad y la inhibición de la tirosinasa, mostrando baja citotoxicidad e inhibición de tirosinasa en (53.85 %). Se identificó el geranato de metilo (ver figura 2) como el constituyente principal (93 %) (Yamaguchi et ál., 2013) de estos aceites.

Los compuestos cinamaldehido, casiferaldehido, ácido o-cumárico y dihidrocinacaside (ver figura 8), aislados del extracto metanólico de ramas de la especie *Cinnamomum cassia*, mostraron fuerte actividad inhibitoria contra la tirosinasa, con valores de CI_{50} que varían de 0.24 a 0.94 mM (Tngoc et ál., 2009). Para el aceite esencial de *Beilschmiedia madang* se evaluó su actividad antitirosinasa. Los resultados mostraron que el aceite de hoja dio un porcentaje significativo de inhibición para la tirosinasa (53.1 %) comparado con el ácido kójico (84 %) (Salleh, Ahmad y Yen, 2015).

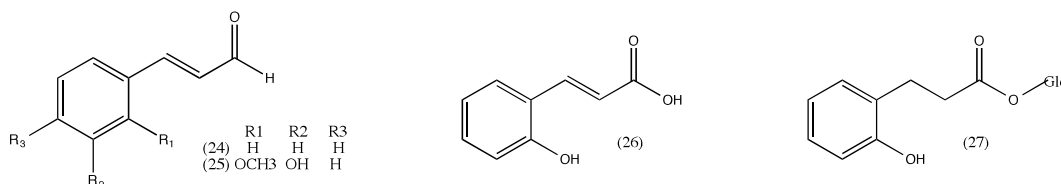


Figura 8. Metabolitos secundarios con acción aclaradora de la piel: cinamaldehido (24), casiferaldehido (25), ácido o-cumárico (26) y dihidrocinacaside (27).

Los anteriores metabolitos secundarios presentan un potencial como reductores de la pigmentación cutánea mediante la inhibición de la tirosinasa, específicamente como inactivadores en la formación de esta, ya que es la enzima limitante de la velocidad en la síntesis de los pigmentos de melanina.

Actividad antibacterial

La actividad antibacterial es de gran importancia en la búsqueda de productos que tengan una acción antiséptica que sea capaz de proteger la piel de posibles daños y eliminar virus y bacterias. Uno de los géneros que presenta esta actividad es el género *Cinnamomun* para el cual se reportan varios estudios.

Para el aceite esencial de las hojas de *Cinnamomum osmophloeum* se probó esta propiedad contra nueve cepas de bacterias. Dentro de los componentes principales se encuentra el cinamaldehído (ver figura 8), que obtuvo la actividad antibacteriana más fuerte en comparación con los otros componentes del aceite esencial, con concentraciones mínimas inhibitorias (CMI) para *E. coli*, *P. aeruginosa*, *E. faecalis*, *S. aureus*, *S. epidermidis*, *E. aureus*, *K. pneumoniae*, *Salmonella* sp. y *V. parahaemolyticus* de 500, 1000, 250, 250, 250, 250, 1000, 500 y 250 $\mu\text{g/mL}$, respectivamente, resultados que sugieren que el aceite esencial de hoja de *C. osmophloeum* y el cinamaldehído son beneficiosos para la salud humana (Chang, Chen y Chang, 2001).

Un estudio similar se encontró para *Cinnamomum verum* J. S. Pres. y *Cinnamomum cassia* Blume, con las que se realizaron los ensayos para los aceites esenciales y para el cinamaldehído puro, encontrando que tanto el aceite como el cinamaldehído puro de *C. cassia* fueron igualmente efectivos para inhibir el crecimiento de una bacteria Gram-positiva, siete Gram-negativas y para dermatofitos, con CMI de 75 $\mu\text{g/mL}$ a 600 $\mu\text{g/mL}$ (Ooi et ál., 2006). Dentro del género *Cinnamomum* la mayoría de los aceites esenciales se caracteriza por la presencia de eugenol (ver figura 9), el cual es un compuesto bioactivo muy interesante con amplio espectro antimicrobiano, pero que al ser una sustancia muy volátil y con baja estabilidad química necesita nuevos mecanismos para ponerlo en emulsiones y mejorar su permeación (Marchese et ál., 2017; Majeed et ál., 2016). Para el aceite esencial de *Cinnamomum zeylanicum* se han realizado varios estudios, en los que se encontró que presenta un alto efecto antimicrobiano, el cual podría tener aplicaciones a nivel de conservación de alimentos y en farmacéuticos (Montero, Revelo, Avilés, Valle y Guevara, 2017; Barrueto y Padova, 2014; Joshi, Lekhak y Sharma, 2009; Unlu, Ergene, Unlu, Zeytinoglu y Vural, 2010).

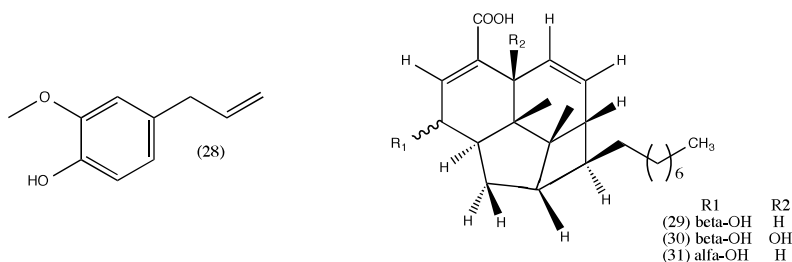


Figura 9. Metabolitos secundarios con actividad antibacterial: eugenol (28), ácidos beilsmídicos A (29), B (30) y C (31)

A partir de la corteza del tallo de *Beilschmiedia anacardioides* se aislaron tres derivados del ácido endiátrico, los ácidos beilsmídicos A, B y C (ver figura 9), junto con b-sitosterol. Las actividades antibacterianas (contra cinco cepas de microbios) de los compuestos A, B y C se evaluaron *in vitro*. El compuesto C mostró una fuerte actividad contra *Bacillus subtilis*, *Micrococcus luteus* y *Streptococcus faecalis* (CMI por debajo de 23 μM) (Chouna et al., 2009). Este compuesto fue más activo que la ampicilina, que era la referencia.

Del aceite esencial de *Nectandra megapotamica* se aislaron cinco sesquiterpenoides, de los que se determinó la actividad antimicrobiana de los compuestos puros. Los compuestos 1 y 2 (ver figura 10) mostraron ser prometedores antibacterianos (CMI 3.12 a 25.0 $\mu\text{g mL}^{-1}$) en comparación con cloranfenicol para bacterias con CMI 3.12 $\mu\text{g mL}^{-1}$ (Oliveira et ál., 2017). Para *Ocotea quixos* se evaluó la actividad antibacteriana del aceite esencial contra cepas Gram-positivas (*Enterococcus faecalis*, *Staphylococcus aureus*) y Gram-negativas (*Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa*). Con (CMI de 0.049 a 0.12 mg/ml) (Bruni et ál., 2004).



Figura 10. Metabolitos secundarios con actividad antibacterial: compuestos 1 (32) y 2 (33).

Actividad antiinflamatoria

En estos metabolitos en los que se ha encontrado actividad antiinflamatoria se espera que actúen previniendo o disminuyendo la producción de sustancias en el organismo que estimulan la inflamación de los tejidos.

De *Aniba riparia* se extrajo riparin A (ver figura 11), para el cual se evaluó esta propiedad y se encontró que reduce la respuesta inflamatoria mediante la inhibición de eventos vasculares y celulares, inhibiendo la producción de citosinas proinflamatorias y reduciendo el estrés oxidativo (Silva et ál., 2015). De la corteza del tallo de *Beilschmiedia madang* se aislaron dos nuevos neolignan, madangones A y B (ver figura 11), para los cuales se probó la actividad antiinflamatoria, en donde el compuesto B exhibió el nivel más alto de actividad utilizando el modelo Ciclooxygenasa 2 (COX-2) con CMI 27.4 μM (Salleh et ál., 2016).

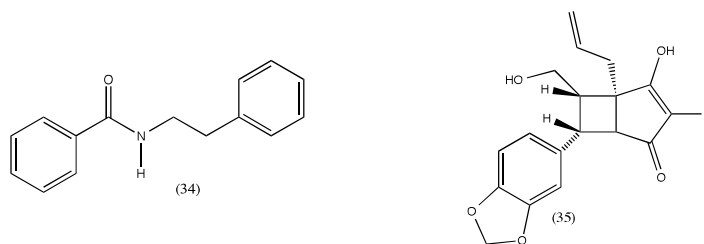


Figura 11. Metabolitos secundarios con actividad antiinflamatoria: riparin A(34), madangones B (35)

Se evaluó la propiedad antiinflamatoria para el aceite esencial de las ramas de *Cinnamomum cassia*, este aceite disminuyó los niveles de citoquinas y (COX-2) en el tejido de piel de la pata de ratones inducidos por carragenina (Sun et ál., 2016). Estos metabolitos, que han presentado una actividad significativa, podrían llegar a beneficiar a los seres humanos en la medida en que contrarrestan procesos inflamatorios, por lo que se podrían incluir en cremas o ungüentos.

CONCLUSIONES

A pesar de la diversidad de la familia Lauraceae, se evidencia que sobre algunos de los géneros que se encuentran en el territorio colombiano, como *Aiouea*, *Anaueria*, *Caryodaphnopsis* y *Chlorocardium*, no hay estudios fitoquímicos para la búsqueda de actividades biológicas, lo que los convierte en géneros con potencial de estudio y que podrían aportar a la caracterización de esta familia.

En el país se encuentran especies pertenecientes a los géneros reportados en esta revisión, por lo que es importante incrementar el conocimiento acerca de estos, principalmente en lo que tiene que ver con sus propiedades cosméticas, con el fin de obtener compuestos que puedan ser incorporados en cosméticos, pero haciendo uso de procesos enmarcados en el aprovechamiento sostenible de la biodiversidad del país.

La familia Lauraceae cuenta con una gran representación en el territorio colombiano y sus especies suponen una fuente sostenible para la producción de metabolitos secundarios, llegando a brindar una alternativa económica de gran importancia para el país, por lo cual es importante realizar estudios que permitan avalar su uso cosmético, como por ejemplo, ensayos de toxicidad y permeación.

REFERENCIAS

- Abdelwahab, S., Mariod, A., Taha, M., Zaman, F., Abdelmageed, A., Khamis, S., y Awang, K. (2017). Chemical composition and antioxidant properties of the essential oil of *Cinnamomum altissimum* Kosterm. (Lauraceae). *Arabian Journal of Chemistry*, 10(1), 131-135.
- Ahmad, F., Salleh, W., Khong, H., Zulkifli, R., Chen, J., Nahar, L., Wansi, J., y Sarker, S. (2016). Beilschglabrinines A and B: Two new bioactive phenanthrene alkaloids from the stem bark of *Beilschmiedia glabra*. *Phytochemistry Letters*, 16, 192-196.
- Araújo, E., Lima, I., Silva, O., Júnior, I., Gutierrez, S., Carvalho, F., y Ferreira, P. (2016). In vitro antioxidant, antitumor and leishmanicidal activity of riparin A, an analog of the Amazon alkalamides from *Aniba riparia* (Lauraceae). *Acta Amazonica*, 46(3), 309-314.
- Armendáriz, B., Álvarez, R., y Galindo, S. (2016). Formulación de productos naturales en sistemas de liberación micro y nanoparticulados. En C. Rivas, M. Oranday y M. Verde (Eds), *Investigación en plantas de importancia médica* (pp. 411-436). Barcelona, España: OmniaScience.
- Ballabeni, V., Tognolini, M., Giorgio, C., Bertoni, S., Bruni, R., y Barocelli, E. (2010). *Ocotea quixos* Lam. essential oil: In vitro and in vivo investigation on its anti-inflammatory properties. *Fitoterapia*, 81(4), 289-295.
- Barrueto, C., y Padova, L. (2014). Efecto antimicrobiano del aceite esencial y del extracto acuoso de canela (*Cinnamomum zeylanicum*) sobre *Candida albicans* y *Streptococcus mutans*. *Sciéndo*, 16(1), 68-78.
- Bernal, R., Gradstein, S., y Celis, M.(Eds.). (2015). *Catálogo de plantas y líquenes de Colombia*. Colombia: Instituto de Ciencias Naturales.
- Bruni, R., Medici, A., Andreotti, E., Fantin, C., Muzzoli, M., Dehesa, M., y Sacchetti, G. (2004). Chemical composition and biological activities of ishpingo essential oil, a traditional Ecuadorian spice from *Ocotea quixos* (Lam.) Kosterm. (Lauraceae) flower calices. *Food chemistry*, 85(3), 415-421.
- Carrau, M., Gimeno, M., Ibáñez, O., Organero, A., y Rey, P. (2010). Plantas limpias. *Métode Science Studies Journal*, 65, 120-121.
- Chanderbali, A., Werff, H., y Renner, S. (2001). Phylogeny and historical biogeography of Lauraceae: evidence from the chloroplast and nuclear genomes. *Annals of the Missouri Botanical Garden*, 88(1), 104-134.
- Chang, S., Chen, P., y Chang, S. (2001) Antibacterial activity of leaf essential oils and their constituents from *Cinnamomum osmophloeum*. *Journal of Ethnopharmacology*, 77(1), 123-127.
- Chouna, J., Nkeng, P., Lenta, B., Devkota, K., Neumann, B., Stammler, H., y Sewald, N. (2009). Antibacterial endiandric acid derivatives from *Beilschmiedia anacardioides*. *Phytochemistry*, 70(5), 684-688.

- Costa, R., y Santos, L. (2017). Delivery systems for cosmetics-From manufacturing to the skin of natural antioxidants. *Powder Technology*, 322, 402–416
- Coy, E. y Cuca, L. (2007). Metabolitos con actividad biológica aislados de especies pertenecientes a la familia Lauraceae. *Scientia et Technica*, 13(33), 363-364.
- Da Silva, J., Sousa, P., Andrade, E., y Maia, J. (2007). Antioxidant capacity and cytotoxicity of essential oil and methanol extract of *Aniba canelilla* (HBK) Mez. *Journal of agricultural and food chemistry*, 55(23), 9422-9426.
- Daiuto, É., Tremocoldi, M., Alencar, S., Vieites, R., y Minarelli, P. (2014). Composição química e atividade antioxidante da polpa e resíduos de abacate ‘Hass’. *Revista Brasileira de Fruticultura*, 36(2), 417-424.
- Decisión 516 de 2002. *Armonización de legislaciones en materia de productos cosméticos*. Comunidad Andina, 15 de marzo de 2002.
- Delgado, W. (2017). *Estudio de la diversidad química de aceites esenciales y extractos etanólicos de diez especies de Lauraceae colombiana* (tesis doctoral). Facultad de Ciencias, Departamento de Química, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia.
- Dreher, M., y Davenport, A. (2013). Hass avocado composition and potential health effects. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 53(7), 738–750.
- Ferraro, G., Martino, V., Bandoni, A., y Nadinic, J. (2015). *Fitocosmética, fitoingredientes y otros productos naturales*. (1ª edición). Buenos Aires: Eudeba.
- Gil, E. (2016). *Bioprospección de la especie Ocotea caudata Nees (Lauraceae)* (tesis de doctorado). Facultad de Ciencias, Departamento de Química, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia.
- González, F., y Bravo, L. (2017). Historia y actualidad de productos para la piel, cosméticos y fragancias. Especialmente los derivados de las plantas. *Ars Pharmaceutica*, 58(1), 5-12.
- Herrera, W., Barbosa, P., y Gomes, L. (2010). Crecimiento inicial de palo de rosa (*Aniba rosaeodora* Duckei) en distintos ambientes de fertilidad. *Acta Amazonica*, 40(4), 693-698.
- Industria cosmética y de aseo retoma rumbo de crecimiento. (2018, 25 de marzo) *Portafolio*. Recuperado de <https://www.portafolio.co/negocios/industria-cosmetica-y-de-aseo-retoma-rumbo-de-crecimiento-515554>
- Joshi, B., Lekhak, S., y Sharma, A. (2009). Antibacterial property of different medicinal plants: *Ocimum sanctum*, *Cinnamomum zeylanicum*, *Xanthoxylum armatum* and *Origanum majorana*. *Kathmandu University Journal of Science, Engineering and Technology*, 5(1), 143-150.
- Krainovic, P., de Almeida, D., da Veiga, V., y Sampaio, P. (2018). Changes in rosewood (*Aniba rosaeodora* Ducke) essential oil in response to management of commercial plantations in Central Amazonia. *Forest Ecology and Management*, 429, 143-157.
- Lemmel, J. (2002). Sustancias despigmentantes y métodos de aclaramiento del color de la piel. *Offarm*, 21(9), 79-83.
- Liu, R., Zhang, H., Zhou, F., Wang, R., Tu, Q., y Wang, J. (2013). Flavonoids and alkaloids from the leaves of *Litsea fruticosa*. *Biochemical Systematics and Ecology*, 50, 293-295.

- Maia, J., y Andrade, E. (2009). Database of the Amazon aromatic plants and their essential oils. *Química Nova*, 32(3), 595-622.
- Madriñan, S. (2015, 15 de octubre). Laboratorio de Botánica y Sistemática. Recuperado de <https://botanica.uniandes.edu.co/investigacion/lauraceae.htm>
- Majeed, H., Antoniou, J., Hategekimana, J., Sharif, H., Haider, J., Liu, F., y Zhong, F. (2016). Influence of carrier oil type, particle size on in vitro lipid digestion and eugenol release in emulsion and nanoemulsions. *Food Hydrocolloids*, 52, 415-422.
- Marchese, A., Barbieri, R., Coppo, E., Orhan, I., Daglia, M., Nabavi, S., y Ajami, M. (2017). Antimicrobial activity of eugenol and essential oils containing eugenol: A mechanistic viewpoint. *Critical reviews in microbiology*, 43(6), 668-689.
- Martínez, M., y Laguna, G. (2014, junio). *El desnudo del maquillaje femenino: tópico literario y concepción ideológica patriarcal*. En R. Casado (coord.), *Aportaciones a la investigación sobre mujeres y género: V Congreso Universitario Internacional Investigación y Género*. Ponencia presentada en Universidad de Sevilla, Sevilla, España.
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2009). *Agenda prospectiva de investigación y desarrollo tecnológico para la cadena productiva de plantas aromáticas, medicinales, condimentarias y afines con énfasis en ingredientes naturales para la industria cosmética colombiana*. Bogotá: Cámara de Comercio de Bogotá, IAVH, Universidad Nacional de Colombia, Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural.
- Montero, M., Revelo, J., Avilés, D., Valle, E., y Guevara, D. (2017). Efecto antimicrobiano del aceite esencial de canela (*Cinnamomum zeylanicum*) sobre cepas de *Salmonella*. *Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú*, 28(4), 987-993.
- Moreno, C., (2010, 27 de diciembre). Cosméticos colombianos con proyección mundial. *Unimedios*. Recuperado de <http://agenciadenoticias.unal.edu.co/detalle/articulo/cosmeticos-colombianos-con-proyeccion-mundial.html>
- Moreno, E., Ortiz, B., y Restrepo, L. (2014). Contenido total de fenoles y actividad antioxidante de pulpa de seis frutas tropicales. *Revista Colombiana de Química*, 43(3), 41-48.
- Moreno, L., Rueda, C., y Andrade, G. (Eds.). (2018). *Biodiversidad 2017. Estado y tendencias de la biodiversidad continental de Colombia*. Bogotá D. C.: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Muñiz, D., Martínez, G., Wong, J., Belmares, R., Rodríguez, R., y Aguilar, C. (2013). Ultrasound-assisted extraction of phenolic compounds from *Laurus nobilis* L. and their antioxidant activity. *Ultrasonics sonochemistry*, 20(5), 1149-1154.
- Muñoz, M. y Gutiérrez, D. (2010). *Determinación de actividad antioxidante de diversas partes del árbol Nicotiana glauca* (informe). Facultad de Química, Universidad Autónoma de Querétaro, Querétano, México.
- Oliveira, C., Morandini, L., Pedroso, M., Neto, A., Silva, U., Mostardeiro, M., y Morel, A. (2017). Sesquiterpenoids from *Nectandra megapotamica* (Lauraceae). *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 28(1), 21-29.
- Olivero, J., González, T., Güette, J., Jaramillo, B., y Stashenko, E. (2010). Chemical composition and antioxidant activity of essential oils isolated from Colombian plants. *Revista Brasileira de Farmacognosia*, 20(4), 568-574.

- Ooi, L., Li, Y., Kam, S. L., Wang, H., Wong, E., y Ooi, V. (2006). Antimicrobial activities of cinnamon oil and cinnamaldehyde from the Chinese medicinal herb *Cinnamomum cassia* Blume. *The American journal of Chinese medicine*, 34(03), 511-522.
- Pabón, L., y Cuca, L. (2010). Aporphine alkaloids from *Ocotea macrophylla* (Lauraceae). *Química Nova*, 33(4), 875-879.
- Pan, P., Cheng, M., Peng, C., Huang, H., Chen, J., y Chen, I. (2010). Secondary metabolites from the roots of *Litsea hypophaea* and their antitubercular activity. *Journal of Natural Products*, 73(5), 890-896.
- Pradeepa, K., Krishna, V., Venkatesh, Kumar, G., Thirumalesh, B., y Naveen, K. (2011). Antibacterial screening of the stem bark and leaf extracts of *Litsea glutinosa* (Lour.) C.B. Rob-an ethnomedicinally important tree of the Western Ghats. *Pharmacognosy Journal*, 3(21), 72-76.
- Prasad, K., Yang, B., Dong, X., Jiang, G., Zhang, H., Xie, H., y Jiang, Y. (2009). Flavonoid contents and antioxidant activities from *Cinnamomum* species. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 10(4), 627-632.
- Raj, B., Singh, S., Samual, V., John, S., y Siddiqua, A. (2013). Hepatoprotective and antioxidant activity of *Cassythia filiformis* against CCl₄ induced hepatic damage in rats. *Journal of Pharmacy Research*, 7(1), 15-19.
- Ribeiro, A., Bolzani, V., Yoshida, M., Santos, L., Eberlin, M., y Silva, D. (2005). A new neolignan and antioxidant phenols from *Nectandra grandiflora*. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 16(3B), 526-530.
- Rohwer, J. (2000). Toward a phylogenetic classification of the Lauraceae: evidence from matk sequences. *Systematic Botany*, 25(1), 60-71.
- Rozo, M. (2015). *Metabolitos secundarios aislados de hojas de Ocotea heterochroma* (Lauraceae) (tesis de maestría). Facultad de Ciencias, Departamento de Química, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D. C., Colombia.
- Ruiz, M., Arias, J., y Gallardo, V. (2010). Skin creams made with olive oil. En V. Preedy y R. Watson (Eds.), *Olives and olive oil in health and disease prevention* (pp. 1133-1141). EE.UU.: Elsevier Inc.
- Salleh, W., Ahmad, F., y Yen, K. (2015). Chemical compositions and biological activities of the essential oils of *Beilschmiedia madang* Blume (Lauraceae). *Archives of pharmacal research*, 38(4), 485-493.
- Salleh, W., Ahmad, F., Yen, K., Zulkifli, R., y Sarker, S. (2016). Madangones A and B: Two new neolignans from the stem bark of *Beilschmiedia madang* and their bioactivities. *Phytochemistry Letters*, 15, 168-173.
- Sampaio, L., Maia, J., Parijós, A., Souza, R., y Barata, L. (2012). Linalool from rosewood (*Aniba rosaedora* Ducke) oil inhibits adenylate cyclase in the retina, contributing to understanding its biological activity. *Phytotherapy Research*, 26(1), 73-77.
- Silva, R., Damasceno, S., Silva, I., Silva, V., Brito, C., Teixeira, A., y Ribeiro, R. (2015). Riparin A, a compound from *Aniba riparia*, attenuate the inflammatory response by modulation of neutrophil migration. *Chemico-biological interactions*, 229, 55-63

- Sun, L., Zong, S., Li, J., Lv, Y., Liu, L., Wang, Z., y Xiao, W. (2016). The essential oil from the twigs of *Cinnamomum cassia* Presl alleviates pain and inflammation in mice. *Journal of ethnopharmacology*, 194, 904-912.
- Tngoc, T., Lee, I., Ha, D., Kim, H., Min, B., y Bae, H. (2009). Tyrosinase-Inhibitory constituents from the twigs of *Cinnamomum cassia*. *Journal of Natural Products*, 72, 1205-1208.
- Tundis, R., Loizzo, M., Bonesi, M., y Menichini, F. (2015). Potential role of natural compounds against skin aging. *Current medicinal chemistry*, 22(12), 1515-1538.
- Unlu, M., Ergene, E., Unlu, G., Zeytinoglu, H., y Vural, N. (2010). Composition, antimicrobial activity and in vitro cytotoxicity of essential oil from *Cinnamomum zeylanicum* Blume (Lauraceae). *Food and Chemical Toxicology*, 48(11), 3274-3280.
- Vega, J. (2012). *El aguacate en Colombia: Estudio de caso de los Montes de María, en el Caribe colombiano* (Documentos de Trabajo sobre Economía Regional n.º 171). Cartagena, Colombia: Banco de la República.
- Veiga, V., Yamaguchi, K., y Alcantara, J. (2012). Investigaçãõ do potencial antioxidante e anticolinesterásico de 20 espécies da família Lauraceae. *Acta Amazonica*, 42(4), 541 – 546.
- Wang, H., Chen, C., y Wen, Z. (2011). Identifying melanogenesis inhibitors from *Cinnamomum subavenium* with in vitro and in vivo screening systems by targeting the human tyrosinase. *Experimental Dermatology*, 20(3), 242-248.
- Yamaguchi, K., Veiga, V., do Nascimento, T., de Vasconcellos, M., y Lima, E. (2013). Atividades biológicas dos óleos essenciais de *Endlicheria citriodora*, uma lauraceae rica em geranato de metila. *Química Nova*, 36(6), 826-830.
- Zhao, Q., Zhao, Y., y Wang, K. (2006). Antinociceptive and free radical scavenging activities of alkaloids isolated from *Lindera angustifolia* Chen. *Journal of ethnopharmacology*, 106(3), 408-413.

NIVELES DE METALES PESADOS EN LOS SEDIMENTOS SUPERFICIALES DE LAS ZONAS DE PLAYAS TURÍSTICAS DE LA GUAJIRA, NORTE DE COLOMBIA

LEVELS OF HEAVY METALS IN SURFACE SEDIMENTS OF THE AREAS OF TOURIST BEACHES OF LA GUAJIRA, NORTHERN COLOMBIA

Carlos Doria Argumedo*

Recibido: 12 de junio de 2018

Aceptado: 8 de octubre de 2018

Resumen

Se determinó la concentración de ocho metales pesados (cromo, cadmio, vanadio, cinc, plomo, níquel, mercurio y cobre) en sedimentos superficiales de seis de sitios de las playas turísticas de La Guajira para conocer los niveles de línea base y contaminación. La concentración se estableció mediante la técnica de espectroscopia de absorción atómica (CVAAS, GFAAS, FLAAS), utilizando un espectrofotómetro ICE 3000 Thermo Electron Corporation con llama aire-acetileno. Las concentraciones de los metales pesados en los sedimentos del área de estudio oscilaron entre los siguientes valores: cromo, 0.086-1.058 mg/kg; cadmio, 0.0098-0.0028 mg/kg; vanadio, 0.046-0.829 mg/kg; cinc, 0.250-0.630 mg/kg; plomo, 0.055-0.124 mg/kg; níquel, 0.080-1.220 mg/kg; mercurio, 0.00015-0.00027 mg/kg, y cobre, 0.030-0.1 mg/kg. Las correlaciones significativas entre los metales sugieren la existencia de fuentes de orígenes similares. La estimación del nivel de contaminación con el *índice de geoacumulación* indica que no existe contaminación. Las concentraciones de cromo, cinc y níquel se encuentran por debajo de un nivel de contaminación ligera en los sedimentos que puede ser tolerado por la mayoría de las especies bentónicas, aunque no se puede descartar una contribución antropogénica relacionada con el vertimiento de aguas servidas, la minería y la descarga de los ríos.

Palabras clave: sedimentos superficiales, playas turísticas, metales pesados, La Guajira.

Abstract

Heavy metals (Cr, Cd, V, Zn, Pb, Ni, Hg, Cu) were determined in surface sediments in six sites of the tourist beaches of La Guajira to establish baseline and contamination levels. The metals were determined by means of the atomic absorption technique (CVAAS, GFAAS, FLAAS) using an ICE 3000 Thermo Electron Corporation spectrophotometer with air-acetylene flame. The concentrations of heavy metals in the sediments of the study area varied: Cr, 0.086- 1,058 mg/kg; Cd, 0.00098-0,0002.84 mg/kg; V, 0.046-0,829mg/kg; Zn, 0.250-0,630 mg/kg; Pb, 0.055-0.124 µg/kg;

* Magíster en Química. Grupo de investigación Territorios Semiaridos del Caribe, Facultad de Ingeniería, Universidad de La Guajira, Riohacha, Colombia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6442-4449>. cdoria@uniguajira.edu.co

Ni, 0.080-1.220 mg/kg; Hg, 0.0015-0.0027 mg/kg, and Cu, 0.030-0.10 mg/kg. Statistically significant correlations between metals suggest sources of similar origins. The estimation of the level of contamination by means of the Geoaccumulation Index indicates that there is no marine pollution. The concentrations of Cr, Zn and Ni They are below a level of light pollution in the sediments, which can be tolerated by most benthic species, although the anthropogenic contribution related to the dumping of wastewater, mining and the discharge of wastewater can not be ruled out.

Keywords: sediment surface, tourist beaches, heavy metals, La Guajira

INTRODUCCIÓN

Las zonas de playa de La Guajira colombiana tienen ecosistemas ricos, diversos y productivos, que sostienen actividades como la pesca, el turismo, la navegación, el desarrollo portuario y la explotación minera y en las que existen asentamientos urbanos e industriales. Además, son hábitats de alimentación, anidación y descanso de especies marinas y sitios de recolección artesanal de recursos marinos que benefician los asentamientos humanos y las actividades turísticas (García, 2013).

La contaminación marina se define como la introducción directa o indirecta de sustancias en el medio marino que deteriora los recursos vivos, pone en peligro la salud humana, altera actividades marinas como la pesca, reduce el valor recreativo y afecta la calidad del agua de mar (Cifuentes, Torres y Frías, 2003). Los fenómenos naturales y antropogénicos, entre los que se encuentran la sedimentación, las anomalías climáticas, la acumulación de contaminantes y basuras, la interrupción de los flujos bioenergéticos, la sobreexplotación de los recursos marinos, la utilización de artes de pesca altamente destructivas y las actividades turísticas, son considerados los causantes del mayor deterioro en los ecosistemas marinos costeros del país (Garay et ál., 2012). Por otro lado, las aguas naturales son receptoras de residuos de operaciones industriales que contienen metales en forma de disolución. Igualmente, la escorrentía agrícola, los residuos mineros y las aguas descargadas en el alcantarillado doméstico incrementan las concentraciones de metales en las aguas naturales (Orozco, Pérez, González, Rodríguez y Alfayete, 2005). Según el estudio de Invenmar y el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2011), de las 157 empresas que descargan sus efluentes residuales a las aguas marinas y costeras del Caribe y el Pacífico, el 20.4 % de las empresas realizan la actividad de deposición de aguas residuales y el 24.2 % son industrias relacionadas con manejo de carnes (3.8%), productos pesqueros (4.5 %), cría de animales (7.6 %), cultivos (3.8 %) y servicios conexos al suministro de combustible (4.5 %).

Desde el punto de vista de la contaminación, las áreas costeras de la región Guajira presentan una constante alteración de sus propiedades naturales como consecuencia del vertimiento continuo de desechos domésticos e industriales. La contaminación por metales pesados es una de las formas más peligrosas para los ecosistemas acuáticos (Perales, Garrido y Ramírez, 2012). Estos metales son elementos poco o nada biodegradables, que tienden a acumularse en los tejidos de animales y vegetales acuáticos y permanecen en ellos por largos períodos, desencadenando procesos de biomagnificación y acciones toxicodinámicas, las cuales generan alteraciones metabólicas, mutaciones y transformaciones anatómicas en las especies animales, incluido el hombre. En este sentido, el desconocimiento de la concentración y distribución de los metales en las zonas de playas turísticas de La Guajira puede contribuir al deterioro de la calidad hídrica y poner en riesgo la vida acuática y la población que consume productos marinos y derivados de la pesca y tiene contacto primario con las actividades recreativas en las zonas de playas.

Se desarrolló esta investigación teniendo en cuenta los procesos geoquímicos que ocurren en los suelos inundados, los vertimientos de las aguas servidas desde los núcleos poblacionales y las actividades primarias, agroindustriales e industriales que se desarrollan en las zonas aledañas al área de estudio, con el propósito de conocer la presencia y distribución espacial de los metales pesados en zonas turísticas de la costa sur y media de La Guajira que se derivan de la acción antropogénica. Los 344 804 habitantes radicados en la cuenca del río Ranchería generan 43.260 m³/día de aguas residuales domésticas cargadas con 2.955 t/año de materia orgánica (Doria y Vivas, 2016). Por su parte, los porcentajes de plaguicidas usados en los cultivos de la zona son: banano, 7 %; café, 5 %; hortalizas, 5 %; algodón, 4 %; maíz, 4 %, y frutales, 3 %. Los grupos de plaguicidas de mayor uso corresponden a fungicidas (compuestos inorgánicos, ditiocarbamatos, benzimidazoles, triazoles y diazoles, diazinas, morfollinas, entre otros) y herbicidas (triazinas, amidas, carbamatos, dinitroanilinas, derivados de la urea, sulfonilúreas, biperilidos, hormonales del grupo fenoxi, entre otros). A este gasto se suman los aportes relacionados con el uso de plaguicidas para la protección de cultivos proscritos y los residuos mineros derivados de la extracción de yeso, barita, oro, mármol, arcilla, caliza y sal (Corporación Autónoma Regional de La Guajira, 2012).

MATERIALES Y MÉTODOS

Los sitios de muestreo correspondieron a las playas de las poblaciones de Dibulla, Camarones, Riohacha, Mayapo, Manaure y el cabo de la Vela, las cuales presentan la mayor afluencia turística. Estas poblaciones se encuentran ubicadas en el departamento de La Guajira (11° 33' 0" N, 72° 54' 0" O), cuya superficie total es de 20848 km², superficie que tiene 1458 km² de área costera y 789 km de línea de costa (Corpoguajira, 2012) (ver figura 1). En cada playa se establecieron dos estaciones de muestreo definidas como un factor fijo, para un total de 24 puntos de monitoreo. Por otro lado, además de la cantidad de turistas, las desembocaduras de ríos Palomino, Tapias, Jerez y Ranchería fueron otro factor influyente en la definición y escogencia de los sitios de muestreo.

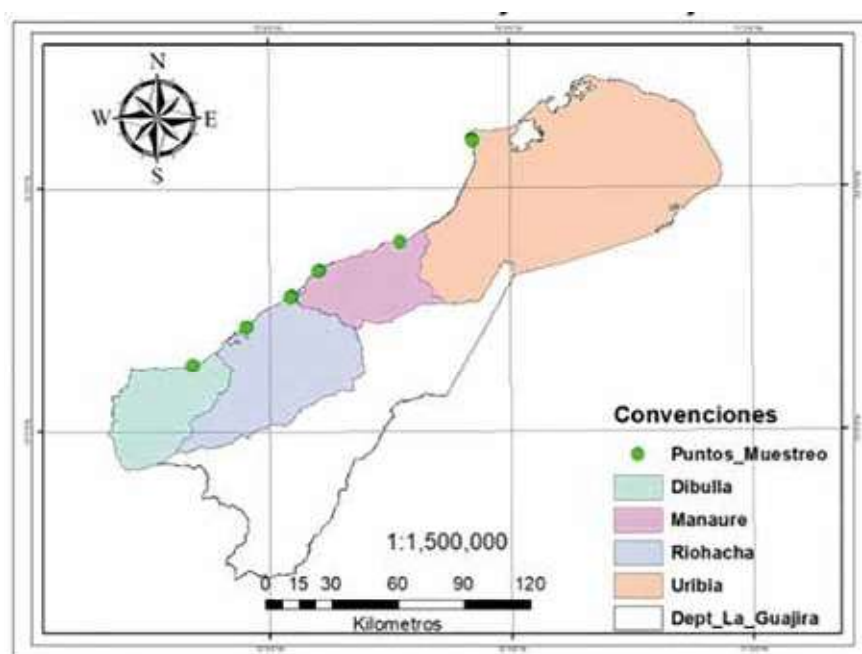


Figura 1. Playas de La Guajira, estaciones de muestreo en la zona de estudio.

Las muestras fueron tomadas durante cuatro campañas de muestreo, en dos épocas climáticas, sequía y lluvia, en el período de marzo a noviembre del 2015. La colecta de cada muestra de sedimento se realizó a 5 cm de la capa superficial, con una draga tipo Van Veen y a una distancia aproximadamente de 100 m de la orilla de la playa, tomando en cuenta el lugar de presencia de los bañistas. Siguiendo los parámetros propuestos por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (2006), las muestras fueron transportadas al laboratorio en bolsas de polietileno previamente rotuladas, para la determinación de metales pesados y parámetros químicos (pH, Eh, nutrientes y materia orgánica).

Las muestras fueron lavadas con agua desionizada, secadas en bandejas plásticas a 40 °C y tamizadas por una malla de Nylon de 50 μm . Se tomaron tres réplicas de cada muestra de un gramo (peso seco), a la que se le adicionó 10 mL de una mezcla de ácido nítrico y ácido clorhídrico (en relación de 6:2). Las muestras fueron sometidas a digestión durante 2 horas, tiempo suficiente para su digestión completa y para la determinación de las concentraciones totales de los metales en sedimentos (Barros, 2017). La cuantificación de los metales pesados (cromo, cadmio, vanadio, cinc, plomo, níquel, mercurio y cobre) se realizó por espectrometría de absorción atómica (CVAAS, GFAAS, FLAAS), utilizando un espectrofotómetro ICE 3000 Thermo Electron Corporation con llama aire-acetileno y corrector de fondo de deuterio (método estandarizado para la determinación de metales pesados), en el que se encontró valores de desviación estándar muy bajos. Para garantizar el correcto desempeño de los procedimientos analíticos utilizados, se evaluaron cinco características analíticas: linealidad, precisión, exactitud, límite de detección y de cuantificación (el análisis siguió los criterios propuestos por el IDEAM [2001]).

Linealidad

Para determinar el intervalo de concentraciones en el que el sistema cumple la ley de Beer (o intervalo óptimo de concentraciones) se procedió a construir la curva de Ringbom de cada analito. Para ello se midió la señal de respuesta para una serie de soluciones patrones con las siguientes concentraciones: 0.05 mg/L, 0.075 mg/L, 0.10 mg/L, 0.125 mg/L, 0.150 mg/dL y 0.250 mg/L. En la preparación de la solución *stock* de cada analito (1 mg/L) se partió de un estándar certificado con concentración de 1000 mg/mL.

Para la construcción de las curvas de calibración se siguieron las recomendaciones de Taylor (1993):

- Se prepararon seis soluciones patrones con concentraciones espaciadas de forma uniforme a lo largo del intervalo de concentración de interés, según la curva de Ringbom. El intervalo de concentración abarcó valores por debajo, entre y sobre el intervalo lineal.
- Las soluciones patrones se prepararon y leyeron por triplicado. El procedimiento se repitió de forma independiente tres veces para evaluar estadísticamente la regresión lineal del sistema.
- Con el promedio de los datos obtenidos se procedió a realizar la curva de calibración mediante un análisis de regresión por el método de los mínimos cuadrados y se determinaron las características de desempeño del método en estudio.

Para comprobar si el modelo lineal simple se ajusta o no al estudio de la relación entre la absorbancia y la concentración, se determinó la ecuación de la recta y se calcularon los parámetros de la pendiente, el intercepto, el coeficiente de correlación (r) y el coeficiente de determinación (r^2) de la línea de regresión o curva de calibración ajustada mediante el método de los mínimos cuadrados.

Exactitud

Para la exactitud se realizaron dos pruebas: una para verificar la ausencia de interferencias en el procedimiento analítico mediante el método de adición de patrón. Como criterio de aceptación, se consideró una recuperación satisfactoria entre 97 y 103 %. Se prepararon tres soluciones que contenían cada una 1 mL de muestra previamente tratada conforme al método analítico en estudio y se les adicionó un volumen fijo de soluciones patrones de diferentes concentraciones: 0.050 mg/L, 0.100 mg/L y 0.150 mg/L, a las cuales se les determinó el porcentaje de recuperación por medio de la ecuación 1:

$$\% R = \frac{\text{concentración calculada}}{\text{concentración teórica}} \times 100 \quad (1)$$

La otra prueba se realizó para tener una primera aproximación de la eficiencia del proceso de extracción por medio de un material de referencia certificado (material de referencia certificado de metales en suelo marca ERA, Lote D039540), por medio del cual se prepararon cinco muestras (0.05, 0.10, 0.25, 0.50 y 1 mg/L) que fueron tratadas según el proceso de extracción.

La recuperación media alcanzada para cada analito >98 % indica que el método propuesto tiene la exactitud necesaria para considerarlo adecuado para las determinaciones en cada caso.

Precisión

Se analizaron 10 muestras para tres niveles de concentración: bajo (0.05 mg/L), medio (0.25 mg/L) y alto (1.00 mg/L), a partir de los cuales se determinó la desviación estándar relativa. Los resultados obtenidos estuvieron en los rangos 18.5-19.1 %, 9.20-13.4 % y 9.50-11.3 %, respectivamente. Según la FDA (2003), la desviación estándar relativa debe ser menor del 20 % para concentraciones de nivel bajo y menor del 15 % para las concentraciones medias y altas. Por lo tanto, se concluye que para los tres niveles se cumplen las especificaciones y que el método es repetible bajo las condiciones dadas.

Límite de detección y límite de cuantificación

El límite de detección (LOD) se determinó con el análisis de 10 repeticiones del blanco a partir de 10 muestras (solución preparada bajo las mismas condiciones que la curva de calibración sin adición de solución *stock*, es decir, una concentración 0 para cada analito) y posteriormente se calculó con la ecuación 2:

$$\text{LOD} = X + (3 \cdot \text{SD}) \quad (2)$$

Donde X es la media de la respuesta instrumental del blanco y SD es la desviación estándar de la respuesta instrumental del blanco.

El límite de cuantificación (LOQ) se determinó a partir de los mismos resultados de las mediciones de blanco con las que se estableció el límite de detección, que se calculó con la ecuación 3:

$$\text{LOQ} = X + (10 \cdot \text{SD}) \quad (3)$$

En la tabla 1 se encuentran los resultados de los límites de detección y cuantificación.

Tabla 1. Resultados de las características de desempeño de los métodos analíticos correspondientes a los metales

Metal	r	Desviación estándar (mg/kg)	Coefficiente de variación (%)	% de recuperación	LOD (mg/kg)	LOQ (mg/kg)
Zn	0.998	0.04	0.5	98.7	0.0002	0.0008
Cr	0.998	0.05	0.9	102.9	0.095	0.12
V	0.999	0.06	0.4	102.6	0.0056	0.0087
Ni	0.998	0.03	1.5	102.8	0.094	0.12
Cd	0.999	0.07	1.4	99.3	0.0018	0.0043
Hg	0.999	0.04	1.5	99.1	0.010	0.045
Cu	0.999	0.08	2.3	103.0	0.10	0.68
Pb	0.999	0.05	1.0	99.1	0.0010	0.0065

Para complementar el análisis de los sedimentos, contrastado con referencias internacionales de calidad ambiental de sedimentos, se determinaron el índice de enriquecimiento (IE) y el índice de geoacumulación (Igeo). El IE permite evaluar el grado de contaminación por enriquecimiento de metales traza, calculando la proporción entre el valor de la muestra de sedimento y el valor de referencia o criterios de riesgos (Ávila Ferreira, Salgueiro y Farinha, 2008).

$$IE = \frac{\text{concentración metal muestra}}{\text{concentración de referencia}} \quad (4)$$

Para estimar dichos factores se utilizó como referencia el Fe y la concentración en la corteza terrestre continental superior, con lo que se establecen 4 niveles (ver tabla 2) de enriquecimiento con respecto al fondo (Taylor, 1964).

Tabla 2. Niveles de enriquecimiento

Nivel	Intervalo	Enriquecimiento
1	IE <1	No enriquecidos
2	>1 y <2	Débilmente enriquecidos
3	>2 y <10	Enriquecidos
4	>10	Fuertemente enriquecidos

Por su parte, el Igeo permite estudiar la contaminación antropogénica en los sedimentos en el área de estudio mediante la ecuación de Müller (1979):

$$Igeo = \text{Log}_2 Cn/1.5Bn \quad (5)$$

Donde Cn es la concentración media del elemento muestreado y Bn es el contenido promedio en sedimentos de referencia (ver tabla 3). El valor 1.5 corresponde al factor de corrección en estudios anteriores (Taylor, 1964).

Tabla 3. Valores Bn según media de referencia Bowen

Metal traza	Niveles bases (mg/kg)
Cobre	45
Zinc	95
Plomo	20
Cadmio	0.3
Níquel	68
Cromo	90
Vanadio	130
Mercurio	0.4

Para establecer la variación entre las épocas climáticas y las diferencias entre los niveles de metales pesados presentes en los sedimentos se aplicó un análisis estadístico descriptivo, un análisis de distribución de los datos y un análisis multivariado. El estudio usó cinco modelos de análisis: a) prueba de rechazo de Chauvenet; b) pruebas de medias normales y covarianza y medias desconocidas *t*-Student; c) coeficiente de correlación lineal y series de tiempo para el caso de las concentraciones en los diferentes períodos de monitoreo; d) análisis de correlación entre la concentración de los metales, y e) análisis de componentes principales (PCA, por sus siglas en inglés) con las concentraciones en los diferentes sitios de monitoreo, con el objeto de determinar posibles asociaciones y rotación Varimax mediante el software IBM SPSS Statistics Base versión 21.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los valores de pH en los sedimentos no mostraron mayores cambios (ver tabla 4). Se presentó un rango muy estrecho debido a la capacidad *buffer* del sistema carbonato/bicarbonato/ácido carbónico (Taylor, 1993). El rango de valores estuvo entre 8.19 (± 0.75) unidades de pH. Las mayores variaciones se presentaron en Riohacha (7.95-8.35; $\bar{X} = 8.17$) debido a su condición de zona de mezcla, lo que denota, por una parte, la intrusión salina y, por otra, los aportes de las aguas residuales y de aguas fluviales, especialmente del río Ranchería en épocas de lluvia. En cuanto a los nutrientes (ver tabla 4), no se encontró variación temporal significativa entre las dos épocas de muestreo ($\text{NH}_4^+ = 0.84$, $\text{NO}_3^- = 0.15$, $\text{PO}_4^{3-} = 0.063$, $p > 0.05$).

Se realizó un análisis de varianza con el fin de encontrar diferencias significativas entre épocas. El análisis muestra que las concentraciones no fueron estadísticamente diferentes ($p > 0.05$) en los periodos seco y húmedo para todas las estaciones. La secuencia de la concentración de los metales pesados hallados en el sedimento de la zona costera de La Guajira fue: Fe > Zn > Cr > Ni > V > Pb > Cu > Cd > Hg (ver tabla 5).

Tabla 5. Resultado de análisis de los metales en el sedimento marino de las playas de La Guajira

Sitio	Cr (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Cd (mg/kg)	V (mg/kg)	Fe (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Ni (mg/kg)
Dibulla	0.55 + 0.44	0,096 + 0.035	0,00097 + 0.00063	0.080 + 0.040	0.47 + 0.21	0.00062 + 0.00025	0.00013 + 0.00007	0.000026 + 0.00009
Camarones	0.14+ 0.043	0.12 + 0.019	0.0015 + 0.0011	0.20 + 0.11	0.23 + 0.40	0.00056 + 0.00011	0.00007 + 0.0003	0.000060 + 0.00001
Riohacha	0.085 + 0.018	0.054 + 0.018	0.0011 + 0.00040	0.046 + 0.040	0.064 + 0.021	0.00025 + 0.00011	0.00005 + 0.00004	0.00008 + 0.00001
Mayapo	0.27 + 0.10	0.072 + 0.024	0.0015 + 0.00007	0.33 + 0.25	0.062 + 0.014	0.00036 + 0.00010	0.00004 + 0.00003	0.00008 + 0.00001
Manaure	0.18 + 0.067	0.095 + 0.051	0.0028 + 0.0022	0.82 + 0.64	0.098 + 0.027	0.00046 + 0.00012	0.00005 + 0.00003	0.00008 + 0.00001
Cabo de La vela	1.05 + 0.43	0.097 + 0.017	0.0027 + 0.0005	0.10 + 0.0039	0.18 + 0.0057	0.00036 + 0.00002	0.00003 + 0.00001	0.0012 + 0.00103

Nota. Concentración promedio \pm desviación estándar (n = 3).

Los datos obtenidos indican que solo en algunas zonas de playas las concentraciones de los metales son mayores en la época de lluvia que en la de sequía, pues en algunos casos el comportamiento es inverso. La mayor concentración de metales en la época de lluvias que en la de sequía se explica por las precipitaciones y el aumento de las escorrentías, las cuales transportan los materiales de los suelos hacia la cuenca baja de los tributarios del mar (Vivas-Aguas et ál., 2012). Los casos en que las concentraciones de metales en los sedimentos son más altas durante los periodos secos en comparación con los periodos de lluvia, como es el caso del Fe y Cu, puede deberse a la liberación de estos metales hacia la columna de agua, pues es conocido que los sedimentos no solo actúan como secuestradores de metales, sino que a veces funcionan como portadores de ellos (Rodríguez, Romero, Martínez, Fermín y Senior, 2012), lo que pudo haber ocurrido en este caso. Esto se debe a que durante los periodos secos las condiciones reductoras del metabolismo anaeróbico en los sedimentos por estancamiento de agua originan una disminución del pH, principalmente por la formación de H₂S metabólico; este gas, a una mayor temperatura, se difunde más fácilmente en la columna de agua y en contacto con el oxígeno disuelto forma H₂SO₄ (Delgado, 2012), contribuyendo a la acidificación del agua en este periodo. Otros aportantes a la acidez del agua en esta época pueden ser el CO₂ que se genera por la respiración de la productividad biológica y los iones amonio (NH₄⁺) que son incorporados a la biomasa acuática. Esta disminución de pH y reducción del volumen de agua facilita la solubilización de los metales y concentra los iones y materiales en el sistema.

Los niveles de Cr encontrados oscilaron entre 0.060 y 1.429 mg/kg. El registro de las concentraciones es muy similar en todas las estaciones: distribución poco homogénea y no hay diferencias significativas entre las mismas (0.445, p > 0.05). Los promedios más altos se encontraron en las estaciones de Dibulla, Camarones y El Cabo de La Vela. Se observó mayor acumulación de Pb en la zona de Camarones; Vivas-Aguas et ál. (2011) señalan que el Pb es uno de los metales con mayor concentración en el agua de las costas de La Guajira, en un rango promedio de 0.0054 y 0.008 mg/L, específicamente, frente a Manaure y Dibulla. Los valores de Cd en el sedimento presentaron una distribución relativamente homogénea en cada una de las estaciones; no obstante, no fueron halladas diferencias significativas entre los puntos monitoreados (0.275, p > 0.05). Los valores de V presentaron una distribución relativamente homogénea en cada una de las zonas, excepto para Manaure; sin embargo, fueron halladas diferencias significativas entre los puntos monitoreados (0.01, p = 0.05). El Zn presentó un intervalo de concentraciones de 0.250-0.650 mg/kg, con una distribución relativamente homogénea, lo que puede asociarse con la finura de

las partículas y/o al contenido de materia orgánica en los sedimentos superficiales de estas zonas (Moore y Ramamoorthy, 1984). El Ni estuvo presente en concentraciones muy bajas, entre 0.070 y 2.420 mg/kg, con un promedio de 0.29 mg/kg. El Cu tuvo valores que oscilaron entre menos del límite de detección hasta 0.1 mg/kg, con un promedio de 0.058 mg/kg. Las mayores concentraciones de cobre se encontraron en las zonas Dibulla y Camarones. Dentro del grupo de metales considerados en este estudio, el Hg fue el metal que presentó las menores concentraciones, desde menos del límite de detección hasta 0.0043 mg/kg, las cuales se presentaron de manera uniforme en todas las zonas de monitoreo.

Los índices de enriquecimiento calculados para los metales traza en este estudio siguen la siguiente secuencia: Zn > Cr > Ni > V > Pb > Cu > Cd > Hg (ver tabla 6). Se puede ver claramente que en todas las zonas de playas turísticas de La Guajira el Igeo indicó que no existe contaminación (tabla 7).

Tabla 6. Índices de enriquecimiento para las concentraciones de especies metálicas obtenidas en sedimento de las playas turísticas de La Guajira

Metal	IE
Cr	0.086
Pb	0.020
Cd	0.0004
V	0.060
Cu	0.013
Ni	0.064
Zn	0.097
Hg	0.000047

Tabla 7. Índices de geoacumulación para los diferentes elementos metálicos presentes en el sedimento de las playas turísticas de La Guajira

Metal	Concentración (mg/kg)	Igeo	Clasificación
Cr	0.38	-8.46	No contaminado
Pb	0.090	-8.38	No contaminado
V	0.26	-9.22	No contaminado
Cd	0.00018	-7.96	No contaminado
Cu	0.058	-10.17	No contaminado
Ni	0.28	-8.47	No contaminado
Zn	0.43	-8.35	No contaminado
Hg	0.00021	-11.48	No contaminado

Las altas proporciones de NH_4^+ en el sedimento encontradas en las estaciones de Dibulla, Camarones y Riohacha muestran que la fuente de afectación podría ser de tipo orgánico. La concentración significativa de NH_4^+ en el sedimento es evidencia del impacto de los centros poblados sobre la calidad del agua marino-costera debido al vertimiento de aguas residuales domésticas. Al respecto, Garbanatti, González, Antón y Mallea (2005) informaron que la principal fuente de nutrientes en las aguas de la zona costera de La Guajira es el vertimiento de aguas servidas y/o la descarga de los ríos. La asociación de los parámetros que se representan en la figura 2 indica que en el factor 1 las variables pH, MO, NH_4^+ , NO_2^- y NO_3^- corresponden estadísticamente a variables

asociadas y dependientes. Se presentan correlaciones medianamente significativas entre el pH y MO (0.618), MO y NO_3^- (0.433) y NO_2^- y NO_3^- (0.663), pero muy significativa con PO_4^{3-} (0.973).

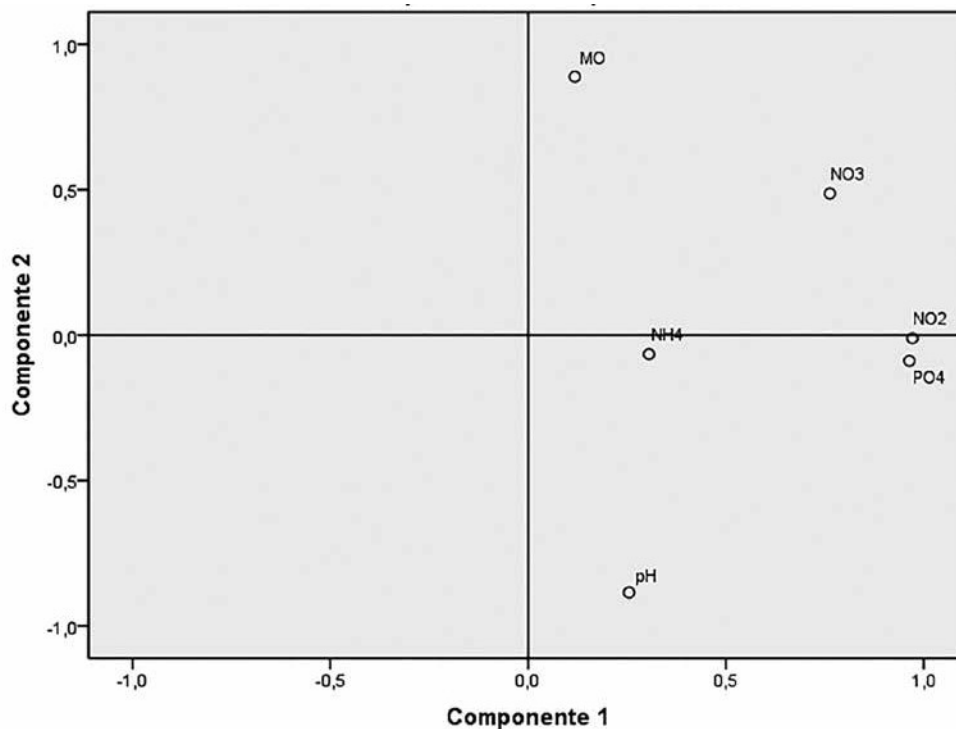


Figura 2. Matriz de factores rotados correspondiente a los parámetros químicos y nutrientes en el sedimento de las zonas de playas turísticas de La Guajira.

Las concentraciones de los metales se encuentran por debajo del valor informado para sedimentos no contaminados: Cr, 20 mg/kg; Pb, 5 mg/kg; Cd, 1mg/kg; Zn, 20 mg/kg; V, 2 mg/kg; Ni, 10 mg/kg; Cu, 10 mg/kg; Hg, 0.05 mg/kg (Sadiq, 1992). En la tabla 8 se comparan las concentraciones de metales en las playas de La Guajira con las reportadas en otras regiones cercanas y remotas del mundo.

Tabla 8. Concentración de metales traza de diversas zonas costeras, comparados con los niveles de las playas de La Guajira

Zona	Cu (mg/g)	Cr (mg/g)	Zn (mg/g)	Cd (mg/g)
Golfo de Cariaco de Venezuela (Bonilla y Lin, 1979)	0.11	0.084	0.087	0.053
Bahía de Barcelona, España (Mudarra, 2002)	0.013	*	0.10	*
Bahía Damas, España (Arúz, García, Rodríguez y Zarate, 2013)	0.0045	0.091	*	0.0027
Golfo de México (Rodríguez et ál., 2012)	0.027	0.054	0.16	*
Bahía Manatí de Cuba (Hernández y González, 1993)	0.039	*	0.027	*
Océano Pacífico Antártico (Gutiérrez-Galindo, Flores-Muñoz, Ortega-Lara y Villaescusa-Celaya, 1994)	0.0073	0.0023	0.16	*
Zonas de playas de La Guajira (este estudio)	0.00084	0.00035	0.00043	0.000018
Valor de referencia EPA (Hernández y González, 1993)	0.108	0.160	0.271	0.0042

*No hay registro

En la tabla se observa que la concentración de metales en la zona costera de La Guajira es entre 100 y 150 veces menor a las reportadas en zonas cercanas, como es el caso de Venezuela, Cuba y México. Una fuente importante de Cr en las playas de La Guajira puede ser producida por las descargas de desechos sin tratamiento generados por las poblaciones aledañas, especialmente en la zona de Riohacha y Dibulla. Según Vivas-Aguas et ál. (2012), el Cr presente en las aguas costeras de La Guajira se debe posiblemente a los aportes de los tributarios y las actividades antropogénicas desarrolladas cuenca arriba de los ríos que desembocan en el mar. La presencia de Pb en el sedimento refleja una influencia antropogénica en la acumulación de este metal en los ecosistemas marinos (Sadiq, 1992). En este caso, la presencia de Pb es probablemente consecuencia de un importante tráfico de embarcaciones (principalmente, con motores fuera de borda) utilizados por los pescadores de la zona, que se puede depositar y acumular en los sedimentos superficiales. De igual manera, los pescadores de la zona utilizan el plomo como lastre en sus aparejos y redes para pescar, por lo que gran cantidad de estos fragmentos metálicos van a parar a los sedimentos del fondo. La concentración de Cd se encuentran por debajo de estándares internacionales, como, por ejemplo, el 0.6 mg/kg establecido por la legislación canadiense (Sadiq, 1992).

Los niveles de Cd en las zonas de playa pueden ser causados por los residuos de las actividades humanas de las comunidades vertidos a las aguas sin ningún tipo de tratamiento (PNUMA, 2009). En la región de la cuenca media del río Ranchería y de los ríos Tapias, Palomino, Jerez y Cañas existe una gran actividad agrícola (cultivos de maíz, algodón, frutas, etc.), lo que supone la utilización de una cantidad elevada de pesticidas, herbicidas y abonos con contenidos de Cd (Vivas-Aguas et ál., 2011).

Las concentraciones de V en la playa de Manaure son muy elevadas en comparación con los demás sitios. La presencia de V en el litoral puede estar relacionada con actividades antropogénicas, consecuencia de la incorporación de material del suelo contaminado con derivados del petróleo o trabajos metalúrgicos en las minas de sal y carbón. Las concentraciones más altas de Ni se encontraron en la zona del cabo de la Vela y las mínimas en Camarones y Riohacha, las cuales pueden estar relacionadas a la textura del sedimento de partículas finas que constituyen el sedimento en estas zonas que acumulan grandes cantidades de Ni y otros metales pesados. Estos metales forman parte de la estructura de la materia orgánica acumulada en este tipo de sedimento (Vivas-Aguas et ál., 2012), los cuales pueden liberarse cuando esta materia se degrada, es adsorbida en dichas partículas, o forma parte de los óxidos de hierro y manganeso que se producen en el agua de mar y que se precipitan para formar los sedimentos superficiales, que es el posible aporte terrígeno y natural de este metal en dicho ecosistema (Quintero, Agudelo, Quintana, Cardona y Osorio, 2010).

Moore y Ramammorthy (1984) señalan que el Ni se utiliza en la producción de fertilizantes con fosfato para fines agrícolas, lo que debe ser considerado como una importante fuente antrópica. Al respecto de los sedimentos superficiales del golfo de Santa Fe, Márquez (2001) reportó un promedio de Cu total de 3.96 mg/kg, valor muy superior a los promedios determinados para este estudio. Mudarra (2002) reportó un promedio de Cu total de 0.99 mg/kg para los sedimentos superficiales de la ensenada de Puerto Escondido en el departamento de Córdoba; igualmente, el autor sugiere que no existe contaminación en dicho ecosistema y que las concentraciones moderadamente bajas encontradas se deben al posible aporte terrígeno y natural de este metal en dicho ecosistema.

El Cu presente en los sedimentos es fundamentalmente litogénico, ya que este metal se encuentra en los sedimentos que forman parte de la estructura reticular de los compuestos minerales silicatos y arcillas. Los valores de Hg son muy inferiores a los límites establecidos en las legislaciones norteamericana y canadiense, relativas al mantenimiento de la calidad de los sedimentos marinos para prevenir alteraciones en la biota (Bonilla y González, 1992). En la tabla 8 se puede observar que las concentraciones de metales de las zonas de playas de La Guajira son muy inferiores a las reportadas en otros sitios costeros del mundo.

En términos generales, la dinámica de metales pesados en los diferentes sitios está sujeta a variaciones espaciales y temporales, que son resultado de los cambios en la magnitud de la escorrentía terrestre, la erosión del suelo y las fuentes de contaminación metálica. Los bajos valores de metales Cd, Ni y Hg en las playas pueden ser el resultado de la mezcla de sedimentos contaminados de las aguas continentales con sedimentos marinos relativamente limpios (Ceballos, 2009). El análisis de varianza muestra que las concentraciones no tienen diferencias estadísticamente significativas ($p > 0.05$) en los periodos seco y húmedo para todas las estaciones. En la tabla 9 se puede observar que en algunas zonas de playas las concentraciones de los metales son mayores en la época de lluvia que en la de sequía, aunque en ciertos casos el comportamiento es inverso. Los casos en los que las concentraciones de metales en los sedimentos son más altas durante los periodos secos en comparación con los periodos de lluvia, como es el caso del Fe y Cu, pueden estar relacionados con la capacidad de los sedimentos de portar metales, lo que forma quelatos o secuestradores de ellos (Ravanelli, Turbertini, Valcher y Martioni, 1997).

Tabla 9. Valores de los metales en las épocas de lluvia y sequía en el sedimento de las playas de La Guajira

Metal	Sequía (mg/kg)	Lluvia (mg/kg)
Cr	0.43 + 0.09	0.33 + 0.27
Pb	0.087 + 0.036	0.093 + 0.034
V	0.28 + 0.14	0.24 + 0.18
Cd	0.0019 + 0.0017	0.0016 + 0.0010
Cu	0.0007 + 0.0006	0.000059 + 0.00004
Ni	0.00010 + 0.00009	0.000050 + 0.000018
Zn	0.45 + 0.21	0.000043 + 0.000013
Hg	0.21 + 0.10	0.000018 + 0.000007

Nota. Concentración promedio \pm desviación estándar ($n=3$).

Aunque las correlaciones desde el punto de vista estadístico son poco significativas entre los metales Pb y V ($r = 0.503$), Pb y Zn ($r = 0.731$), Pb y Fe ($r = 0.521$), Pb y Cu ($r = 0.636$), Zn y Fe ($r = 0.723$), Zn y Cu ($r = 0.777$), Fe y Cu ($r = 0.791$) (ver tabla 9), se puede asegurar que existe la posibilidad de que los metales provengan de fuentes de orígenes similares. Los metales pesados como Zn, Cu y Fe son parte esencial de organismos marinos, por lo cual se encuentran altas concentraciones en los sedimentos (Cardwell, Hawker y Greenway, 2002). Hg, Ni, Cd, Pb y V pueden ser de origen antrópico e introducidos por actividades como minería, agricultura, descarga de aguas residuales, entre otras (Hernández, Cerecedo, Moreno, Alcalá y Puga, 2008). Los sedimentos disminuyen la movilidad y favorecen la acumulación de algunos compuestos orgánicos persistentes y metales pesados en el fondo de los sistemas acuáticos; además, constituyen reservorios y fuentes importantes de materiales orgánicos e inorgánicos que pueden ser intercambiados con la columna de agua (Palacio, 2007).

El análisis de correlación de Pearson muestra una relación positiva significativa entre Cr, Cu, Zn, Pb, Cd, Fe y MO en sedimentos. Por el contrario, para el pH se encontró una correlación negativa significativa para la mayoría de los metales (Cd, Zn, Fe y Cu), que concuerda con la disminución de la biodisponibilidad de los metales pesados en los sedimentos a medida que aumenta el pH (tabla 10).

Tabla 10. Matriz de correlaciones entre metales y parámetros fisicoquímicos de los sedimentos

	Cr	Pb	V	Cd	Ni	Zn	Fe	Cu	Hg	pH	MO
Cr	1										
Pb	0.268	1									
V	-0.084	0.503*	1								
Cd	0.125	-0.153	-0.112	1							
Ni	0.249	0.265	-0.134	0.243	1						
Zn	0.291	0.731**	0.293	-0.158	-0.110	1					
Fe	0.426*	0.521**	-0.162	-0.134	0.124	0.723**	1				
Cu	0.185	0.636**	0.245	-0.282	-0.073	0.777**	0.791**	1			
Hg	-0.284	-0.112	-0.193	-0.105	0.091	-0.332	-0.195	-0.128	1		
Ph	0.153	-0.140	0.304	0.480*	0.240	-0.461*	-0.595**	-0.538**	0.200	1	
MO	0.041	-0.002	-0.184	-0.218	-0.114	0.370	0.496**	0.514*	0.056	-0.618**	1
Eh	0.223	0.422*	0.225	0.191	0.127	0.311	0.087	-0.051	-0.185	0.127	-0.062

*La correlación es significativa a nivel 0.05 (bilateral)

**La correlación es significativa a nivel 0.01 (bilateral)

En el plano ortogonal (ver figura 3), los metales Cu, Fe, Zn, Pb y Cr se correlacionan con la materia orgánica en forma positiva al primer componente, siendo alta la interacción entre Fe y Zn. El primer componente, a su vez, muestra un contraste entre pH, Eh, Cd, Ni y V con las demás variables. El segundo componente muestra una asociación entre Eh, pH, Cd, V y Ni, aunque el Hg no presenta correlación con ninguna de las variables. Esta asociación puede sugerir que los metales tienen como origen una misma fuente, que podría ser la descarga de aguas residuales a las zonas de las playas.

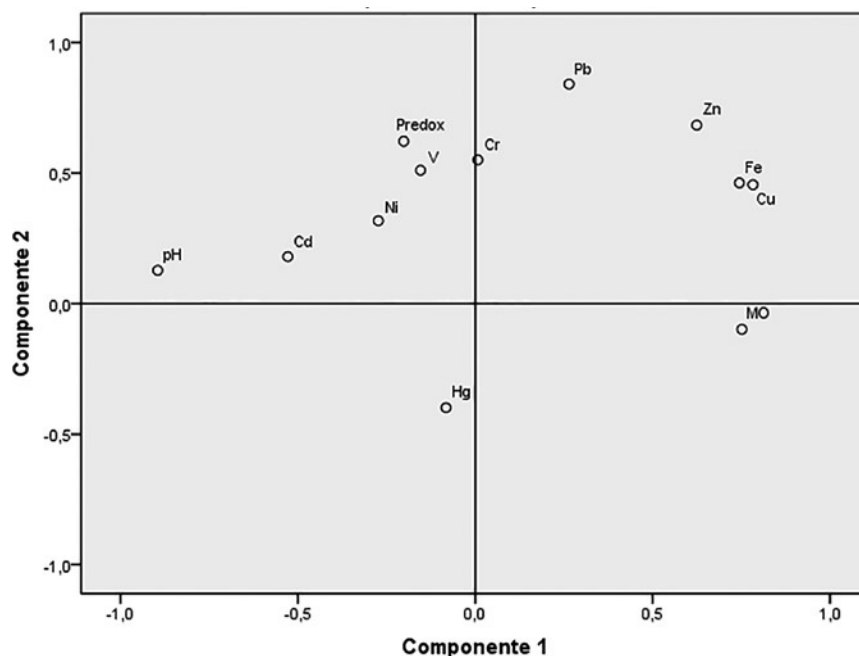


Figura 3. Correlaciones entre los metales y parámetros fisicoquímicos para los dos componentes principales del primer (F1) y segundo factor (F2) explicando el 80.82 % de la varianza.

La figura 4 muestra el dendograma de agrupación de metales y parámetros fisicoquímicos, en el que se pueden diferenciar tres grupos de asociaciones: el primer grupo asocia los contenidos de Cu, Hg, Zn, Ni, Cd, MO y pH; el segundo, los contenidos de Pb, Fe y Eh, y el último, los contenidos de Cr y V. Este análisis concuerda con lo indicado en el análisis de correlación y de componentes principales, e indica que los metales asociados pueden tener una misma procedencia, por lo que se correlacionan (ver tabla 9).

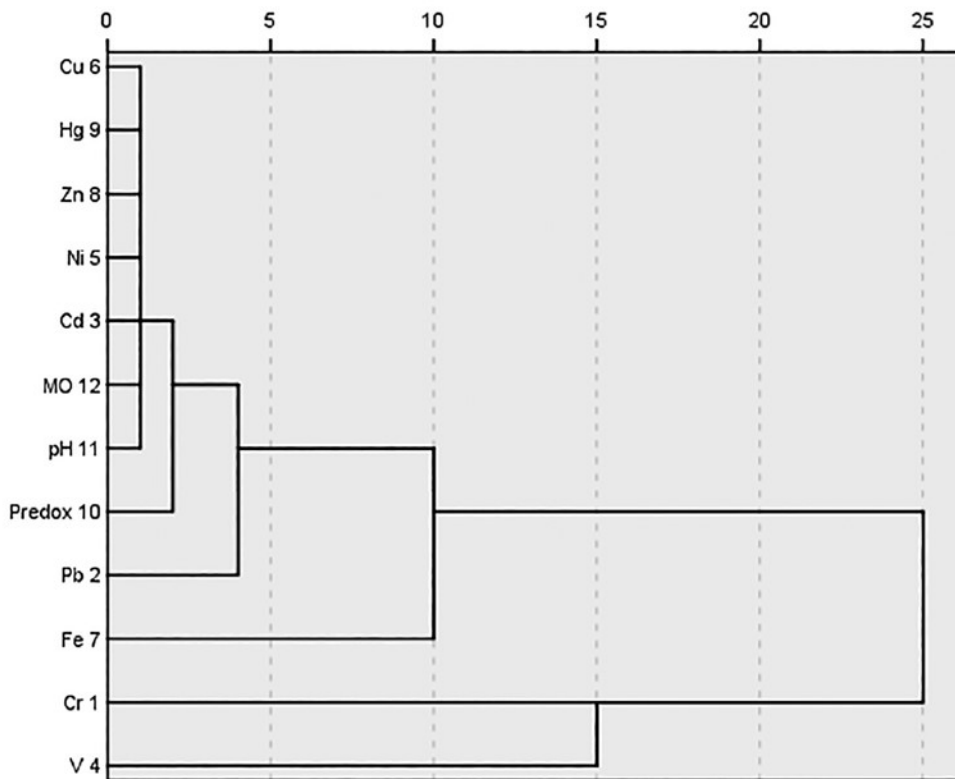


Figura 4. Dendograma de similitud que muestra la asociación entre los parámetros fisicoquímicos y metales en el sedimento.

El resultado del análisis de componentes principales es corroborado con los coeficientes de correlación lineal obtenidos a través de la matriz de correlación de Pearson, en la que se establecen relaciones muy significativas desde el punto de vista estadístico entre Cu y Fe ($r = 0.791$), Zn y Fe ($r = 0.723$), Pb y Zn ($r = 0.731$) y Zn y Cu ($r = 0.777$) (ver tabla 6), lo que sugiere fuentes de orígenes similares, como la remoción de tierra en las actividades mineras del carbón, las labores agrícolas, empleo de pesticidas, actividades pesqueras artesanales y residuos orgánicos marinos ricos en Cu, Zn y Fe. Se observa que los valores de IE para todos los metales son menores a 1, cifra que corresponde al nivel de “elementos no enriquecidos”, lo que indica que la concentración de estos metales en los sedimentos es propia de la corteza terrestre, es decir, se deriva de la composición de los suelos, sin que se descarte la contribución antropogénica descrita anteriormente. Según Ontario Ministry of the Environment (2008), Cr, Zn y Ni se encuentran en concentraciones por debajo de un nivel de contaminación ligera de los sedimentos, por lo que pueden ser toleradas por la mayoría de las especies bentónicas del sistema marino.

CONCLUSIONES

Las concentraciones de Cr, Cd, V, Zn, Cu, Ni, Pb y Hg en los sedimentos superficiales de las playas turísticas de La Guajira están asociadas directamente al aporte terrígeno y natural de esos metales en dichos ecosistemas.

Los metales pesados en los sedimentos superficiales de las playas turísticas en La Guajira, de acuerdo a su concentración, se presentan en el siguiente orden: Zn > Cr > Ni > V > Pb > Cu > Cd > Hg.

Según el análisis comparativo de los valores reportados por Sadiq (1992) para sedimentos no contaminados, la concentración de todos los metales es inferior a estos valores, a excepción del hierro, lo que indica que los sedimentos presentan una contaminación por este metal.

El resultado del índice de geoacumulación indica que en las playas turísticas de La Guajira no hay contaminación antropogénica de metales (sin tener en cuenta el hierro), por lo que sus valores negativos podrían ser de origen litogénico o existir anomalías geoquímicas en la zona.

La fauna acuática y el sustrato de las playas de La Guajira presentan concentraciones no elevadas de metales pesados, en ninguno de los casos sobrepasan la normativa nacional e internacional; de tal forma que los metales pesados tienen niveles tolerables que no implican un riesgo para los organismos del ecosistema marino. Estos metales, al compararlos entre sí, no presentan diferencias estadísticamente significativas, se encuentran inmovilizados en el sedimento, especialmente el Ni, Cu y Hg, y no están biodisponibles en el agua debido al pH elevado (8-9).

Es probable que bajo el sedimento estudiado aún permanezca un sustrato original no removido que ocasione un aumento en las concentraciones de metales; igualmente, es probable que las actividades antrópicas cercanas continúen generando un impacto en estas zonas.

REFERENCIAS

- Arúz, D., García, A., Rodríguez, F., y Zarate, M. (2013). Nivel de contaminación y distribución espacial de metales pesados en sedimentos superficiales de Bahía Damas, isla Coiba. *Revista de I + D Tecnológico*, 9(2), 14-23.
- Ávila, P., Ferreira, E., Salgueiro, A., y Farinha, J. (2008). Geochemistry and mineralogy of mill tailings impoundments from the Panasqueira mine (Portugal): Implications for the surrounding environment. *Mine Water Environ*, 27(4), 210-224.
- Barros, O. (2017). *Contaminación de las aguas marinas de La Guajira por la presencia de metales* (tesis de maestría). Universidad de La Guajira, Riohacha, Colombia.
- Bonilla, J., y González, C. (1992). Algunos aspectos geológicos y características químicas en los sedimentos de la laguna de Piritu, estado Anzoátegui, Venezuela. *Boletín del Instituto Oceanográfico de Venezuela*, 31, 45-55.
- Bonilla, J., y Lin, A. (1979). Materia orgánica de los sedimentos superficiales del golfo de Paría y Cariaco, Venezuela. *Boletín. Instituto Oceanográfico de Venezuela*, 18(1-2), 37-52.
- Cardwell, A., Hawker, D., y Greenway, M. (2002). Metal accumulation in aquatic macrophytes from southeast Queensland, Australia. *Chemosphere*, 48(7), 653-663.
- Ceballos, C. (2009). Estado de las playas en Colombia. En *Informe del estado de los Ambientes y Recursos Marinos y Costeros en Colombia año 2008* (pp. 149-156). Santa Marta, Colombia: Invemar.

- Cifuentes, J., Torres, P., y Frías, M. (2003). *El océano y sus recursos III. Las ciencias del mar: oceanografía física, matemáticas e ingeniería* (3ª edición). México D. F.: Editorial Fondo de Cultura Económica.
- Corporación Autónoma Regional de La Guajira. (2012). *Atlas ambiental del departamento de La Guajira*. Riohacha, Colombia: Corpoguajira
- Delgado, J. (2012). *Estudio de la contaminación por metales pesados en la cuenca baja del río Guadiana* (tesis de maestría). Departamento de Geología, Facultad de Ciencias Experimentales, Universidad de Huelva, Huelva, España
- Doria, C., y Vivas, J. (2016). Fuentes terrestres de contaminación en la zona costera de La Guajira, Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 7(1), 123-138.
- Food and Drug Administration. (2003). *Guidance for the Industry. Bioanalytical method validation*. EE. UU.: FDA.
- Garay, J., Martín, B., Ramírez, A., Vélez, A., Troncoso, W., Lozano, H., Acosta, J., Cadavid, B., Lancheros, A., Medina, O., y Rondón, M. (2012). *Diagnóstico y evaluación de la calidad ambiental marina. Red de vigilancia para la conservación y protección de las aguas marinas y costeras de Colombia. Informe técnico 2010*. Santa Marta, Colombia: Invemar.
- Garbanatti, M., González, P., Antón, R., y Mallea, M. (2005). Características fisicoquímicas, capacidad buffer y establecimiento de la línea base ambiental del Río Grande, San Luis, Argentina. *Revista ecológica Austral*, 15(1), 59-71.
- García, R. (2013). *Determinación de la concentración microbiológica de la playa arenosa del municipio de Riohacha, La Guajira* (tesis de pregrado). Facultad de Ingeniería, Universidad de La Guajira, Riohacha, Colombia.
- Gutiérrez-Galindo, F., Flores-Muñoz, M., Ortega-Lara, V., y Villaescusa-Celaya, J. (1994). Metales pesados en sedimentos de la costa fronteriza Baja California (México)-California (EUA). *Ciencias Marinas*, 20(1), 105-124.
- Hernández, J., y González, H. (1993). Metales pesados en la Bahía de Manatí, Cuba. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras-Invemar*, 22(1), 60-68.
- Hernández, Y., Cerecedo, M., Moreno, M., Alcalá, J., y Puga, S. (2008). Evaluación de la contaminación por metales pesados en embalses del estado de Chihuahua, México. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 4(2), 89-94.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2006). *Métodos analíticos del laboratorio de suelos*. Bogotá: IGAG
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2001). *El medio ambiente en Colombia* (2ª edición). Bogotá: IDEAM
- Investigaciones Marinas y Costeras “José Benito Vives de Andreis” y Ministerio del Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2011). *Desarrollo de fundamentos para el fortalecimiento de los parámetros y los límites permisibles de los vertimientos puntuales a las aguas marinas de Colombia*. Santa Marta, Colombia: Invemar y MADS.
- Márquez, J. (2001). *Algunos aspectos de la condición ambiental, la calidad del agua y sedimentos del Golfo de Santa Fe* (tesis de maestría). Departamento de Química, Universidad de Oriente, Cumaná, Venezuela.

- Moore, J., y Ramamoorthy, S. (1984). *Heavy metals in natural waters: applied monitoring and impact assessment*. New York: Springer-Verlog.
- Mudarra, O. (2002). *Hidroquímica de la ensenada de Puerto Escondido, estado Sucre, Venezuela* (tesis de maestría). Departamento de Química, Universidad de Oriente, Cumaná, Venezuela.
- Müller, G. (1979). Schwermetalle in den sedimenten des Rheins-Veränderungen seit 1971. *Umschau*, 79, 778-783.
- Ontario Ministry of the Environment. (2008). *Guidelines for identifying, assessing and managing contaminated sediments in Ontario: an integrated approach*. Recuperado de <http://www.ene.gov.on.ca/publications/6658e.pdf>.
- Orozco, C., Pérez, A., González, M., Rodríguez, F., y Alfayete J. (2005). *Contaminación ambiental. Una visión desde la química* (1ª edición). España: Editorial Thomson Editores Span.
- Palacio, P. (2007). *Ecotoxicología acuática* (1ª edición). Medellín, Colombia: Universidad de Antioquia.
- Perales, J., Garrido, C., y Ramírez, M. (2012). *Definición y desarrollo de controles de investigación para determinar la magnitud de la contaminación accidental y de los impactos producidos por episodios contaminantes en el litoral andaluz* (informe final). Departamento de Ingeniería Química, Tecnología de Alimentos y Tecnologías del Medio Ambiente, Universidad de Cádiz, Cádiz, España.
- Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente. (2009). *Perspectiva regional sobre las fuentes de contaminación de origen terrestre en la región del Gran Caribe* (informe técnico del PAC n.º 33). Kingston: PNUMA.
- Quintero, L., Agudelo, E., Quintana, Y., Cardona, S., y Osorio, A. (2010). Determinación de indicadores para la calidad de agua, sedimentos y suelos, marinos y costeros en puertos colombianos. *Gestión y Ambiente*, 13(3), 51-64.
- Ravanelli, N., Turbertini, O., Valcher, S., y Martioni, W. (1997). Heavy metal distribution in sediment cores from western Ross Sea (Antarctica). *Water, Air and Soil Pollution*, 99(1-4), 697-704.
- Rodríguez, E., Romero, D., Martínez, G., Fermín, I., y Senior, W. (2012). Influencia del río Manzanares en la biodisponibilidad de metales pesados (Co, Cr, Pb, Zn) en la zona costera frente a la ciudad de Cumaná, estado Sucre, Venezuela. *Avances en Química*, 7(1), 57-63.
- Sadiq, M. (1992). *Toxic metal chemistry in marine environments*. New York: Marcel Dekker Inc.
- Taylor, S. (1964). Abundance of chemical elements in the continental crust, a new table. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 28(8), 1273-1285.
- Taylor, P. (1993). The state of marine environment: a critique of the work and role of the Joint Group of Experts on Scientific Aspect of Marine Pollution (GESAM). *Mar. Poll. Bull.*, 26(3), 120-127.
- Vivas-Aguas, L., Tomic, M., Narváez, S., Cadavid, B., Bautista, P., Betancourt, J., Parra, J., Carvajalino, M., y Espinosa, L. (2011). *Diagnóstico y evaluación de la calidad ambiental marina en el Caribe y Pacífico colombiano 2010*. Santa Marta, Colombia: Redcam-Invemar.
- Vivas-Aguas, J., Espinosa, L., Sánchez, J., Cadavid, B., Bautista, P., Quintero, P., Betancourt, J., Parra, J., Parra, L., Cuadrado, I., e Ibarra, K. (2012). *Diagnóstico y evaluación de la calidad ambiental marina en el Caribe y Pacífico colombiano 2011*. Santa Marta, Colombia: Redcam-Invemar.

ESTADO DEL ARTE DE CORRELACIONES PARA EL MODELAMIENTO DEL FENÓMENO DE TRANSFERENCIA DE MASA EN COLUMNAS DE EXTRACCIÓN LÍQUIDO-LÍQUIDO

STATE OF THE ART IN CORRELATIONS FOR MASS TRANSFER MODELING IN LIQUID-LIQUID EXTRACTION COLUMNS

Sebastian Gómez Páez*

Recibido: 8 de agosto de 2018

Aceptado: 7 de noviembre de 2018

Resumen

El modelo tradicional de ecuaciones MESH no contempla los fenómenos de transferencia de masa, los cuales están presentes en operaciones de separación y, desde un punto de vista más riguroso, deben ser tenidos en cuenta para una simulación más exitosa a la hora de proponer el diseño real de un equipo de esta índole. Numerosas teorías han sido propuestas para el modelamiento de este fenómeno, de las que se han derivado ecuaciones netamente teóricas y empíricas que a la fecha no han logrado reducir el error promedio en la estimación del 20 %, según la amplia literatura consultada. En este documento se presenta el estado del arte de las correlaciones disponibles para el modelamiento del fenómeno de transferencia de masa en columnas de extracción, incluyendo modelos de difusividad a dilución infinita en soluciones concentradas, coeficientes de transferencia de masa y cálculo de propiedades, que posteriormente pueden ser útiles para el modelamiento de columnas de extracción por ecuaciones MERSHQ.

Palabras claves: difusión, coeficientes de transferencia de masa, formación de gotas, ascenso de gotas, propiedades.

Abstract

MESH equations model does not contemplate the mass transfer phenomena across the interphase in fluid-fluid separation operations even when they are present, nevertheless, there must be included when a rigorous simulation is going to be carried out in order to propose a real separation operation design. Several theories have been proposed (with deviations about 20 %) for the mass transfer coefficient estimation resulting in both theoretical and empirical equations in the last fifty years. It is presented a state of the art about the available correlations for the mass transfer modeling in liquid-liquid extraction columns, that is: models for the infinite dilution diffusion coefficient, concentrated-solution diffusion coefficient, mass transfer coefficient and some properties calculation, which is considered useful for the MERSHQ model in liquid-liquid extraction columns

Keywords: diffusion, mass transfer coefficient, drop formation, drop rising, properties.

* Ingeniero Químico, estudiante de Maestría en Ciencia y Tecnología Química. Grupo de investigación Procesos de Separación no Convencionales, UNED, Madrid, España. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3798-2728>. sebas.sandin@gmail.com/sgomez935@alumno.uned.es

INTRODUCCIÓN

La teoría de la película es la preferida para incluir el fenómeno de transferencia de masa en interfaces fluido-fluido (Taylor y Krishna, 1993), ya que ha mostrado resultados interesantes a la hora de incluirse en operaciones de separación para hacer correcciones por condiciones de no equilibrio (Taylor, Krishna y Kooijman, 2003). El principio físico se basa en la suposición de que todos los fenómenos de transferencia de masa difusivos y convectivos se dan en una película delgada o capa que divide las fases en contacto (en el caso de extracción: refinado y extracto) en dos regiones: *bulk* (conocida también como seno del fluido) e interface. Es necesario aclarar que cada región tiene unas condiciones particulares de temperatura, presión y composición. La figura 1 representa gráficamente esta teoría.

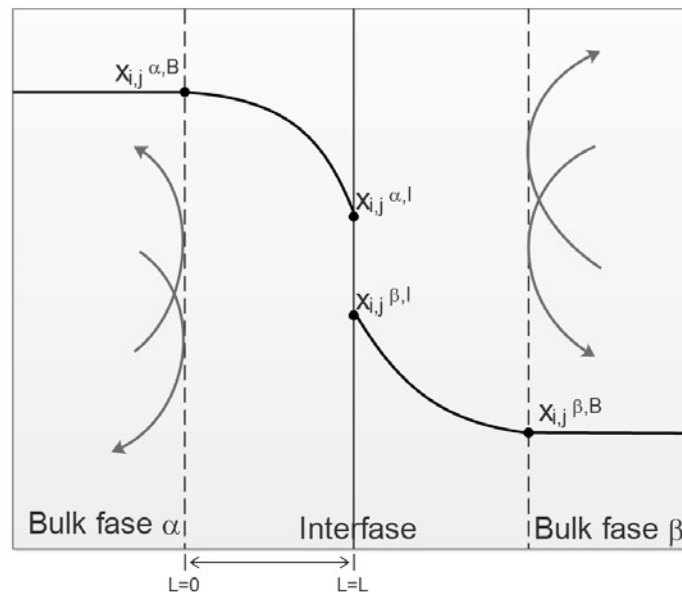


Figura 1. Representación gráfica de la teoría de la película.

Fuente: Gómez (2017).

Se observa que entre $L = 0$ y $L = L$ ocurren los fenómenos de transferencia de masa que gobiernan este tipo de sistemas, tanto en la fase a como b. Ahora bien, es necesario conocer qué tipo de fenómenos suceden en esta capa; según algunas investigaciones (Rocha, Humphrey y Fair, 1986; Seibert y Fair, 1993; Skelland y Conger, 1973), existen tres tipos de fenómenos: formación, transporte y coalescencia de gotas. La formación de gotas tiene lugar cuando algunas moléculas de la fase continua, por ejemplo, empiezan a migrar hacia la dispersa (esto dependerá de las fuerzas impulsoras), formándose gotas de fase continua que se irán transfiriendo hasta lograr alguna condición de equilibrio. El transporte de gotas ocurre principalmente cuando las gotas, una vez formadas, empiezan a ascender (fase liviana) o descender (fase pesada) a lo largo de la columna de extracción. Finalmente, la coalescencia se da cuando hay gotas que eventualmente pueden unirse entre sí en la misma fase.

Claramente, modelar estos fenómenos requiere de procedimientos experimentales. Este trabajo se basa en citar las correlaciones más significativas producto de la experimentación que han sido publicadas en la literatura abierta de alto prestigio; aquí se presentan los modelos de Rocha et ál. (1986), Seibert y Fair (1993) y Skelland y Conger (1973), estudios clásicos que permiten incluir

los tres fenómenos mencionados con anterioridad. No obstante, en este análisis se especifica cómo proceder en cada uno de los términos necesarios para implementar estas correlaciones, esto es: cálculo de difusividades, propiedades y especificación de parámetros de diseño.

MARCO TEÓRICO

El modelamiento del fenómeno transferencia de masa mediante la teoría de la película se da con base en la ecuación 1 (Krishnamurthy y Taylor, 1985; Lao, Kingsley, Krishnamurthy y Taylor, 1989; Lao y Taylor, 1994; Sridhar y Torres, 1998; Zimmermann, Gourdon, Joulia, Gorak y Casamatta, 1992), la cual se basa en la diferencia de concentraciones de *bulk* e interface como fuerza motriz.

$$N_i^\beta = C^\beta k_{i,j}^\beta a (x_i^{i,\beta} - x_i^{B,\beta}) + x_i^{I,\beta} N_i^\beta \quad (1)$$

El eje central de este trabajo es numerar las correlaciones disponibles más clásicas y relevantes para la estimación de $k_{i,j}^\beta$, es decir, el coeficiente de transferencia de masa total del par *i-j* en la fase b, el cual, se supone, incluye los tres fenómenos: formación, ascenso/descenso y coalescencia de gotas; fenómenos que dependen de los cálculos de coeficientes de difusión, propiedades y parámetros de diseño del equipo u operación a simular.

Correlaciones para la estimación de coeficientes de difusión a dilución infinita

Una de las formas para estimar una propiedad, bien sea termodinámica o de transporte, es haciendo cálculos de esta en pares binarios cuando la composición de una de las especies se vuelve despreciable, es decir, en condiciones de dilución infinita. El primer modelo es mostrado en la ecuación 2 y fue propuesto por Stokes y Einstein (Edward J.T, 1970); este modelo es netamente teórico y sólo es válido cuando las moléculas que se difunden son muy grandes respecto a las del solvente, por ello tiende a fallar en la mayoría de casos. Uno de los métodos más conocidos es el de Wilke y Chang (1955) (ecuación 3), a pesar de que tenga altos porcentajes de error, según lo mostrado por Suárez-Iglesias, Medina, Pizarro y Bueno (2007). Los métodos propuesto por Hayduk y Minhas (1982) (ecuación 4), Tyn y Calus (1975) (ecuación 5) y Siddiqi y Lucas (1986) tienen errores promedio entre el 10 y 30 % en la estimación de los coeficientes de difusión a dilución infinita; sin embargo, aún se consideran confiables para simulación de columnas de extracción líquido-líquido (Sanpui y Khanna, 2003; Gómez, 2017).

$$\frac{D_{A-B\mu B}^\infty}{T} = \frac{k_B}{6\pi r_A} \quad (2)$$

$$D_{A-B}^\infty = 7.4 \times 10^{-8} \left[\frac{(\varphi_B M_B)^{\frac{1}{2}} T}{\mu_B V_A^{0.6}} \right] \quad (3)$$

$$D_{A-B}^\infty = 1.55 \times 10^{-8} V_B^{-0.23} \mu_B^{-0.92} P_B^{0.5} P_A^{-0.42} T^{1.29} \quad (4)$$

$$D_{A-B}^{\infty} = 8.93 \times 10^{-8} V_A^{1/6} V_B^{-1/3} \mu_B^{-3} \mu_B^{-1} \left(\frac{P_B}{P_A} \right)^{0.6} T \quad (5)$$

Un modelo particularmente interesante es el presentado por Laddha y Degaleesan (1978), planteado por Laddha y Smith (1969) para varios experimentos con desviaciones promedio del 13 %, lo cual, desde el punto de vista práctico, resulta de considerar viable su aplicación en columnas de extracción. Hay que tener en cuenta que el término a_o tiene un valor de 1.06×10^{-9} cuando el agua es el soluto y de 1.892×10^{-9} para solutos diferentes al agua. Este modelo resulta de una adaptación de la ecuación de Stokes y Einstein, que relaciona el radio de las moléculas de solvente con los volúmenes molares del soluto y solvente.

$$\frac{D_{A-B\mu B}^{\infty}}{T} (V_A)^{\frac{1}{3}} = a_o \left(\frac{V_B}{V_A} \right)^{0.16} \quad (6)$$

Con base en las ecuaciones descritas se puede realizar la estimación de estos coeficientes para luego aplicarlos en las soluciones concentradas, es decir, en un caso más cercano a la realidad. Claramente, hay correlaciones más recientes, como las presentadas por Hsu, Tang y Chen (2000), Safi, Nicolas, Neau, y Chevalier (2008), Safi, Nicolas, Neau, y Escandell (2010) y Suárez-Iglesias et ál. (2007), que provienen de métodos de contribución o netamente probabilísticos. En algunos casos se pueden obtener resultados con desviaciones menores al 10 %; según la literatura al respecto, esto dependerá de la naturaleza del sistema y de la eficacia del procedimiento de cálculo.

COEFICIENTES DE DIFUSIÓN EN SOLUCIONES CONCENTRADAS

Es de esperarse que los coeficientes de difusión dependan no solo de la temperatura y la naturaleza química del sistema, sino también de la composición (Taylor y Krishna, 1991). Por esto se han propuesto correlaciones que permiten corregir las condiciones de dilución infinita, entre las que está la media molar simple de Caldwell y Babb (1956), Dullien y Asfour (1985), Leffler y Cullinan (1970), Vignes (1966) y Taylor, Kooijman y Hung (1994), descritas en las ecuaciones 7 a 10, respectivamente. Según Taylor y Krishna (1993), estas correlaciones dependen del sistema; por ejemplo, las que incluyen viscosidad se podrían aplicar a sistemas en que las especies A y B pudieran tener viscosidades muy diferentes. Antes de continuar, se considera adecuado diferenciar el coeficiente de difusión de Fick y el de Maxwell-Stefan; a grandes rasgos, al primero lo gobierna la ley correspondiente a este fenómeno y se refiere a qué tan fácil se da el transporte de un compuesto en un medio; el segundo alude a un tipo de coeficiente de arrastre y su inverso hace referencia a la fricción entre moléculas en un proceso difusivo (Alzate y Gómez, 2008; R. Taylor y Krishna, 1993).

$$D_{A-B} = X_B D_{A-B}^{\infty} + X_A D_{A-B}^{\infty} + X_A D_{B-A}^{\infty} \quad (7)$$

$$D_{A-B} = D_{A-B}^{\infty} X_B + D_{B-A}^{\infty} X_A \quad (8)$$

$$(D_{A-B}\mu_{mix}) = (D_{A-B}^{\infty}\mu_B)^{x_B} + (D_{B-A}^{\infty}\mu_B)^{x_A} \quad (9)$$

$$\left(\frac{D_{A-B}}{\mu_{mix}}\right) = \left(\frac{D_{A-B}^{\infty}}{\mu_B}\right)^{x_B} + \left(\frac{D_{B-A}^{\infty}}{\mu_B}\right)^{x_A} \quad (10)$$

Ahora, se considera necesario diferenciar si las ecuaciones 2 a 10 aplican para el coeficiente de difusión de Fick o de Maxwell-Stefan; para ello se plantea la ecuación 11, la cual permite relacionarlos:

$$D = \mathfrak{D} \Gamma \quad (11)$$

El término D es el coeficiente de Fick y \mathfrak{D} el de Maxwell-Stefan; por su parte, Γ hace referencia a la corrección por no idealidad o *factor termodinámico*, presente principalmente en sistemas líquidos (Kooijman y Taylor, 1991; Mori, Oda, Ito, Aragaki y Liu, 1996; Şenol, 2001). El primero es función de la composición aún más notoriamente que el segundo; sin embargo, en condiciones de dilución infinita, el factor termodinámico tiende a la unidad, por tanto el coeficiente de Fick y de Maxwell-Stefan son iguales, es decir, las ecuaciones 2 a 6 sirven para cualquiera de estos; no obstante, cuando se trata de soluciones concentradas, las ecuaciones 7 a 10 se pueden aplicar para el de Fick o de Maxwell-Stefan, esto solo dependerá del sistema y su naturaleza química (Taylor y Krishna (1993). Sin embargo, estos referentes proponen un modelo específico para el de Maxwell-Stefan, que se muestra en la ecuación 12 y que tiene como base los trabajos de Kooijman y Taylor (1991) y Wesselingh y Krishna (1990).

$$\mathfrak{D}_{A-B} \left(D_{A-B}^{\infty} \frac{1+x_B-x_A}{2} \right) \left(D_{B-A}^{\infty} \frac{1+x_A-x_B}{2} \right) \quad (12)$$

La ecuación 12 es útil para estimar los coeficientes de difusión de Maxwell-Stefan, que posteriormente serán necesarios en las correlaciones para los de transferencia de masa, según el trabajo de Lao et ál. (1989). Es necesario insistir en que los coeficientes de Fick incluyen no idealidad y pueden ser multicomponente, mientras que los de Maxwell-Stefan pueden trabajarse por pares binarios, representando una gran ventaja a la hora de modelar el fenómeno de transferencia de masa en columnas de extracción. Por otro lado, trabajos más recientes, como los de Bosse y Bart (2006), presentan modelos para estimar el coeficiente de Fick con la energía de Gibbs en exceso; sin embargo, solo ha tenido éxito en sistemas binarios y no se han encontrado reportes en multicomponente.

Estimación de propiedades

Este es uno de los factores más importantes a la hora de modelar el fenómeno de transferencia de masa en equipos de separación, ya que con base en este se calculan los coeficientes de difusión y transferencia de masa, limitando las dimensiones de los equipos y los rangos de aplicación de las correlaciones en cuestión. Las ecuaciones 13 y 14 muestran formas –no obstante ideales– de determinar la densidad y viscosidad de una mezcla, con buenos resultados según la experiencia de los autores.

$$\rho_{mix} = \sum_{i=1}^c X_i \rho_i \quad (13)$$

$$\ln(\mu_{mix}) = \sum_{i=1}^c X_i \ln(\mu_i) \quad (14)$$

En el caso particular de la viscosidad, existen numerosas formas de hacer correcciones por no idealidad, como el modelo de UNIVISCO y ASOG-VISCO (Tochigi, Yoshino y Rattan, 2005; Xu, Tang, Li, y Zhu, 2016).

El trabajo de Taylor et ál. (1994) muestra diferentes correlaciones para estimar densidades, viscosidades y tensiones superficiales para sustancias puras y mezclas. Otra alternativa es extraerlas mediante simuladores como Aspen Plus®, a partir de regresiones de datos experimentales en la base de datos DECHEMA.

Coefficientes de transferencia de masa

Según el trabajo de Sanpui y Khanna (2003), aún es práctico emplear las correlaciones de Rocha et ál. (1986), Seibert y Fair (1993) y Skelland y Conger (1973), aun cuando sus desviaciones promedio son del orden del 20 %. Particularmente, el primero incluye la coalescencia de gotas; no obstante, los dos últimos productos de sus investigaciones lo excluyen. En primer lugar, se presenta el modelo de Skelland y Conger (1973) en las ecuaciones 15 a 20; la 19a se refiere a gotas circulantes no oscilantes y la 19b alude a las oscilantes; lo mismo para la 20, profundizado con más detalle por Skelland (1974), que es seguida por la de Rocha et ál. (1986) en las ecuaciones 21 a 24 y por la de Seibert y Fair (1993) en las 25 a 29.

$$k_{i,j}^{FG,D} = 0.0423 \left(\frac{d_p}{t_f} \right) \left(\frac{U_o^2}{d_p g} \right)^{0.089} \left(\frac{d_p^2}{D_{i-j}^D t_f} \right)^{-0.334} \left(\frac{\mu_{mix}^D}{\sqrt{\rho_{mix}^D d_p \sigma_{mix}}} \right)^{-0.6} \quad (15)$$

$$k_{i,j}^{FG,C} = 0.386 \left(\frac{D_{i-j}^C}{t_f} \right)^{0.5} \left(\frac{\rho_{mix}^C \sigma_{mix}}{\Delta \rho g t_f \mu_{mix}^C} \right)^{0.407} \left(\frac{g t_f}{d_p} \right)^{0.148} \quad (16)$$

$$k_{i,j}^{CG,D} = 0.173 \left(\frac{d_p}{t_f} \right) \left(\frac{\mu_{mix}^D}{\rho_{mix}^D D_{i-j}^D} \right)^{-1.115} \left(\frac{\Delta \rho g d_p^2}{\sigma_{mix}} \right)^{1.302} \left(\frac{U_s^2 t_f}{D_{i-j}^D} \right)^{0.146} \quad (17)$$

$$k_{i,j}^{CG,C} = 0.5959 \left(\frac{D_{i-j}^C}{t_f} \right)^{1/2} \left(\frac{\rho_{mix}^C U_s^3}{g \mu_{mix}^C} \right)^{0.332} \left(\frac{d_p^2 \rho_{mix}^D \rho_{mix}^C U_s^3}{\mu_{mix}^C \sigma_{mix}} \right)^{0.525} \quad (18)$$

$$k_{i,j}^{A/DG,D} = 31.4 \left(\frac{D_{i-j}^D}{d_p} \right) \left(\frac{4D_{i-j}^D t_{A/D}}{d_p^2} \right)^{-0.34} \left(\frac{\mu_{mix}^D}{\rho_{mix}^D D_{i-j}^D} \right)^{-0.125} \left(\frac{d_p \rho_{mix}^C U_s^2}{\sigma_{mix}} \right)^{0.37} \quad (19a)$$

$$k_{i,j}^{A/DG,D} = 0.32 \left(\frac{D_{i-j}^D}{d_p} \right) \left(\frac{4D_{i-j}^D t_{A/D}}{d_p^2} \right)^{-0.14} \left(\frac{d_p U_s \rho_{mix}^C}{\mu_{mix}^C} \right)^{0.68} \left(\frac{\sigma_{mix}^3 \rho_{mix}^C}{g \mu_{mix}^C \Delta \rho} \right)^{0.1} \quad (19b)$$

$$k_{i,j}^{A/DG,C} = 0.725 \left(\frac{d_p U_s^2 \rho_{mix}^C}{\mu_{mix}^C} \right)^{-0.43} \left(\frac{\mu_{mix}^C}{\rho_{mix}^C D_{i-j}^C} \right)^{-0.58} U_s (1 - \phi) \quad (20a)$$

$$k_{i,j}^{A/DG,C} = \left(\frac{D_{i-j}^C}{d_p} \right) \left[50 + 0.0085 \left(\frac{d_p U_s \rho_{mix}^C}{\mu_{mix}^C} \right) \left(\frac{\mu_{mix}^C}{\rho_{mix}^C D_{i-j}^C} \right)^{0.7} \right] \quad (20b)$$

$$k_{i,j}^{FG,D} = \left(\frac{D_{i-j}^D U_o}{d_p} \right)^{0.5} \left(-6.0 + 0.07We + 6.5 \frac{\sigma_{ref}}{\sigma_{mix}} \right) \quad (21)$$

$$k_{i,j}^{FG,C} = \left(\frac{D_{i-j}^C U_o}{d_p} \right)^{0.5} \left(-6.0 + 0.07We + 6.5 \frac{\sigma_{ref}}{\sigma_{mix}} \right) \quad (22)$$

$$k_{i,j}^{A/DG,D} = \left(\frac{0.00375 U_s}{1 + \frac{D_{i-j}^D}{\mu_{mix}^C}} \right) (0.7 + 0.02We) \quad (23)$$

$$k_{i-j}^{A/DG,C} = \left[0.725 U_s (1 - \phi) \left(\frac{d_p U_s \rho_{mix}^C}{\mu_{mix}^C} \right)^{-0.43} \left(\frac{\mu_{mix}^C}{\rho_{mix}^C D_{i-j}^C} \right)^{-0.58} \right] (0.7 + 0.02We) \quad (24)$$

$$k_{i-j}^{FG,D} = 1.3 \left(\frac{D_{i-j}^D}{t} \right)^{0.5} \quad (25)$$

$$k_{i-j}^{FG,D} = 1.3 \left(\frac{D_{i-j}^D}{t} \right)^{0.5} \quad (26)$$

$$k_{i-j}^{A/DG,D} = 0.023U_s \left(\frac{\mu_{mix}^D}{\rho_{mix,j}^D D_{i-j}^D} \right)^{-0.5} ; \left\{ \frac{\left(\frac{\mu_{mix}^D}{\rho_{mix,j}^D D_{i-j}^D} \right)^{0.5}}{1 + \frac{\mu_{mix}^D}{\mu_{mix}^C}} \right\} > 6 \quad (27a)$$

$$k_{i-j}^{A/DG,D} = \left(\frac{0.00375U_s}{1 + \frac{\mu_{mix}^D}{\mu_{mix}^C}} \right) ; \left\{ \frac{\left(\frac{\mu_{mix}^D}{\rho_{mix,j}^D D_{i-j}^D} \right)^{0.5}}{1 + \frac{\mu_{mix}^D}{\mu_{mix}^C}} \right\} < 6 \quad (27b)$$

$$k_{i-j}^{A/DG,D} = 0.698 \left(\frac{D_{i-j}^C}{d_p} \right) \left(\frac{d_p U_s \rho_{mix,j}^C}{\mu_{mix,j}^C} \right)^{0.5} \left(\frac{\mu_{mix,j}^C}{\rho_{mix,j}^C D_{i-j}^C} \right)^{0.4} (1 - \phi) \quad (28)$$

Antes de continuar es necesario diferenciar las dos formas de las ecuaciones 19 y 20, ya que para conocer cuál variante se debe usar hay que determinar si las gotas son no oscilantes circulares u oscilantes. Al respecto, los trabajos de Grace, Wairegi y Nguyen (1976), Hu y Kinter (1955), Johnson y Braida (1957) y Klee y Treybal (1956) pueden ser consultados. De las ecuaciones 15 a 28 se pueden derivar dos términos interesantes que se han encontrado particularmente diferenciados en la literatura, ya que existen numerosas correlaciones para su estimación: el *hold-up* y diámetro de partícula. En estos casos, Skelland y Conger (1973) proponen un procedimiento iterativo gráfico según la investigación de Zenz (1957) para el *hold-up* y según Scheele y Meister (1968) para el diámetro de partícula. Rocha et ál. (1986) y Seibert y Fair (1993) proponen procedimientos iterativos para el *hold-up* y ecuaciones sencillas para los diámetros de partícula. Las ecuaciones 29 y 30 aplican para el primero y 31 y 32 para el segundo.

$$\frac{d_p}{d_o} = 1.591 \left(\frac{U_o^2 \Delta \rho d_o}{\sigma_{mix}} \right)^{-0.068} \left(\frac{\Delta \rho d_o^2 g}{\sigma_{mix}} \right)^{-0.278} \quad WE < 2 \quad (29a)$$

$$\frac{d_p}{d_o} = 1.546 \left(\frac{U_o^2 \Delta \rho d_o}{\sigma_{mix}} \right)^{-0.021} \left(\frac{\Delta \rho d_o^2 g}{\sigma_{mix}} \right)^{-0.214} \quad WE > 2 \quad (29b)$$

$$\frac{U^D}{\phi} + \frac{U^C}{1-\phi} - \left(2.725 \frac{\Delta \rho d_p g}{\rho_{mix}^C} \right)^{0.5} \left(\frac{1-\phi}{1+\phi^{1/3}} \right)^{0.917} = 0 \quad (30)$$

$$d_p = 1.15 \eta \left(\frac{\sigma_{mix}}{\Delta \rho g} \right) \quad (31)$$

$$\phi - \frac{U^D}{U_{so} e^{-1.92\phi} - \frac{U^C}{1-\phi}} = 0 \quad (32)$$

En la ecuación 32 el término U_{so} se refiere velocidad característica de deslizamiento en la película; por su parte, su procedimiento de cálculo puede ser revisado en la literatura (Scheid, Puget, Halasz, y Massarani, 1999; Seibert y Fair, 1988; Seibert y Fair, 1993). Es de esperarse que existan otras formas de determinar estos parámetros; por ejemplo, para el diámetro de partícula, según las correlaciones presentadas por Kumar y Hartland (1984) y Laddha y Degaleesan (1978), se usan las ecuaciones 33 y 34, respectivamente. Por otro lado, Laddha y Degaleesan (1978) también proponen un método para calcular el *hold-up* iterativamente (ecuaciones 35 y 36), a diferencia del de Sá, Góis, y Cavalcanti, (2010), que es de carácter correlacional (ecuación 37).

$$d_p = 1.592 \left(\frac{U_o^2}{2gd_o} \right)^{-0.0665} \left(\frac{\sigma_{mix}}{\Delta\rho g} \right)^{0.5} \quad (33)$$

$$d_p = d_o E_{\sigma}^{-0.4} \left[2.13 \left(\frac{\Delta\rho}{\rho_{mix}^D} \right)^{0.67} + e^{-0.13F_r} \right]; E_{\sigma} < 0.4 \quad (34a)$$

$$d_p = d_o E_{\sigma}^{-0.42} [1.24 + e^{-F_r^{0.42}}]; E_{\sigma} \geq 0.4 \quad (34b)$$

$$\phi(1-\phi) - \frac{U^D}{U_c} = 0 \quad (35)$$

$$U_c = 1.088 \left(\frac{U_o^2}{2gd_o} \right)^{-0.0818} \left(\frac{\sigma_{mix} \Delta\rho g}{\rho_{mix}^C 2} \right)^{0.25} \quad (36)$$

$$\phi = \left(\frac{L}{d_i^c} \right)^{-0.52} \left(\frac{U^D d_i^c \rho_{mix}^D}{\mu_{mix}^D} \right)^{0.73} \left(\frac{U^C d_i^c \rho_{mix}^C}{\mu_{mix}^C} \right)^{-0.2} \left(\frac{U^{D^2}}{d_i^c g} \right)^{-0.02} \quad (37)$$

$$E_{\sigma} = \frac{\Delta\rho g d_o^2}{\sigma_{mix}} \quad (38)$$

$$F_r = \frac{U_o^2}{gd_o} \quad (39)$$

Con base en las correlaciones presentadas con anterioridad, es necesario identificar el área a la cual está referido cada fenómeno de transferencia de masa para la formación de gotas. Skelland y Conger (1973) y Skelland (1974) proponen que esta área se asocie a la de los derramaderos o 3/5 de esta misma; no obstante, Rocha et ál. (1986) y Seibert y Fair (1993) (también este primero, después de un análisis detallado) coinciden en que esta área puede ser calculada según la ecuación 40, en la que se ve involucrado el diámetro de partícula y un parámetro de diseño como el número de agujeros. El área interfacial asociada al ascenso/descenso de gotas se muestra en la ecuación 41; correlación que, según Rocha et ál. (1986), Seibert y Fair (1993), Skelland y Conger (1973) y

Skelland (1974), es apropiada para este cálculo. Particularmente, se puede observar que se incluye el *hold-up* y el término h_c , que hace referencia a la altura de la capa donde se da este fenómeno y que se muestra en la ecuación 43a para Rocha et ál. (1986) y 42b para Seibert y Fair (1993), en el que se incluyen los efectos asociados a tensión superficial, disposición y tamaño de orificios y derramaderos (Skelland, 1974).

$$a^{FG} = N_p \pi d_p^2 \quad (40)$$

$$a^{ADG} = \frac{6\phi}{d_p} (A_{cot} - A_{der})(H_t - h_c) \quad (41)$$

$$h_c = \frac{0.5 \rho_{mix}^D U_o^2}{\Delta \rho g \left(1 - \frac{0.71}{\log(\text{Re})}\right)^2} + \frac{2.47 \rho_{mix}^C U_{der}^2}{\Delta \rho g} + \frac{17.72 \sigma_{mix} (\mu_{mix}^C)^{0.2} (\mu_{mix}^D)^0}{\Delta \rho g d_o^{1.4}} \quad (42a)$$

$$h_c = \frac{0.5 \rho_{mix}^D U_o^2}{\Delta \rho g \left(1 - \frac{0.71}{\log(\text{Re})}\right)^2} + \frac{2.47 \rho_{mix}^C U_{der}^2}{\Delta \rho g} + \frac{3.2 \sigma_{mix} \left(\frac{d_o^2 \Delta \rho g}{\sigma_{mix}}\right)}{d_o \Delta \rho g} \quad (42b)$$

$$\text{Re} = \frac{d_o U_o \rho_{mix,j}^D}{\mu_{mix}^D} \quad (43)$$

DISCUSIÓN Y COMENTARIOS

Los modelos, constantes y correlaciones presentados en este trabajo forman parte de una investigación rigurosa sobre cálculo de propiedades, que es uno de los pasos fundamentales a la hora de simular columnas de separación, en este caso, líquido-líquido. Aunque a la fecha no se han encontrado documentos concisos con muestras de cálculo de coeficientes de transferencia de masa en columnas de platos perforados, algunos autores (Rocha et ál., 1986; Seibert y Fair, 1993) presentan datos de difusividad, viscosidad y densidad que permiten analizar si los métodos expuestos aquí son acordes a los datos experimentales. No obstante, el único documento con muestras de cálculo encontrada fue el de Seibert y Fair (1988), pero en columnas empacadas, en el que los resultados fueron del orden de 10^{-3} cm/s. A esto hay que agregarle que uno de los documentos más controversiales de la literatura encontrado hasta el momento fue el publicado por Krishna, Nanoti y Goswami (1989), en el que se critica el modelo de Rocha et ál. (1986) por sobreestimar el efecto por formación de gotas (gracias a la inclusión del factor que involucra el número de Webber) y subestimar la eficiencia global cuando hay altas zonas de ascenso/descenso de gotas.

Un análisis cronológico ubica estas correlaciones en del siglo pasado, salvo la de Sá et ál. (2010); no obstante, existen documentos recientes que aun consideran válidas algunas de estas (Asadollahzadeh, Torab-Mostaedi, Torkaman y Safdari, 2016; Sanpui y Khanna, 2003; Sanpui, Singh y Khanna, 2004; Springer, 2004; Stella, Mensforth, Bowser, Stevens y Pratt, 2008; Tang, Zhang, Cai y Wang, 2013; Taylor et ál., 2003; Usman et ál., 2009; Yadav y Patwardhan, 2009).

Otros autores (Saien y Daliri, 2014; Wegener, Paul y Kraume, 2014) han ajustado estadísticamente el número de Sherwood local, es decir, aplican a lo largo de toda la película si se supone que se incluyen los tres fenómenos de transferencia de masa a sus experimentos, sin dejar de lado la esencia detrás de este importante número adimensional.

Otro método clásico-teórico para la estimación de los coeficientes de transferencia de masa, que evita incluir parámetros de diseño, es presentado por Taylor y Krishna (1993); sin embargo, este método implica conocer el espesor de la película donde se da la transferencia de masa (figura 1), cantidad que ha sido difícil de modelar según los autores. A esto se suma el hecho del extenso cálculo de eigenvalores en las matrices de Maxwell-Stefan para el coeficiente de difusión de Fick, ya que es con base en este que se realiza el proceso de cálculo. Teniendo en cuenta lo anterior, se recomienda tener una base amplia de correlaciones para la estimación de propiedades; para ello se pueden consultar otros documentos importantes, como los de Kumar y Hartland (1996; 1999), que son los autores que más han trabajado en el tema, con el fin de comparar, según rangos de aplicabilidad, desviaciones promedio y tiempo de cómputo.

SÍMBOLOS Y ABREVIACIONES REPRESENTADOS EN EL S.I

Símbolos

N	Flux molar
c	Concentración
k	Coefficiente de transferencia de masa
a	Área superficial
x	Fracción molar
N_t	Flux molar total
T	Temperatura
r	Radio promedio molecular
μ	Viscosidad
M	Masa molar
ϕ	Factor de asociación
V	Volumen
D_{A-B}^∞	Difusividad entre A y B a dilución infinita
P	Parachute
V	Volumen molar
a_o	Factor correlacional
D_{A-B}	Difusividad entre A y B en soluciones concentradas
D	Matriz de coeficientes de difusión de Fick
\mathfrak{D}	Matriz de coeficientes de difusión de Maxwell-Stefan
Γ	Matriz de factores termodinámicos
ρ	Densidad
d_p	Diámetro de partícula
U	Velocidad
t	Tiempo
σ	Tensión superficial
g	Aceleración de la gravedad
ϕ	Factor de retención <i>hold-up</i>
We	Número de Webber
F_r	Número de Froude

E_o	Número de Eötvös
N_p	Número de perforaciones del plato
A^p	Área transversal
R_e	Número de Reynolds
h	Altura
H	Espaciamiento entre platos

Superíndice

c	Fase continua
d	Fase dispersa
FG	Formación de gotas
A/DG	Ascenso o descenso de gotas
CG	Coalescencia de gotas

Subíndice

A	Sustancia A
B	Sustancia B
mix	Mezcla
f	Formación
s	Deslizamiento
o	Agujeros
col	Columna
der	Derramaderos

REFERENCIAS

- Alzate, J., y Gómez, M. (2008). *Análisis y diseño de operaciones de separación con aplicaciones en Mat-Lab*. Manizales, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Asadollahzadeh, M., Torab-Mostaedi, M., Torkaman, R., y Safdari, J. (2016). A new model for prediction of drop size distribution in a liquid-liquid extraction column. *RSC Advances*, 6(86), 82496-82504.
- Bosse, D., y Bart, H. (2006). Prediction of diffusion coefficients in liquid systems. *Industrial y Engineering Chemistry Research*, 45(5), 1822-1828.
- Caldwell, C., y Babb, A. (1956). Diffusion in ideal binary liquid mixtures. *The Journal of Physical Chemistry*, 60(1), 51-56.
- Dullien, F., y Asfour, A. (1985). Concentration dependence of mutual diffusion coefficients in regular binary solutions: A new predictive equation. *Industrial y Engineering Chemistry Fundamentals*, 24(1), 1-7.
- Edward, J. T. (1970). Molecular volumes and the Stokes-Einstein equation. *Journal of Chemical Education*, 47(4), 261.
- Grace, J., Wairegi, T., y Nguyen, T. (1976). Shapes and velocities of single drops and bubbles moving freely through immiscible liquids. *Trans. Inst. Chem. Eng.*, 54(3), 167-173.

- Gómez, S. (2017). *Desarrollo de un algoritmo para la simulación de cascadas de extracción en fase líquida aplicando modelos de no equilibrio* (tesis de grado). Facultad de Ingeniería Química, Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia.
- Hayduk, W., y Minhas, B. (1982). Correlations for prediction of molecular diffusivities in liquids. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 60(2), 295-299.
- Hsu, Y., Tang, M., y Chen, Y. (2000). A group contribution correlation of the mutual diffusion coefficients of binary liquid mixtures. *Fluid Phase Equilibria*, 173(1), 1-21.
- Hu, S., y Kinter, R. (1955). The fall of single liquid drops through water. *AIChE Journal*, 1(1), 42-48.
- Johnson, A., y Braida, L. (1957). The velocity of fall of circulating and oscillating liquid drops through quiescent liquid phases. *Can. J. Chem. Eng.*, 35, 165-172.
- Klee, A., y Treybal, R. (1956). Rate of rise or fall of liquid drops. *AIChE Journal*, 2(4), 444-447.
- Kooijman, H., y Taylor, R. (1991). Estimation of diffusion coefficients in multicomponent liquid systems. *Industrial y Engineering Chemistry Research*, 30(6), 1217-1222.
- Krishna, R., Nanoti, S., y Goswami, A. (1989). Mass-transfer efficiency of sieve tray extraction columns. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 28(5), 642-644.
- Krishnamurthy, R., y Taylor, R. (1985). A nonequilibrium stage model of multicomponent separation processes. part I: model description and method of solution. *AIChE Journal*, 31(3), 449-456.
- Kumar, A., y Hartland, S. (1984). Correlation for drop size in liquid/liquid spray columns. *Chemical Engineering Communications*, 31(1-6), 193-207.
- Kumar, A., y Hartland, S. (1996). Unified correlations for the prediction of drop size in liquid-liquid extraction columns. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 35(8), 2682-2695.
- Kumar, A., y Hartland, S. (1999). Correlations for prediction of mass transfer coefficients in single drop systems and liquid-liquid extraction columns. *Chemical Engineering Research and Design*, 77(5), 372-384.
- Laddha, G., y Degaleesan, T. (1978). *Transport phenomena in liquid extraction*. EE. UU.: McGraw-Hill Companies.
- Laddha, G., y Smith, J. (1969). A generalized equation for liquid diffusivities. *Indian Chemical Engineer*, 11, 109-114.
- Lao, M., Kingsley, J., Krishnamurthy, R., y Taylor, R. (1989). A nonequilibrium stage model of multicomponent separation processes VI: simulation of liquid-liquid extraction. *Chemical Engineering Communications*, 86(1), 73-89.
- Lao, M., y Taylor, R. (1994). Modeling mass transfer in three-phase distillation. *Industrial y Engineering Chemistry Research*, 33(11), 2637-2650.
- Leffler, J., y Cullinan, H. (1970). Variation of liquid diffusion coefficients with composition. Binary systems. *Industrial y Engineering Chemistry Fundamentals*, 9(1), 84-88.
- Mori, H., Oda, A., Ito, C., Aragaki, T., y Liu, F. (1996). Thermodynamic factors derived from group contribution activity coefficient models. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 29(2), 396-398.

- Rocha, J., Humphrey, J., y Fair, J. (1986). Mass-transfer efficiency of sieve tray extractors. *Industrial y Engineering Chemistry Process Design and Development*, 25(4), 862-871.
- Sá, R., Góis, L., y Cavalcanti, C. (2010). Dispersed phase holdup in a liquid-liquid extraction column. *Latin American Applied Research*, 40(4), 373.
- Safi, A., Nicolas, C., Neau, E., y Chevalier, J. (2008). Diffusion coefficients of organic compounds at infinite dilution in mixtures involving associating compounds. Experimental determination and modeling by group contribution methods. *Journal of Chemical y Engineering Data*, 53(2), 444-448.
- Safi, A., Nicolas, C., Neau, E., y Escandell, J. (2010). Diffusion coefficients of organic compounds at infinite dilution in ternary mixtures: experimental determinations and modeling. *Journal of Chemical y Engineering Data*, 55(12), 5449-5452.
- Saien, J., y Daliri, S. (2014). Improving performance of liquid-liquid extraction with temperature for mass transfer resistance in both phases. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 45(3), 808-814.
- Sanpui, D., y Khanna, A. (2003). Selection of mass transfer correlations for rate based liquid-liquid extraction model. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 20(4), 609-616.
- Sanpui, D., Singh, M., y Khanna, A. (2004). Rate-based nonisothermal LLX model and its experimental validation. *AIChE Journal*, 50(2), 368-381.
- Scheele, G., y Meister, B. (1968). Drop formation at low velocities in liquid-liquid systems: Part I. prediction of drop volume. *AIChE Journal*, 14(1), 9-15.
- Scheid, C., Puget, F., Halasz, M., y Massarani, G. (1999). Fluid dynamics of bubbles in liquid. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 16(4), 351-358.
- Seibert, A., y Fair, J. (1988). Hydrodynamics and mass transfer in spray and packed liquid-liquid extraction columns. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 27(3), 470-481.
- Seibert, A., y Fair, J. (1993). Mass-transfer efficiency of a large-scale sieve tray extractor. *Industrial y Engineering Chemistry Research*, 32(10), 2213-2219.
- ŞENOL, A. (2001). Vapor-liquid equilibrium modeling of associated systems using a linear solvatochromic approach. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 25(4), 259-266.
- Siddiqi, M., y Lucas, K. (1986). Correlations for prediction of diffusion in liquids. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 64(5), 839-843.
- Skelland, A., y Conger, W. (1973). A rate approach to design of perforated-plate extraction columns. *Industrial y Engineering Chemistry Process Design and Development*, 12(4), 448-454.
- Skelland, A. (1974). *Diffusional mass transfer*. New York: John Wiley y Sons.
- Springer, P. (2004). *Mass transfer effects in distillation*. Países Bajos: Universidad de Amsterdam.
- Sridhar, L., y Torres, M. (1998). Stability calculations for nonequilibrium separation processes. *AIChE Journal*, 44(10), 2175-2180.
- Stella, A., Mensforth, K., Bowser, T., Stevens, G., y Pratt, H. (2008). Mass transfer performance in karr reciprocating plate extraction columns. *Industrial y Engineering Chemistry Research*, 47(11), 3996-4007.

- Suárez-Iglesias, O., Medina, I., Pizarro, C., y Bueno, J. (2007). Modeling of tracer diffusion in liquids when solute–solvent interactions are present. *Fluid Phase Equilibria*, 253(2), 155-164.
- Tang, J., Zhang, X., Cai, W., y Wang, F. (2013). Liquid–liquid extraction based on droplet flow in a vertical microchannel. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 49, 185-192.
- Taylor, R., Kooijman, H., y Hung, J. (1994). A second generation nonequilibrium model for computer simulation of multicomponent separation processes. *Computers y Chemical Engineering*, 18(3), 205-217.
- Taylor, R., y Krishna, R. (1993). *Multicomponent mass transfer*. EE. UU.: John Wiley y Sons.
- Taylor, R., Krishna, R., y Kooijman, H. (2003). Real-world modeling of distillation. *Chemical Engineering Progress*, 98, 28-39.
- Tochigi, K., Yoshino, K., y Rattan, V. (2005). Prediction of kinematic viscosities for binary and ternary liquid mixtures with an ASOG-VISCO group contribution method. *International Journal of Thermophysics*, 26(2), 413-419.
- Tyn, M., y Calus, W. (1975). Diffusion coefficients in dilute binary liquid mixtures. *Journal of Chemical and Engineering Data*, 20(1), 106-109.
- Usman, M., Sattar, H., Hussain, S., Muhammad, H., Asghar, A., y Afzal, W. (2009). Drop size in a liquid pulsed sieve-plate extraction column. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 26(4), 677-683.
- Vignes, A. (1966). Diffusion in binary solutions. Variation of diffusion coefficient with composition. *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, 5(2), 189-199.
- Wegener, M., Paul, N., y Kraume, M. (2014). Fluid dynamics and mass transfer at single droplets in liquid/liquid systems. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 71, 475-495.
- Wesselingh, J., y Krishna, R. (1990). *Mass transfer*. New York: Ellis Horwood Series in Chemical Engineering.
- Wilke, C., y Chang, P. (1955). Correlation of diffusion coefficients in dilute solutions. *AIChE Journal*, 1(2), 264-270.
- Xu, Y., Tang, X., Li, J., y Zhu, X. (2016). Viscosity estimation of ternary mixtures containing ionic liquid from their binary subsystems: a comparison of three viscosity equations. *Fluid Phase Equilibria*, 427, 166-174.
- Yadav, R., y Patwardhan, A. (2009). CFD modeling of sieve and pulsed-sieve plate extraction columns. *Chemical Engineering Research and Design*, 87(1), 25-35.
- Zenz, F. (1957). Calculate fluidization rates. *Petroleum Refiner*, 36(8), 147-155.
- Zimmermann, A., Gourdon, C., Joulia, X., Gorak, A., y Casamatta, G. (1992). Simulation of a multicomponent extraction process by a nonequilibrium stage model incorporating a drop population model. *Computers y Chemical Engineering*, 16, S403-S410.

MODELO DE SIMULACIÓN COMO HERRAMIENTA PARA LA MEJORA DE SERVICIOS BIBLIOTECARIOS

SIMULATION MODEL AS A TOOL FOR LIBRARY SERVICES IMPROVEMENT

Brayan Leonardo Gil Guevara*
Jorge Armando Puentes Márquez**
Andrés Vergara Narváez***

Recibido: 6 de junio de 2018

Aceptado: 16 de octubre de 2018

Resumen

Los servicios bibliotecarios representan uno de los principales productos que oferta una institución educativa. Estos servicios buscan facilitar recursos a los usuarios para el acceso a la información. En este artículo se presenta el caso de una biblioteca de capacidad fija que afronta cada periodo académico un número creciente de usuarios. El objetivo de la investigación fue identificar procesos críticos para generar estrategias orientadas hacia la mejora del servicio. Para ello, fue elaborado un modelo de simulación en el software FlexSim luego de caracterizar los parámetros del sistema. Tras analizar resultados, los experimentos muestran que, ante una mayor demanda, los recursos que ofrece la biblioteca se verán sobreutilizados y aumentará hasta cuatro veces el número de abandonos del sistema.

Palabras clave: biblioteca, mejora, recursos, servicios, simulación.

Abstract

Library services represent one of the main products offered by an educational institution. These seek to provide users with resources for accessing information. In this paper, we present the case of a fixed capacity library that faces an increasing number of users each academic period. The objective of the research was to identify critical processes to generate strategies aimed at improving the service. To do this, a simulation model was developed in the FlexSim software after characterizing the system parameters. After analyzing results, the experiments show that, facing a higher demand, the resources offered by the library will be overused. Also increasing up to four times the number of system withdrawals.

Keywords: improvement, library, resources, services, simulation.

* Ingeniero industrial, especialista en Gerencia Ambiental. Corporación Universitaria del Caribe, Sincelejo, Colombia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7156-7053>. brayan.gilg@cecar.edu.co

** Ingeniero industrial, magíster en Ingeniería Industrial. Corporación Universitaria del Caribe, Sincelejo, Colombia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4342-3930>. jorge.puentes@cecar.edu.co

*** Ingeniero agroindustrial, magíster en Dirección de Operaciones y Logística. Vicerrectoría de CTel, Corporación Universitaria del Caribe, Sincelejo, Colombia. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3391-9235>. andres.vergaran@cecar.edu.co

INTRODUCCIÓN

La Biblioteca Gerónimo Osiris, caso de estudio del presente artículo, es el principal centro bibliográfico de la Corporación Universitaria del Caribe (CECAR), institución ubicada en Sincelejo, Colombia. La biblioteca cuenta con 273 m² en los que se ubican una sala de estudio, mesas y sillas para estudiantes y estanterías con más de 22 000 ejemplares de múltiples disciplinas. Según las estadísticas históricas que se registran diariamente, del total de estudiantes que se matriculan, cerca del 10 % ingresa en promedio a la biblioteca. Con una población en aumento (ver figura 1) y sin cambios en la infraestructura, sus niveles de ocupación se mantienen altos y la satisfacción de los usuarios se ve comprometida porque no hay recursos disponibles para usar, lo que provoca abandonos del sistema. Considerando lo expuesto, este artículo estudia el comportamiento de la biblioteca con un aumento sostenido y generalizado de usuarios (Griffiths, Lawes y Sansbury, 2012).

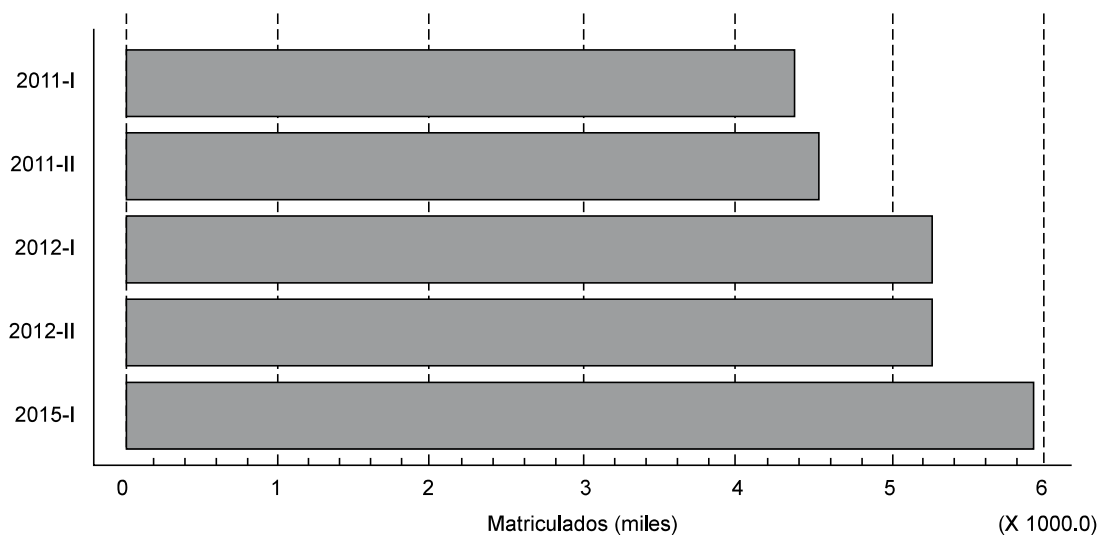


Figura 1. Aumento de la población total matriculada.

Sin embargo, alterar las características de los recursos se hace difícil cuando no se cuenta con información acerca del comportamiento futuro de la demanda de usuarios, ni se estima cómo se verá afectado el sistema a lo largo de determinado horizonte de tiempo, para así ajustar la capacidad del sistema en función de la creciente demanda. Lo mismo sucede con las locaciones y la necesaria operación ininterrumpida del servicio. Desde este punto de vista, la simulación es una herramienta adecuada para representar el comportamiento de un sistema complejo con todas sus interrelaciones y evaluar el impacto que determinados cambios tendrían en la satisfacción de los usuarios y la eficiencia del sistema (Tarride, 1995). En este orden de ideas, esta investigación identifica procesos críticos del sistema de servicios bibliotecarios para generar estrategias orientadas hacia la mejora de los servicios de la Biblioteca Gerónimo Osiris de la CECAR (2016).

Se escogió la simulación como herramienta de solución por su aplicabilidad en condiciones como las ya descritas y en las que se soporta la toma de decisiones. Experiencias como las de Kierzkowski y Kisiel (2016) y Li y Zhu (2016), ligadas al nivel de servicio en un aeropuerto y un sistema de trenes, respectivamente, han alcanzado no solo la solución más adecuada a su problemática particular, sino que también confirman el potencial que tienen la simulación en esta área.

Asimismo, Cimpeanu, Devine y O'Brien (2017) pronosticaron el nivel de desempeño a partir del incremento de las inversiones en un terminal portuario irlandés que refina bauxita. Incluso, en

parques naturales también ha sido usada para determinar mejores rutas para que los turistas no comprometan la estabilidad de los ecosistemas (Gutiérrez, Tørset, Skjetne y Odeck, 2017).

La posibilidad de representar cualquier escenario es una de las mayores funcionalidades de este tipo de herramientas. Por ejemplo, en Rumania se decidió usar solo semáforos en verde para el transporte público (Dumitru, Nicolae, Matei y Racila, 2016); esta idea sería difícil de representar en la vida real, pero la complejidad desaparece dentro de un software de simulación. Esa fue la solución propuesta en Dortmund (Alemania) para un terminal de contenedores, en la que se desarrolló el software ContSim con el fin de encontrar la mejor combinación de grúas para las operaciones del emplazamiento (Clausen, Kaffka y Meier, 2012).

Disponer de la simulación para soportar la toma de decisiones en lo que corresponde a la gestión de servicios también tiene antecedentes a nivel latinoamericano. El caso más tradicional, el de una entidad bancaria, fue expuesto por Clemente (2011), quien determinó la cantidad necesaria de servidores en el sistema. Otro acercamiento se dio en México, donde Taddei-Bringas, Rodríguez-Carvajal y Ruiz-Duarte (2013) lograron mejorar el abultado proceso de inscripciones de una universidad en Sonora.

Los antecedentes confirman lo acertado del enfoque que ofrece la simulación para la resolución de problemas. Es por ello que se abordó desde la simulación la problemática de la Biblioteca Gerónimo Osiris.

En ese trabajo se desarrollaron cinco fases en las de las que se buscó identificar y caracterizar los comportamientos del sistema, la gestión de tiempos, la construcción de modelos de simulación, para finalizar con la validación y la experimentación; esto para crear escenarios que apoyen la toma de decisiones para los servicios bibliotecarios.

MÉTODOS

Se adecuó la metodología expuesta por Coss (1994) haciendo uso de cinco fases:

La primera fase, *caracterización del sistema*, buscó comprender las relaciones y el comportamiento de usuarios y recursos dentro del medio bibliotecario (parámetros). Todos los procesos prestados en la biblioteca fueron analizados: préstamo/renovación de libros, uso de computadoras, ocupación de mesas de estudio, servicio de fotocopiado, entre otros. La observación fue la principal herramienta en esta etapa. El periodo en el que se observó la biblioteca universitaria incluyó una época de alta demanda (marzo-abril), que corresponde a un periodo de exámenes parciales.

La segunda fase, *medición de tiempos*, incluye el diseño de los instrumentos usados para registrar la duración de los procesos que se definieron relevantes para la construcción del modelo. Los datos que se registraron representan los tiempos de ocupación promedio de recursos como mesas o computadoras, así como el tiempo que les toma a los usuarios pedir prestado un libro o renovar la vigencia de un préstamo.

La población considerada en este caso es la que en promedio ingresa en un día. Según las estadísticas recopiladas para el 2015, ingresan diariamente 589 usuarios. Se determinó el tamaño de la muestra, la cual debe tomarse para cada uno de los subsistemas que integran la biblioteca. Aquí se hace uso de la ecuación 1, que es ideal cuando se trabaja con un tamaño de población conocida. Para este caso, el estadístico de la muestra es la media y el tamaño de la muestra es mayor a 30.

$$n = \left[\frac{\left[\left(\frac{Z_{\alpha}^2 * p * q}{2} \right) + E^2 \right]}{E^2 + \left(\frac{Z_{\alpha}^2 * p * q}{2} \right)} \right] \quad (1)$$

Teniendo en cuenta un nivel de confianza del 95 % y un margen de error máximo permitido del 7 % aplicados en la ecuación 1, se obtiene el siguiente resultado:

$$n = \left[\frac{\left[(1.96^2 * 0.5 * 0.5) + 0.07^2 \right]}{0.07^2 + \left(\frac{1.96^2 * 0.5 * 0.5}{260} \right)} \right] \rightarrow \cong 112$$

Los datos se capturaron siguiendo un muestreo aleatorio en la franja horaria de 8:00 a. m. a 12:00 p. m., que es el lapso que presenta mayor ingreso al sistema. Luego de ser registrados, los datos son tabulados en hojas de cálculo. Con el software StatGraphics se calculan las distribuciones de probabilidad que mejor representan el comportamiento del sistema, haciendo primero la prueba de Shapiro-Wilk, en la que si resulta un *P valor* < 0.05 se rechazaba la hipótesis de que los datos siguen una distribución normal.

Para encontrar la distribución adecuada, se realiza una prueba de Smirnov-Kolmogorov en las distribuciones sugeridas para determinar el P-Valor, y se escoge la que mejor desempeño obtiene en dicha prueba para un conjunto de posibles distribuciones.

La tercera fase, *construcción del modelo*, se desarrolla en FlexSim. El modelo 3D fue elaborado acorde a las proporciones reales de la Biblioteca Gerónimo Osiris (ver figura 2).



Figura 2. Representación 3D de la biblioteca Gerónimo Osiris.

En la construcción del modelo en el entorno de FlexSim se consideró un arreglo para que los usuarios que tengan tiempos de espera mayores a cinco minutos abandonen la cola. La representación incluye los cuatro servicios que presta la biblioteca:

- Servicio de préstamo, entrega y renovación de libros
- Servicio de uso de computadoras
- Servicio de fotocopiado
- Servicio de sillas y mesas

Para representar a los usuarios del sistema se emplean *flowitems* (objetos que se mueven a lo largo del modelo) con una figura 3D de personas. El sistema hace uso de las tablas de FlexSim para detener los tiempos de servicio a una hora determinada (22:00 horas) en unos días específicos (lunes a viernes).

Cuando un *flowitem* es generado en un *source* (encargado de crear cada una de las personas en un tiempo entre arribos t), se desplaza a un *queue* (el cual almacena los usuarios que no pueden ser atendidos en el objeto siguiente) y es enviado aleatoriamente a alguno de los cuatro servicios prestados en la biblioteca, pasando antes por un *queue* exclusivo de cada servicio. Independientemente del servicio, el comportamiento del *flowitem* es el mismo, debe esperar hacer uso de un recurso fijo por un tiempo t que va en función de la distribución encontrada para un servicio s . Al terminar, los *flowitem* son enviados a un *queue* donde pueden ser reenviados aleatoriamente al *queue* principal, y así volver a hacer parte de los usuarios del sistema. Los *flowitem* que no son enviados de vuelta al inicio son eliminados en un *sink* (destruye los *flowitem* una vez han terminado su recorrido en el modelo).

Para representar el abandono de un usuario, se hace uso de los *triggers* (estos realizan una acción especial, en este caso, almacenan un mensaje y lo envía al objeto que posee una condición) que tiene cada uno de los recursos fijos. Cada *triggers* es usado en el *queue* ubicado antes del servicio a disponer. Cuando un *flowitem* llega a una cola, envía un mensaje pasados 300 segundos de su llegada. Siempre y cuando esté en dicho *queue*, el mensaje es enviado desde el *item* hacia el objeto actual (*current*), representando una demora de cinco minutos en atención, activados en el *trigger OnEntry* de cada objeto (ver figura 3).



Figura 3. OnEntry trigger, envío de mensaje.

Cuando el mensaje es recibido en el recurso fijo se activa el código (ver figura 4) y el ítem es enviado a una cola de abandonos:

```

/**Custom Code*/
treenode current = ownerobject(c);

if (up(msgsendingobject())==current)
    releaseitem(msgsendingobject(), 2);

```

Figura 4. Código de envío.

La fase cuatro, *validación*, consiste en validar el modelo de simulación bajo un escenario en el que se simuló el comportamiento real de la biblioteca con los mismos parámetros iniciales capturados en la fase uno. De esta manera se corroboró que el modelo de simulación elaborado en FlexSim representa acertadamente el comportamiento de las variables críticas del entorno. Para esto, se comparó la totalidad de registros capturados en la fase uno con las salidas que arrojó el modelo, teniendo en cuenta la misma cantidad promedio de usuarios que se tuvo al momento de capturar los parámetros del sistema.

La última fase, *experimentación*, consideró diez escenarios distintos en los que aplicando un análisis de sensibilidad se estudia el comportamiento del modelo a partir del incremento de los ingresos de usuarios por día en la biblioteca, pasando desde el 10 % (592.2 usuarios/día) e intensificándose en un 5 % en cada escenario hasta llegar al 55 % (3257.1 usuarios/día) de los estudiantes matriculados en la institución de educación superior. El tiempo de simulación fue de un mes y se representó una disposición de servicio de lunes a viernes entre las 6:00 y las 22:00 horas. Cada uno de estos escenarios fue replicado 10 veces en la experimentación, lo que permitió recopilar información por escenario de un tiempo equivalente a 10 meses.

RESULTADOS

La Biblioteca Gerónimo Osiris presenta los siguientes recursos para satisfacer las demandas de los usuarios: una superficie total de 273 m², que es pequeña (comparada, por ejemplo, con el área de una cancha de baloncesto estándar, 312 m²) para atender las necesidades de una población de más de 6000 usuarios. Hay que considerar que los registros de arribos anuales superan los 80 000 visitantes, promediando así 589 por día, con picos máximos de hasta 860 en 18 horas de servicio ininterrumpidas que empiezan a las 6:00.

El servicio de consulta en bases de datos se hace a través de computadoras, que también permiten consultas web. En total, 10 equipos de cómputo son designados para satisfacer este servicio. Este es el recurso con el índice de ocupación más alto.

Para el estudio o la realización de trabajos se dispone de 18 mesas con cuatro puestos y de 5 mesas con dos puestos, que ocupan un espacio considerable sobre el total de la superficie de la biblioteca.

En la figura 5 se evidencia el comportamiento de los usuarios respecto a los ingresos por semana. Se aprecia que los días con mayor ingreso a la biblioteca son los martes y jueves; ambos días promedian más de 500 ingresos. Los límites inferiores más cercanos a la media se dan los martes más que los jueves, lo que implica que los valores de arribos mínimos por día de la semana tuvieron frecuencias más altas los martes.

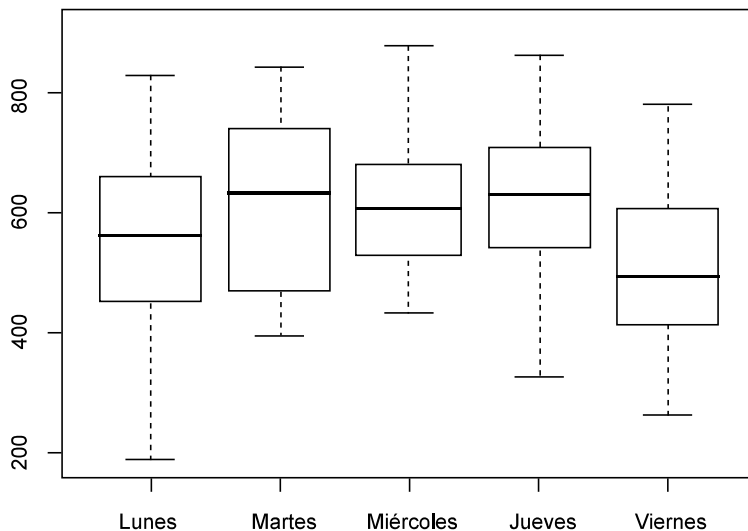


Figura 5. Distribución de usuarios por día en la biblioteca.

La tabla 1 muestra los tiempos promedios en que se desarrollan los servicios de la biblioteca:

Tabla 1. Parámetros de las distribuciones que describen el comportamiento de los tiempos característicos de los servicios de la biblioteca

Comportamiento del tiempo de arribo entre usuarios	Comportamiento del tiempo de atención para préstamo	Comportamiento del tiempo de ocupación en computadoras	Comportamiento del tiempo de ocupación de mesas	Comportamiento del tiempo de fotocopiado
Distribución: del valor extremo más grande.	Distribución: del valor extremo más grande.	Distribución Gaussiana inversa	Distribución de Weibull	Distribución: del valor extremo más grande.
Moda: 91.7977 Escala : 22.4462	Moda: 62.2735 Escala: 57.3773	Media: 545.246 Escala: 0.736318	Forma: 1.03454 Escala: 3083.02	Moda: 71.1125 Escala: 67.368

El resultado de la construcción del modelo en FlexSim se aprecia en la figura 6. La figura representa completamente la biblioteca y las conexiones entre cada uno de los recursos fijos, con los que se modeló el comportamiento de los usuarios dentro del sistema.

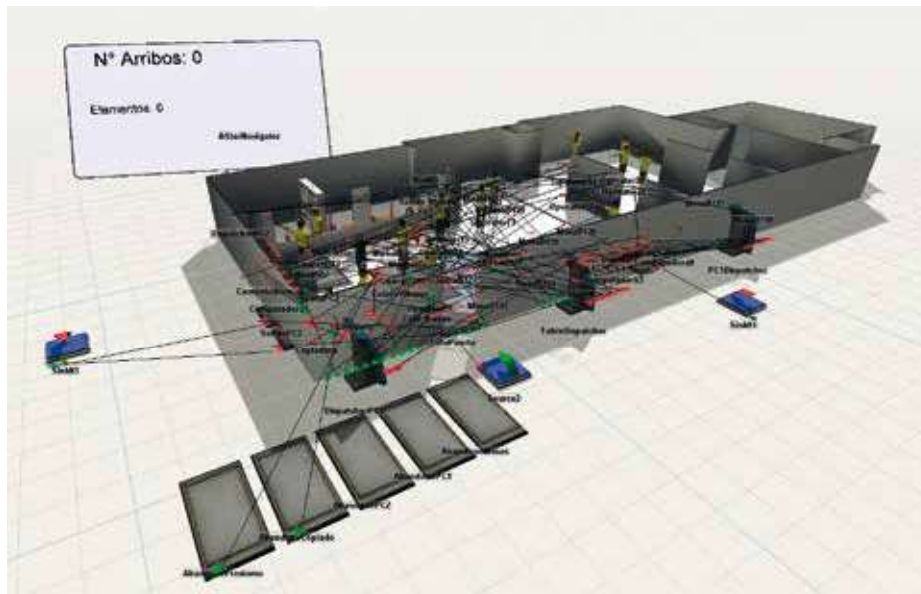


Figura 6. Modelo de simulación para la biblioteca en FlexSim.

La prueba de los escenarios fue ejecutada por el equivalente a 10 meses. Se midió el comportamiento de la biblioteca en función de un incremento de usuarios en el sistema. El primer escenario representa las condiciones normales de la biblioteca, con un ingreso de usuarios igual al 10 % de la población matriculada en la modalidad presencial de la institución de educación superior. Los siguientes escenarios consideran un incremento del 5 % sobre la población actual de 6000 estudiantes, como se muestra a continuación:

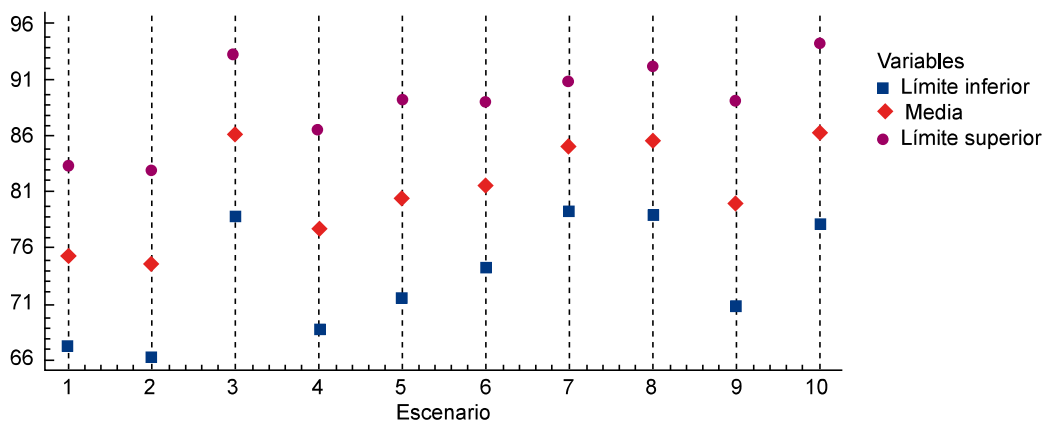


Figura 7. Media y límites superior e inferior para los intervalos de confianza de la variable tiempo de atención en módulo.

Con la representación de segundos en el eje de ordenadas, la figura 7 muestra el resumen para cada uno de los escenarios de las diez corridas que se realizaron. Esta gráfica confirma que un mayor ingreso de usuarios al sistema provocará mayores tiempos de atención. Además, el límite superior para los tiempos de atención que se realizaron con un nivel de confianza del 95 % mostró ser más grande en el escenario 10, con un valor de 94.2 segundos. Comparado con el promedio de atención en condiciones normales, este representa un incremento de casi el 25 % en tiempos de espera. En definitiva, para esta

medida de desempeño, el caso más crítico se presentó en el escenario 10; como se esperaba, el incremento en los tiempos de atención fue proporcional al incremento de los usuarios en el sistema.

La figura 8 representa en el eje de las ordenadas la cantidad de personas que abandonaron por mes en cada escenario. La figura muestra la situación observada en los intervalos de confianza, en los que el incremento de abandonos es perceptible. Al llegar al cuarto escenario, la tasa de abandonos por mes se estabiliza, promediando 21 abandonos. Siendo esta tasa inferior a 5 por mes en las condiciones iniciales, se observa una cuadruplicación de los abandonos de usuarios en el sistema. En ese orden ideas, el comportamiento de los usuarios fue muy semejante a lo largo de las pruebas.

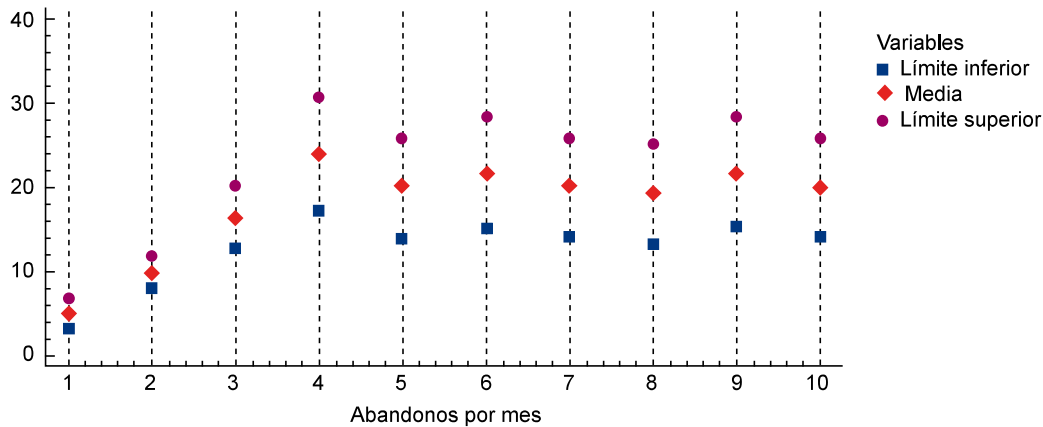


Figura 8. Media y límites superior e inferior para los intervalos de confianza de la variable abandonos del módulo de atención.

La figura 9 muestra los segundos de ocupación de las computadoras de la biblioteca con relación al escenario; información que confirma que el mayor ingreso de usuarios representa mayores tiempos de ocupación en promedio para los servicios que ofrece la biblioteca. En el más extremo de los casos, el límite superior de los intervalos en los escenarios llegó hasta los 1068 segundos, casi un tercio de hora. Comparado con el intervalo de los tiempos de atención en condiciones de arribo normales, esto es una diferencia de más de 400 segundos, lo cual representa un incremento del 77 %. En el escenario de mayores ingresos, la variación con respecto al límite superior fue del 25 %, por lo que la diferencia entre ambos escenarios con respecto a la media fue del 32 %.

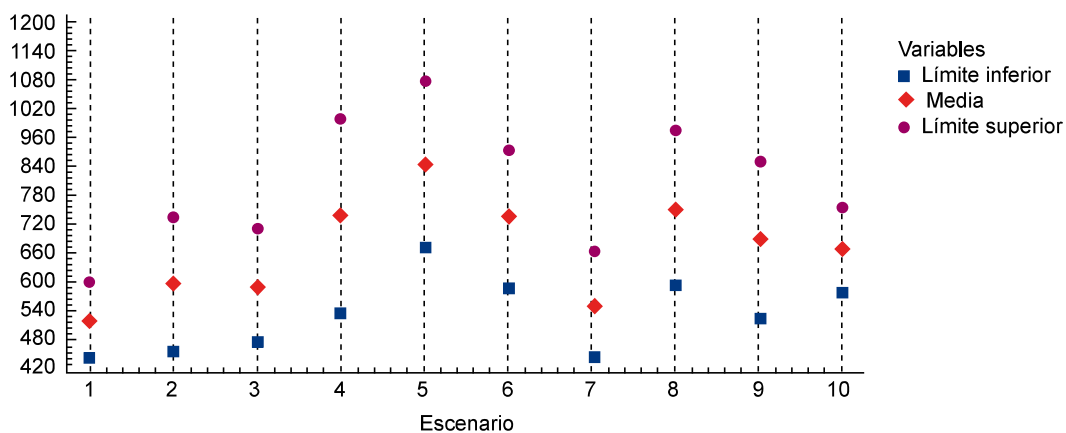


Figura 9. Media y límites superior e inferior para los intervalos de confianza de la variable tiempo de ocupación de computadoras.

La figura 10 muestra los abandonos por mes en cada escenario de usuarios de equipos de cómputo. Esto permite interpretar que hay una tendencia de entre 12 y 18 abandonos en promedio desde el cuarto escenario. Estos valores muestran que en promedio se deberían esperar 15 abandonos al mes como consecuencia del incremento de la población que hace uso de la biblioteca.

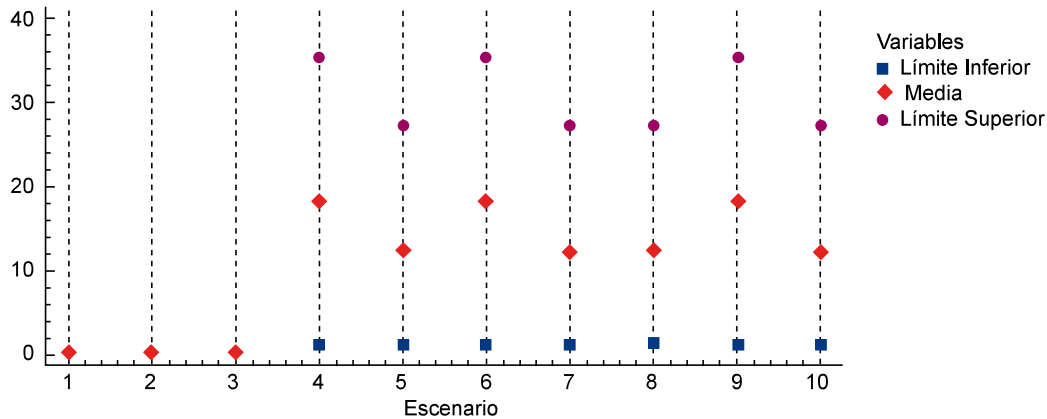


Figura 10. Media y límites superior e inferior para los intervalos de confianza de la variable abandonos de computadoras.

Los escenarios 4, 6 y 9 fueron los que más estresaron el sistema bibliotecario, arrojando un intervalo de confianza con un límite superior de abandono de 35 usuarios en el mes, mientras que en los tres primeros escenarios, con las condiciones ya mencionadas, no se esperan abandonos en el sistema. Esta información debería tomarse en cuenta para hacer las mejoras necesarias.

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos sugieren que de aumentar la cantidad de usuarios en más de 400, los tiempos de los servicios ofrecidos en la biblioteca aumentarán. Sin embargo, en las condiciones actuales, en las que se produce un ingreso cada 91 segundos, el sistema sólo necesita una mejor asignación de turnos. Sin importar el escenario que se analice, el mayor grupo de usuarios ingresa en la franja horaria que va desde las 08:00 hasta las 12:00, con mayores afluencias los jueves y martes, respectivamente.

Los abandonos en la cola para el préstamo de libros se cuadruplican cuando la demanda se incrementa por encima del 20 % de la población actual. Esto se concluye gracias a que en todos los escenarios el tiempo promedio de atención en el módulo de préstamo y renovación no logró estar por debajo del límite de confianza superior del escenario inicial, lo que tiene repercusiones sobre los abandonos totales en el mes. A partir de los escenarios simulados se pudo determinar que un ingreso superior de usuarios al sistema se verá traducido en mayores tiempos de atención o de espera, como consecuencia del incremento de los tiempos de ocupación y de servicios promedio.

CONCLUSIONES

El modelo de simulación logra representar la situación actual de la biblioteca de una forma adecuada; esto se determina a través de la comparación de los resultados del primer escenario con los obtenidos en los registros del personal de la biblioteca.

El modelo de simulación ayuda a sustentar la toma de decisiones, así como la experimentación de cambios con los que se pueda encontrar los mejores resultados.

El uso de la simulación, adicional al hecho de proveer herramientas para hacer una mejor gestión y enmarcada en la efectividad del sistema, también deja conocer información desconocida acerca del sistema estudiado, como tiempos, tamaños de colas, secuencias, entre otros.

Los resultados obtenidos permiten hacer una planificación sobre cómo debería ser, para el caso en estudio, una biblioteca ideal, una que satisfaga todas las necesidades de los usuarios, sin tiempos altos de espera, ni numerosos abandonos.

REFERENCIAS

- Cimpeanu, R., Devine, M., y O'Brien, C. (2017). A simulation model for the management and expansion of extended port terminal operations. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 98, 105-131. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2016.12.005>
- Clausen, U., Kaffka, J., y Meier, F. (2012). CONTSIM—container terminal management with simulation. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 54, 332-340. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.09.752>
- Clemente, L. (2011). *Mejora en el nivel de atención a los clientes de una entidad bancaria usando simulación* (tesis de pregrado). Facultad de Ciencias e Ingeniería, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú.
- Corporación Universitaria del Caribe. (2016). *Informe de gestión 2015*. Recuperado de https://calidad.cecar.edu.co/documentos/documentos_de_interes/INFORME-DE-GESTION-2015.pdf
- Coss, R. (1994). *Simulación: un enfoque práctico*. México: Editorial Limusa.
- Gutiérrez, M., Tørset, T., Skjetne, E., y Odeck, J. (2017). Tourist traffic simulation as a protected area management tool. The case of Serengeti National Park in Tanzania. *Tourism Management Perspectives*, 22, 54-63. <https://doi.org/10.1016/j.tmp.2017.01.005>
- Dumitru, I., Nicolae, D., Matei, L., y Racila, L. (2016). Public transport traffic management systems simulation in Craiova city. *Transportation Research Procedia*, 18, 405–410. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.12.053>
- Griffiths, R., Lawes, A., y Sansbury, J. (2012). *IT service management: a guide for ITIL foundation exam candidates*. Reino Unido: BCS.
- Kierzkowski, A., y Kisiel, T. (2016). Simulation model of security control system functioning: A case study of the Wrocław Airport terminal. *Journal of Air Transport Management*, 64, 173-185. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2016.09.008>
- Li, W., y Zhu, W. (2016). A dynamic simulation model of passenger flow distribution on schedule-based rail transit networks with train delays. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 3(4), 364-373. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2015.09.009>
- Taddei-Bringas, J., Rodríguez-Carvajal, R., y Ruiz-Duarte, J. (2013). Mejora del proceso de inscripciones en una institución de educación superior mediante simulación. *Ingeniería Industrial*, 34(1), 12-25.
- Tarride, M. (1995). Complejidad y sistemas complejos. *História, Ciências, Saúde-Manguinhos*, 2(1), 46-66.

UNA REVISIÓN DEL ESTADO ACTUAL DE LOS ENVASES PARA LA INDUSTRIA ALIMENTARIA

REVIEW OF THE CURRENT STATE OF PACKAGING FOR THE FOOD INDUSTRY

José Ignacio Nicolao García*
Claudia Zárate**

Recibido: 22 de junio de 2018

Aceptado: 10 de octubre de 2018

Resumen

La industria alimentaria es la responsable de transformar los productos derivados de la agricultura y la ganadería en productos aptos para el consumo del cliente. En ese proceso de transformación la industria del envase juega un rol fundamental en lo que respecta a la conservación, distribución y venta del producto. El objetivo de este trabajo es evidenciar la importancia de la nueva generación de envases, analizando para ello el origen de los envases alimentarios tradicionales y su evolución hacia los envases activos e inteligentes. Para el caso particular de los productos alimenticios, se presentan los conceptos generales de los denominados envases activos y envases inteligentes y la forma cómo responden a las nuevas exigencias del consumidor. Finalmente se estudian las tendencias más recientes.

Palabras clave: envases activos, envases inteligentes, envases para alimentos.

Abstract

The food industry is responsible for transforming products derived from agriculture and livestock into products suitable for the consumer's consumption. In this process of transformation, the packaging industry plays a fundamental role in the conservation, distribution and sale of the product. The objective of this work is to demonstrate the importance of the new generation of containers, analyzing for this the origin of traditional food packaging and evolution towards active and intelligent packaging. In particular, for the food products, the general concepts of the so-called active packaging and smart packaging are presented, which respond to the new demands of the consumer. Finally, the new trends are studied.

Keywords: active packaging, intelligent packaging, food containers.

* Ingeniero Industrial, especialista en Logística, Calidad y Comercio Internacional de Alimentos. Grupo de investigación Gestión Industrial, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Mar del Plata, Mar del Plata, Argentina. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6598-9612>. jngarcia@fi.mdp.edu.ar

** Ingeniera Mecánica, magíster en Ciencia y Tecnología de los Materiales. Grupo de investigación Gestión Industrial, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Mar del Plata, Mar del Plata, Argentina. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2138-8759>. cnzarate@fi.mdp.edu.ar

INTRODUCCIÓN

La industria alimentaria es la responsable de transformar los productos derivados de la agricultura y la ganadería en productos aptos para el consumo. Agrupa a todas aquellas organizaciones que se encargan de alguna parte del desarrollo requerido en esta transformación, en el que se incluyen los procesos de transporte, recepción, manipulación, almacenamiento, elaboración, conservación, distribución y venta del producto. La ciencia y la tecnología han sido grandes promotoras del mejoramiento de cada uno de estos procesos, desarrollando productos con mayor eficiencia, calidad, seguridad e inocuidad y de acuerdo con las exigencias del consumidor. El envase alimentario no ha estado ajeno a esta evolución y ha afectado sensiblemente los procesos de conservación, distribución y venta de los productos.

Se denomina envase “al contenedor que está en contacto directo con el producto mismo. Su función es guardar, proteger, conservar e identificar el producto; facilitar su manejo y comercialización” (Instituto Nacional de Tecnología Industrial, 2012, p. 4). El término empaque se define como cualquier material que encierra un artículo envasado con el fin de preservarlo y facilitar su entrega al consumidor. (PACMAN, 2013). Por su parte, el embalaje es “la cobertura que da mayor protección y poder de manipulación a los productos envasados. Su función es adecuar las condiciones para el almacenamiento, transporte y llegada a destino de los productos en óptimo estado” (INTI, 2012, p. 4). Mientras el envase contiene al producto y promueve su identidad, el embalaje protege al envase. El envase es la protección individual de cada uno de los productos, mientras que el embalaje es la protección colectiva (por eso se lo relaciona con el almacenamiento) (INTI, 2012).

Como respuesta a los cambios en los hábitos de consumo y las nuevas tecnologías de producción y conservación de los alimentos, han surgido nuevos sistemas para envases. Estos sistemas desempeñan un papel fundamental en la comercialización de alimentos con mayores estándares de calidad (Hernández, 2006).

Las alternativas respecto de estos nuevos sistemas para envases abarcan un amplio espectro, en el que se incluyen tanto el desarrollo de sofisticados envases utilizando nuevos materiales, como la producción de envases que pueden reutilizarse o reciclarse, que interactúan con el contenido, que permiten obtener la trazabilidad del producto, etc.

Un envase se considera activo si es capaz de desarrollar alguna barrera inerte más eficiente que la habitual frente a las condiciones externas a las que se ve sometido el producto y generar cierto grado de interacción con el contenido para extender su vida útil. Por otro lado, se consideran envases inteligentes aquellos que son capaces de informar, a través de diversos indicadores, el historial del producto en su proceso de conservación y distribución (Rodríguez-Sauceda, Rojo-Martínez, Martínez-Ruiz, Piña-Ruiz y Ramírez-Valverde, 2014).

El objetivo de este trabajo es describir las características principales de la nueva generación de envases, específicamente, las particularidades de los envases activos y envases inteligentes. Se presenta, en primera instancia, el origen y evolución de los envases tradicionales, para enmarcar los conceptos, características generales y utilidad de los nuevos envases para alimentos. A continuación se profundiza en el estudio sobre las soluciones tecnológicas aplicadas a envases activos e inteligentes; aquí se analizan detalladamente los sistemas actuales. Finalmente se presentan las nuevas tendencias que se vienen desarrollando en el diseño de envases, con objeto de facilitar la manipulación de los alimentos por parte del consumidor. A modo de conclusión, se hace un resumen del relevamiento realizado.

METODOLOGÍA

Se realizó una búsqueda bibliográfica en la Internet durante el período de julio de 2015 y febrero de 2017. La antigüedad de las fuentes bibliográficas se estableció según los siguientes criterios:

- Historia, evolución y características de los envases tradicionales: 1987.
- Soluciones tecnológicas para envases activos e inteligentes: 2007.
- Nuevas tendencias para envases activos e inteligentes: 2010.
- Marco legal y normativo relativo a envases: vigentes desde 2015.

Se recopilaron libros en formato digital, artículos científicos, publicaciones de organismos oficiales y contenidos de diversos sitios web especializados en la temática.

Dado que la temática está vinculada en ciertos aspectos al comercio internacional, se consultaron páginas de organismos y asociaciones nacionales e internacionales que se consideraron relevantes:

- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO)
- Informe de la reunión conjunta FAO/OMS de expertos acerca de la aplicación de la nanotecnología en los sectores alimentario y agropecuario (ONU y FAO, 2011).
- Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA)
- Reglamento (CE) n.º 450/2009. (Comisión Europea, 2009).
- Resolución MERCOSUR/GMC/RES n.º 03/92 (Mercosur, 2015).
- Organización Mundial del Envase (WPO)
- Asociación de la Industria de Embalajes Activos e Inteligentes (AIPIA)
- Unión Latinoamericana del Embalaje (ULADE)
- Instituto Argentino del Envase (IAE)
- El Código Alimentario Argentino de la Administración Nacional de Medicamentos, Alimentos y Tecnología Médica (ANMAT) (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca Argentina, 2017)

Luego de la lectura de la bibliografía, se adecuaron los contenidos al objetivo del trabajo y se seleccionaron los documentos que por su vigencia y enfoque permitieron precisar de forma adecuada el alcance de esta revisión.

En la última etapa se procedió al análisis de artículos más recientes vinculados a nuevos desarrollos e innovaciones sobre el tema en cuestión.

DESARROLLO DEL TEMA

Historia y evolución de los envases

Los alimentos han sido envasados o empacados de muy diversas maneras desde hace miles de años. Sin duda, lo primero que el hombre aprendió a envasar fue el agua; esta práctica se fue extendiendo a otros productos, pues se comprobó que un envase mantenía limpio, seco o libre de contaminación a su contenido. Asimismo, la utilización de vasijas, cuerdas entrelazadas o morrales tenía la finalidad de facilitar el transporte de los productos. Hasta comienzos de este siglo, los envases de alimentos eran esencialmente rígidos (así, por ejemplo, frascos, latas, bidones y barriles) y se fabricaban utilizando metales (acero, por lo general) y vidrio (Hernández, 2006).

El envase a lo largo de su historia fue variando no solo por los materiales que se han utilizado para su fabricación, sino por las funciones que tiene dentro del proceso de fabricación y venta de un producto. En sus inicios, fue considerado simplemente como un contenedor o protector que además facilitaba su transporte. Con la evolución de la industria se evidenció aún más su importancia, en la medida en que optimizó significativamente la eficiencia de los procesos de almacenamiento y distribución. En la actualidad también se le asignan funciones comerciales fundamentales. Se considera al envase como el elemento que presenta al producto, dado que es lo primero que el cliente observa. Igualmente, el envase comunica las cualidades y los beneficios del producto, motivo por se le denominó “el vendedor silencioso” (INTI, 2012).

Envases tradicionales y no tradicionales

El *envase tradicional* se lo puede definir como un recipiente fabricado con cualquier material o combinación de materiales, cuyo fin es contener el producto actuando como una *barrera pasiva* que separa el contenido del medio ambiente. Esta barrera evita o retrasa los efectos adversos del entorno y, por lo tanto, mantiene la calidad y seguridad del contenido envasado (Catalá, 2010).

El *envase no tradicional* despierta un gran interés en la industria, particularmente, en la industria alimentaria. Actualmente se están realizando grandes esfuerzos para el desarrollo e investigación de este tipo de envases. Dentro del grupo de los envases no tradicionales encontramos los *envases activos* y *envases inteligentes*, que pueden ser vistos como la próxima generación del envasado de alimentos (Hernández, 2006).

El *envase activo* (*active packaging*) actúa como un sistema coordinado con el producto y el entorno para mejorar la seguridad, garantizar la calidad y alargar la vida útil del contenido. Los envases activos pueden incorporar “agentes activos” en el interior del envase, tales como compuestos químicos, sólidos o gaseosos, para controlar la oxidación, el crecimiento de microorganismos, la humedad, entre otros factores. También pueden contemplar el agregado de sustancias o aditivos a los materiales constitutivos del envase o el rediseño de las estructuras del envase para facilitar el mantenimiento de la calidad de los alimentos en el tiempo (AIPIA, s. f.).

El *envase inteligente* es aquel que brinda información del producto envasado al fabricante, consumidor o cualquiera de los eslabones de la cadena logística. El envase inteligente censa algunas de las propiedades del producto que contiene o del entorno en el que se mantiene e informa el estado de estas propiedades (Rodríguez-Sauceda et ál., 2014).

A modo de esquema, la tabla 1 presenta los distintos conceptos tratados en este artículo sobre los envases no tradicionales:

Tabla 1. Soluciones tecnológicas desarrolladas para envases no tradicionales

Envases activos		Envases inteligentes	
Clasificación por estructura	Clasificación por actividad	Sistemas portadores de datos	Indicadores en el envase
Sistemas independientes	Sistemas absorbentes o eliminadores	Códigos de barras	Tiempo/temperatura
Sistemas integrados en el envase	Sistemas liberadores o emisores	Identificación por radiofrecuencia (RFID)	Gases
	Biopolímeros		Humedad
			Madurez
			Biosensores/calidad microbiológica

Soluciones tecnológicas desarrolladas para envases activos

Las soluciones tecnológicas aplicadas a envases activos que actualmente existen en los mercados se pueden clasificar según su estructura o según la actividad que desarrollen.

Clasificación según su estructura

Esta clasificación se realiza dependiendo de si el sistema activo forma parte o no de la estructura del envase.

Sistemas independientes

Elementos (saquitos, tiras o etiquetas) que se incorporan o adhieren en el interior del envase, pero que son una parte diferenciada. Actualmente, son los sistemas más ampliamente utilizados. Deben acompañarse de un etiquetado apropiado que permita al consumidor identificarlo como una parte no comestible y evite su consumo accidental (Ozdemir y Floros, 2004).

Sistemas integrados en el propio envase

Las sustancias activas que se incorporan en el propio material de envase; en unos casos, mediante dispersión, y en otros, injertándolas químicamente en el propio material. A diferencia de los sistemas independientes, el sistema activo no se percibe por el consumidor como elemento diferenciado del envase, lo que evita su posible rechazo y el riesgo de consumo accidental (Soares y Hotchkiss 1998).

Clasificación según su actividad

Las soluciones tecnológicas según la actividad que los envases realizan con el producto se dividen en tres grandes grupos:

Sistemas absorbentes-eliminadores

Son aquellos que absorben sustancias químicas que están en el interior del envase. Existen absorbentes de oxígeno, etileno, humedad, dióxido de carbono, componentes no deseados, entre otros. Su aplicación depende del producto envasado (Rodríguez-Sauceda, Rojo-Martínez, Martínez-Ruiz, Piña-Ruiz y Ramírez-Valverde, 2014; De Kruijf, Van Beest, Sipilinen-Malm, Paseiro y De Meulenaer, 2002).

A título de ejemplo y considerando que el oxígeno es una de las principales causas de deterioro de los productos alimenticios, se han desarrollado sistemas basados en la oxidación de hierro y sales ferrosas que ralentizan el proceso de oxidación de los alimentos y que se incorporan en el envase en forma independiente, por ejemplo, en forma de saquitos. Su principal campo de aplicación es en productos alimenticios sensibles al oxígeno, como frutos secos, panificados, productos lácteos, cárnicos, etc. (Smith, Ramaswam y Simpson 1990; ABC Pack, 2013).

Otra aplicación importante son los absorbentes de etileno. La mayoría de las frutas y vegetales liberan gas etileno después de la recolección. El etileno acelera la maduración, produce ablandamiento y conduce inevitablemente al deterioro de los alimentos. La presencia de etileno reduce la vida comercial de las frutas y vegetales frescos o mínimamente procesados. Por este motivo, se utilizan absorbentes de etileno tales como permanganato potásico, alúmina, sílica-gel, entre otros. En la presentación comercial, al igual que para los absorbentes de oxígeno, pueden encontrarse como elementos independientes o integrados al envase (Catalá, 2010; Fernández, Picouet y Lloret, 2010).

Sistemas liberadores o emisores

Son aquellos que liberan sustancias químicas en el interior del envase. Su acción implica una transferencia de masa desde el sistema o material activo al contenido del envase; entre estos se encuentran: agentes antimicrobianos (etanol, dióxido de carbono, ácidos sórbico, benzoico, propiónico, bacteriocinas y otros), antioxidantes, aromatizantes, saborizantes, colorantes, ingredientes alimentarios y extractos y aceites esenciales de plantas con acción antimicrobiana o antioxidante (Kerry, O'Grady y Hogan, 2006; Brody, Strupinsky y Kline 2009).

El uso de etanol en el espacio de cabeza del envase actúa de manera efectiva para evitar el crecimiento de microorganismos, bacterias y mohos. Se utilizan en productos de panadería, pastelería y alimentos secos o semisecos (Labuza y Breene, 1989).

Los liberadores de CO₂ inhiben el crecimiento microbiano en los alimentos. Se pueden utilizar conjuntamente con absorbedores de oxígeno para mantener una atmósfera adecuada para la conservación de determinados productos. Se han utilizado sistemas basados en carbonato de hierro (II) o mezclas de hidrógeno carbonato sódico y ácido ascórbico para aumentar la vida comercial de carnes frescas (Kerry et ál., 2006; Franzetti, Martinoli, Piergiovanni y Galli, 2001).

Biopolímeros

Son materiales derivados de fuentes renovables. Se espera que su uso crezca en los próximos decenios debido a su carácter renovable y a su biodegradabilidad general. Hoy en día los únicos biopolímeros con un desarrollo y posibilidad técnica suficiente como para poder ser usados comercialmente en envasado son la celulosa, el almidón y los polímeros del ácido poliláctico. Desafortunadamente, el uso de estas películas biodegradables está fuertemente limitado debido a las pobres propiedades de barrera y a las escasas propiedades mecánicas que muestran estos polímeros (Petersen et ál., 1999; Silvestre, Duraccio y Cimmino, 2011).

En los últimos años se ha prestado especial atención a las propiedades que presentan los sistemas híbridos orgánicos-inorgánicos y, en especial, a aquellos que incorporan nanopartículas de silicatos dispersas en la matriz polimérica. La incorporación de las nanopartículas está ofreciendo una mejora de diferentes propiedades mecánicas, entre otras funciones, como barrera frente a gases, estabilidad a la oxidación, etc. Se espera que el uso de estos nanocompuestos impulse el uso de las películas poliméricas biodegradables, para de este modo reducir los residuos plásticos en la naturaleza (Sorrentino, Gorrasi y Vittoria, 2007).

La utilización de envases activos se ha proyectado hacia una amplia gama de productos. Actualmente, la mayoría de los productos alimenticios tienen en su envase algún componente activo que mejora su performance.

Soluciones tecnológicas desarrolladas para envases inteligentes

Existe una gran variedad de sistemas que pertenecen a este grupo, como indicadores tiempo-temperatura, indicadores de estanqueidad (o de integridad del envase), indicadores de frescura o indicadores de crecimiento microbiano (GS1 Argentina, 2016).

Dentro de estas soluciones se encuentran dispositivos con diversas aplicaciones y maneras de recoger y mostrar la información, de los que se pueden diferenciar dos grandes grupos:

- Sistemas portadores de datos
- Indicadores en el envase

Sistemas portadores de datos

Los sistemas portadores de datos son estándares que permiten a los usuarios obtener en tiempo real información previamente organizada, minimizando los problemas de confusión, duplicación y mala interpretación. Esto es posible porque todo el sistema sigue el mismo código de reglas (GS1 Argentina, 2016).

Estos sistemas constan, en su forma más básica, de un elemento de identificación y un dispositivo capaz de reconocerlo y decodificar la información que contiene. La información requerida por el usuario puede estar contenida directamente en el elemento de identificación o puede ser referenciada a un sistema de base de datos (GS1 Argentina, 2016; GS1 Perú, 2017).

Dentro de este grupo, los códigos de barras son los portadores de datos más difundidos en la actividad comercial e industrial. La identificación por radio frecuencia es otra tecnología que tiene un importante crecimiento en el mercado en los últimos años. A continuación se detallan las características más importantes de estos portadores:

Códigos de barras

Los escáneres de códigos de barras son dispositivos capaces de capturar la imagen de un código de barras para luego poder interpretar la información codificada entre las barras y espacios. Esa información, una vez decodificada, es utilizada para reconocer rápidamente un artículo en cualquier punto de la cadena logística, realizar inventarios y controlar el *stock*, el ingreso y las ventas de cualquier artículo en todo tipo de industrias y comercios (GS1 Argentina, 2016).

Hay diferentes formatos y estándares para la codificación de las barras: UPC, PDF417, Code 39, Code 128, Ean, Datamatrix, QR, entre otros. Al respecto, la Organización de Estándares en Códigos de Barras (GS1) es el organismo encargado de gestionar los formatos a nivel mundial (GS1 Argentina, 2016).

Los códigos de barras pueden ser unidimensionales o bidimensionales. Su principal diferencia radica en la cantidad de información que contienen.

Los unidimensionales solo contienen la información del código asociado, es decir, el lector ve lo mismo que una persona, pero puede hacer una consulta y traer más datos usando el sistema. El ejemplo más conocido es el GTIN 13 (antes llamado EAN-13), que se encuentra generalmente en los productos de comercialización en tiendas y supermercados (GS1 Argentina, 2016; GS1 Perú, 2017).

Los bidimensionales, en cambio, pueden contener solo el código o mucha información. El lector puede leer en el código toda la información disponible sobre ese producto sin necesidad de consultar a ningún sistema de bases de datos externo. Los códigos más difundidos actualmente son el Datamatrix y el QR. El Datamatrix es ampliamente utilizado en las industrias automotriz, microelectrónica y farmacéutica. Por otro lado, el código QR o código de respuesta de alta velocidad (*quick response*) es un sistema para almacenar información en una matriz de puntos o un código de barras bidimensionales, que se caracterizan por los tres cuadrados que se encuentran en las esquinas y que permiten detectar la posición del código al lector. El QR puede almacenar mayor cantidad de información que el Datamatrix debido a su sistema de codificación. Los códigos de barras y los códigos QR son los portadores de datos más difundidos en la actividad comercial e industrial (GS1 Argentina, 2016; GS1 Perú, 2017).

Identificación por radio frecuencia

La identificación por radiofrecuencia o RFID (*radio frequency identification*) es una tecnología de identificación remota e inalámbrica, en la cual un dispositivo lector o *reader* vinculado a un equipo

informático se comunica a través de una antena con un transponder (conocido como *tag* o etiqueta) mediante ondas de radio (AIPIA, s. f.). Esta tecnología, que existe desde los años cuarenta, se ha utilizado para múltiples aplicaciones, incluyendo el cobro de peaje o telepeaje, control de acceso, identificación de ganado y tarjetas electrónicas de transporte (véase, por ejemplo, el SUBE o Sistema Único de Boleto Electrónico).

En los últimos años, la tecnología RFID ha entrado con fuerza al mercado comercial tecnológico gracias a su creciente difusión en aplicaciones de cadena de suministro, que fue motivada por las iniciativas de las cadenas de autoservicio y supermercados.

La tecnología RFID necesitaba un estándar para poder ser reconocida como un lenguaje común entre proveedores y clientes; para ello, GS1 creó el estándar conocido como código electrónico de producto o EPC (*electronic product code*), que utiliza las bondades de la tecnología de RFID para la identificación de cualquier objeto que necesite ser administrado y controlado (GS1 Argentina, 2016).

Muchas son las ventajas de la tecnología RFID sobre el código de barras. Entre ellas podemos mencionar:

- No requiere una línea de visión directa y puede ser interpretado en distancias de hasta 10 m.
- No requiere de intervención humana (ideal para automatizar).
- Lectura simultánea de múltiples artículos (protocolo anticolidión).
- Puede realizar hasta 500 lecturas por minuto (5 veces más rápido que un código de barras).
- Mayor duración y no le afectan los ambientes sucios.
- Capacidad de lectura y escritura.

Esta última característica es su principal funcionalidad, por lo que es utilizada en los envases inteligentes, ya que permite ser usada para seguimiento, trazabilidad, relevamiento de las condiciones de transporte y almacenamiento, temperatura, humedad, entre otras funciones. Pueden almacenar esta información técnica y comercial del producto, y también relevar la información de otros dispositivos inteligentes, por ejemplo, indicadores de temperatura o biosensores (GS1 Perú, 2017; AIPIA, s. f.; Instituto Tecnológico del Embalaje, Transporte y Logística, 2008).

Indicadores en el envase

Los sistemas de relevamiento e indicadores en el envase existen para monitorear e informar al consumidor sobre alguno de los aspectos de los alimentos. El objetivo principal de este sistema es mejorar la calidad o el valor del producto, proporcionar más comodidad y aumentar la respuesta a la mala manipulación o la falsificación. Este tipo de dispositivos pueden censar las condiciones del entorno o el interior del envase o directamente medir las condiciones de calidad del producto. Para ello debe existir contacto entre el producto almacenado y el indicador (PACMAN, 2013).

Según el tipo de relevamiento que realizan o la forma de reportarlo, estos indicadores se dividen en los siguientes grupos:

- Indicadores de tiempo/temperatura
- Indicadores de gases
- Indicadores de humedad
- Biosensores
- Indicadores de madurez

Indicadores tiempo/temperatura

Son dispositivos pequeños que muestran fácilmente cambios medibles, irreversibles y reproducibles dependientes del tiempo y/o de la temperatura. La idea básica que subyace detrás de estos indicadores es que la calidad del alimento se deteriora tanto más rápidamente cuanto más alta es la temperatura de exposición, debido a que se aceleran las reacciones químicas, bioquímicas o el crecimiento microbiano. Por lo tanto, estos indicadores tienen como objetivo principal estimar la calidad y la integridad del producto (Pavelková, 2012).

Existen dos tipos de dispositivos: los que reflejan el efecto acumulativo del tiempo y la temperatura por la exposición del producto a temperaturas superiores a un nivel crítico, conocidos por sus siglas en inglés TTI (*time temperature indicators*), y aquellos que indican si el producto ha sido sometido por debajo o por encima de un valor umbral, llamados por sus siglas en inglés CTI (*critical temperature indicators*). Este tipo de indicadores son los más extendidos y de los que se encuentran muchas patentes (PACMAN, 2013; Aguirre y Herranz, 2009).

Indicadores de gases

Existen ciertos problemas para mantener los alimentos dentro de los envases, ya que estos tienen la capacidad de respirar y seguir modificando la atmósfera interior. Igualmente, la composición de gases puede cambiar fácilmente dentro del envase debido a la interacción con su entorno (Smith et ál., 1990).

Los indicadores de gas se utilizan para monitorear la composición del gas dentro del envase mediante cambios en el color del indicador, producto de una reacción química o enzimática. Los indicadores deben estar en contacto directo con el ambiente gaseoso que circunda al producto. Este tipo de indicadores señalan principalmente la presencia o ausencia de oxígeno dióxido de carbono, aunque se han desarrollado algunos para etileno, etanol y sulfuro de hidrógeno. Entre sus funciones principales también se encuentra la de determinar algún tipo de fuga dentro del empaque de alimentos con atmósferas controladas, así como determinar la frescura de los alimentos, como en el caso de la identificación de etileno en frutas (PACMAN, 2013; ITENE, 2008).

Indicadores de humedad

Son etiquetas que indican variaciones en la humedad mediante un cambio de color. Estos indicadores pueden contener cloruro de cobalto, que reacciona con la humedad, cambiando de azul a rosa cuando esta aumenta. También pueden estar compuestos por cloruro de cobre, que pasa de amarillo a verde con el incremento de humedad (ITENE, 2008). Existen dos tipos de indicadores de humedad:

- *Indicadores de humedad con cambios reversibles.* Son aquellos que cambian de color conforme va aumentando la humedad en el ambiente, pero que vuelven a su color original cuando se secan.
- *Indicadores de humedad máxima.* El color cambia cuando sufre un aumento de humedad significativo, lo que indica que el producto ha sobrepasado un porcentaje de humedad y existe la posibilidad de que se haya deteriorado, es decir, indica que el producto ha perdido sus características organolépticas.

Biosensores y calidad microbiológica

Estos indicadores se basan en la identificación de diferentes metabolitos volátiles generados por el crecimiento microbiano en el alimento, tales como dióxido de carbono, acetaldehído, amo-

niaco, alcoholes y ácidos grasos, así como a la variación de acidez (pH) debido al crecimiento microbiano.

Entre los sistemas de este tipo que se comercializan hoy en día podemos mencionar el Food Sentinel System, sensor Q_s y algunos sistemas con paladio (que reacciona con volátiles que contienen compuestos con azufre y nitrógeno). Esta reacción genera una fluorescencia y provoca un cambio de color en la etiqueta del rosa al amarillo (BION, 2017).

Indicadores de madurez

Los indicadores de madurez, frescura y vida útil podrían considerarse un caso híbrido entre los indicadores de gases y de calidad microbiológica. Estos cambian de color al modificarse los gases internos y los aromas emitidos por la fruta en su maduración. Por ejemplo, el sensor ripeSense es inicialmente de color rojo y pasa gradualmente a naranja y finalmente a amarillo (ITENE, 2008). El consumidor puede conocer de esta forma el estado de madurez de la fruta y seleccionar la que él desea.

Nuevas tendencias en envases activos e inteligentes

En la actualidad existe la necesidad de aumentar la eficiencia y eficacia en la manipulación y preparación de los alimentos, que sin duda alguna es una tendencia universal del mercado (ITENE, 2008). Entre las líneas de investigación y desarrollo más avanzadas actualmente en envases, se pueden mencionar:

Indicadores de cocción con microondas

Los fabricantes de alimentos para cocinar en el microondas han creado indicadores de cocción por microondas o MDI. Estos indicadores son capaces de detectar el punto de preparación de alimentos que están siendo procesados en el microondas y advertir a los consumidores cuando estos están en el punto adecuado, listos para su ingesta (PACMAN, 2013; ITENE, 2008).

Cocción controlada en microondas

Se ha propuesto la idea de integrar un horno de microondas con un microprocesador, un escáner de código de barras y un dispositivo de reconocimiento de voz que podría estar conectado a una pantalla táctil y conexión a Internet. El microprocesador podría tener información sobre las características del horno, algoritmos de cocción y preferencias del consumidor. El alimento podría traer en el código de barras o en un dispositivo RFID información sobre sus características y requerimientos de cocción, que al ser escaneado retroalimentaría al microprocesador en el horno. El microprocesador, por consiguiente, sería capaz de controlar los elementos para cocinar y el disco giratorio del horno para asegurar un cocinado a la perfección y sin ningún tipo de interacción con el consumidor (PACMAN, 2013; ITENE, 2008).

Desarrollo de tintas inteligentes

Actualmente se está investigando con nuevas tintas conductoras para aplicaciones en envases de papel, cartón y *films* flexibles. Los materiales utilizados para desarrollar las tintas inteligentes son principalmente plata, grafito y otros metales con buenas propiedades conductoras y eléctricas. Una aplicación directa sobre los envases de alimentos es evitar la falsificación de productos o asegurar que el envase no fue violado (IAE, s. f.; ITENE, 2008).

Desarrollo de envases caloríficos y refrigerantes

Se trata de un recipiente de una sola pieza y sin costura (de plástico moldeado por inyección) que tiene varias cámaras interiores con las que se produce el calentamiento automático, por efecto de una reacción exotérmica que se genera cuando el consumidor despega una lámina y presiona en el fondo del recipiente. Los elementos que intervienen en el proceso químico son piedra caliza molida y agua pura.

En Estados Unidos, la refrigeración es uno de los objetivos de la industria de envases y embalajes. Instant cool (I. C.) es un nuevo desarrollo que está relacionado con la refrigeración. Este desarrollo incorpora un condensador, un colector de vapor y un desecativo a base de sal. El procedimiento es aplicable en envases rígidos (como latas y botellas) y bolsas. Este método hace que la temperatura del envase y su contenido descienda en pocos minutos casi 17 °C. El procedimiento es aplicable, en principio, a recipientes de aluminio. El proceso de refrigeración se inicia al abrir el envase (López-Rubio, Gavara y Lagarón, 2006).

Otra alternativa es la denominada CoolBev, que técnicamente se trata de una pequeña bolsa de vinilo llena de agua. Al abrir el envase, el líquido contenido en la bolsa refrigerante se comprime y evapora, lo que sustrae el calor al producto, de modo que este se enfría. En este caso es considerable el descenso de la temperatura; según lo indica el fabricante, la temperatura del producto baja 18 °C en dos o tres minutos (PACMAN, 2013; ITENE, 2008; IAE, s. f.).

CONCLUSIONES

El envase evolucionó debido a los nuevos materiales que se han desarrollado y que pueden aplicarse, así como a los cambios actuales en la presentación del producto. En esta evolución, el envase ha pasado por diferentes etapas, desde la primera y simple función de contener al producto (incluyendo, a lo sumo, características de transportabilidad), hasta llegar al concepto de que en el envase se incluyen funciones de interacción con el producto y el consumidor.

La funcionalidad del envase ha cambiado al punto de convertirse, en muchos casos, en la pieza central del producto. La elemental contención que se esperaba de los envases tradicionales muta con los envases activos, que producen la primera fase de integración entre el producto y su envase.

Los sistemas activos pueden formar parte o no de la estructura del envase. Su aplicación se ha generalizado, principalmente en lo referido a los envases de productos alimenticios.

Desde el punto de vista técnico, se puede identificar una extensa variedad de aditivos (emisores o absorbedores) que permiten generar indicadores de calidad de diversos tipos.

Asimismo, se ha verificado la factibilidad técnica de aplicación de los aditivos y se han presentado ejemplos concretos de su implementación exitosa en mercados de consumidores con elevados estándares de exigencia. El valor del relevamiento realizado radica en la demostración empírica tanto de disponibilidad como de aplicabilidad de dichas tecnologías.

Los sistemas inteligentes constituyen un desarrollo tecnológico del envase que es completamente innovador y ofrece interesantes oportunidades para la seguridad, calidad y conservación de los alimentos. Su funcionalidad se basa en detectar, localizar, registrar y/o comunicar información sobre el producto para influir en la toma de decisiones del consumidor. Actualmente, los sistemas portadores de datos (códigos de barras, códigos QR y RFID) y los indicadores del envase son ampliamente utilizados como componentes determinantes en la trazabilidad del producto, así como son indispensables a la hora de optimizar el flujo logístico.

El agregado de tecnología a los envases se concibe como una forma de satisfacer las necesidades y exigencias de clientes cada vez más exigentes, lo que se evidencia en las tendencias que se siguen en el desarrollo de las mismas.

La incorporación de conocimiento tecnológico como estrategia de agregado de valor es una oportunidad fundamental para que a nivel internacional se reconozca la calidad de las materias primas, los sistemas de control higiénico-sanitario a lo largo de toda la cadena de valor y los sistemas adicionales de control de calidad.

Tanto la eficiencia de la cadena logística como el aumento del comercio internacional han sido posibles, en parte, por las nuevas tecnologías desarrolladas en la industria del envase. Sin duda, el sector alimenticio es el que mayores exigencias impone a las características de los envases. El dinamismo impuesto por la caducidad e inocuidad del producto, combinado con las estrategias de comercialización centradas en la imagen, las necesidades y requerimientos de los clientes, es potenciado por la disponibilidad de tecnología cada vez más avanzada, que exige a los productores y a toda la cadena de distribución la implementación de nuevos servicios e información. El agregado de actividad e inteligencia a los envases se posiciona como una de las herramientas estratégicas para cubrir las demandas actuales de todo negocio.

REFERENCIAS [T1]

- ABC Pack. (2013). *Métodos de conservación, absorbedores de oxígeno*. Recuperado de <http://www.abc-pack.com/noticias/metodos-de-conservacion-absorbedores-de-oxigeno/>
- Active and Intelligent Packaging Industry Association. (2017). *News. Africa looks to RFID for Improved cool chain security*. Recuperado de <https://www.aipia.info/news-Africa-Looks-to-RFID-for-Improved-Cool-Chain-Security-753.php>
- Active and Intelligent Packaging Industry Association. (s. f.). [Página oficial de AIPIA]. Recuperado de <http://www.aipia.info>
- Administración Nacional de Medicamentos, Alimentos y Tecnología Médica. (s. f.). *Código Alimentario Argentino*. Recuperado de <https://www.argentina.gob.ar/anmat/codigoalimentario>
- Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria. (s. f.). [Página oficial de EFSA]. Recuperado de <http://www.efsa.europa.eu/>
- Catalá, R. (2010). *Envasado activo. Aplicación en la industria alimentaria*. Recuperado de http://benasque.org/2010fronterastalim/talks_contr/063Envasado_activo-_Benasque-alumnos.pdf
- De Kruijf, N., Van Beest, R., Sipilinen-Malm, T., Paseiro, P., y De Meulenaer, B. (2002). Active and intelligent packaging: applications and regulatory aspects. *Food Additives & Contaminants*, 19(4), 144-162.
- Fernández, A., Picouet, P., y Lloret, E. (2010). Cellulose-silver nanoparticle hybrid materials to control spoilage-related microflora in absorbent pads located in trays of fresh-cut melon. *International Journal of Food Microbiology*, 142(1-2), 222-228.
- Franzetti, L., Martinoli, S., Piergiovanni, L., y Galli, A. (2001). Influence of active packaging on the shelf-life of minimally processed fish products in a modified atmosphere. *Packaging Technology and Science*, 14(6), 267-274.
- GS1 Argentina. (2016). *Identificación mediante códigos bidimensionales*. Recuperado de http://www.gs1.org.ar/SOL_bidimensionales.asp
- GS1 Perú. (2017). *La importancia de los códigos QR en las etiquetas*. Recuperado de <http://innovasupplychain.pe/articulos/12082-la-importancia-de-los-codigos-qr-en-las-etiquetas>

- Hernández, M. (2006). *Evolución de los envases inteligentes en la industria alimenticia*. Recuperado de <http://www.monografias.com/trabajos34/envases-inteligentes/envases-inteligentes.shtml>
- Instituto Argentino del Envase (s. f.). [Página oficial de IAE]. Recuperado de <http://www.packaging.com.ar/>
- Instituto Nacional de Tecnología Industrial. (2012). *Envases y embalajes*. Recuperado de <http://www.inti.gov.ar/atp/pdf/cuadernilloEnvasesyEmbalajes.pdf>
- Instituto Tecnológico del Embalaje, Transporte y Logística. (2008). *Envases inteligentes*. Recuperado de http://www.acenvex.com/documentacion/ENVASES_INTELIGENETES_RFID.pdf
- Kerry, J., O'Grady, M., y Hogan, S. (2006). Past, current and potential utilisation of active and intelligent packaging systems for meat and muscle-based products: A review. *Meat Science*, 74(1), 113-130.
- Labuza, T., y Breene, W. (1989). Applications of "active packaging" for improvement of shelf-life and nutritional quality of fresh and extended shelf-life foods. *Journal of Food Processing and Preservation*, 13(1), 1-69.
- López-Rubio, A., Gavara, R., y Lagarón, J. (2006). Bioactive packaging: turning foods into healthier foods through biomaterials. *Trends in Food Science & Technology*, 17(10), 567-575.
- Mercosur. (2015). *Directivas de la Comisión de Comercio de Mercosur*. Recuperado de <http://www.mercosur.int/innovaportal/v/528/11/innova.front/directivas>
- Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca Argentina. (2017). Observatorio virtual agroindustrial. Recuperado de www.alimentosargentinos.gov.ar/contenido/observatorio/observatorio/observa_03.htm
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. (s. f.). [Página oficial de FAO]. Recuperado de <http://www.fao.org/>
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación y Organización Mundial de la Salud. (2011). *Reunión conjunta FAO/OMS de expertos acerca de la aplicación de la nanotecnología en los sectores alimentario y agropecuario: posibles consecuencias para la inocuidad de los alimentos*. Recuperado de <http://www.fao.org/3/a-i1434s.pdf>
- Ozdemir, M., y Floros, J. (2004). Active food packaging technologies. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 44(3), 185-193.
- PACMAN (2013). *Packaging attivo e intelligente: innovazioni per il futuro*. Recuperado de http://www.pacmanproject.eu/page/newsletters/pdf/it/newsletter_11_2013.pdf
- Pavelková, A. (2012). Time temperature indicators as devices intelligent packaging. *Acta Universitatis Agriculturae et Silviculturae Mendelianae Brunensis*, 61(1), 245-251.
- Petersen, K., Nielsen, P., Bertelsen, G., Lawther, M., Olsen, M., Nilsson, N., y Mortensen, G. (1999). Potential of biobased materials for food packaging. *Trends in Food Science & Technology* 10(2), 52-68.
- Reglamento (CE) n° 450 de 2009. *Materiales y objetos activos e inteligentes destinados a entrar en contacto con alimentos*. Diario Oficial de la Comisión Europea, 29 de mayo de 2009.

- Rodríguez-Sauceda, R., Rojo-Martínez, G., Martínez-Ruiz, R., Piña-Ruiz, H., y Ramírez-Valverde, B. (2014). Envases inteligentes para la conservación de alimentos. *Ra Ximhai*, 10(6), 151-173.
- Silvestre C., Duraccio, D., y Cimmino, S. (2011). Food packaging based on polymer nanomaterials. *Progress in Polymer Science*, 36(12), 1766-171782.
- Smith, J., Ramaswamy, H., y Simpson, B. (1990). Developments in food packaging technology. Part II. Storage aspects. *Trends in Food Science & Technology*, 1, 111-178.
- Soares, N., y Hotchkiss, J. (1998). Bitterness reduction in grapefruit juice through active packaging. *Packaging Technology and Science: An International Journal*, 11(1), 9-18.
- Sorrentino, A., Gorrasi, G., y Vittoria V. (2007). Potential perspectives of bio-nanocomposites for food packaging applications. *Trends in Food Science & Technology*, 18(2), 84-95.
- Unión Latinoamericana del Embalaje. (s. f.). [Página oficial de ULADE]. Recuperado de <http://www.ulade.com>
- World Packaging Organisation. (s. f.). [Página oficial de WPO]. Recuperado de <http://www.worldpackaging.org/>

ELECTROCOAGULACIÓN EN LA REMOCIÓN DE CONTAMINANTES DE EFLUENTES PROVENIENTES DE FERTILIZANTES NITROGENADOS. ARTÍCULO DE REVISIÓN

ELECTROCOAGULATION IN THE EFFLUENT CONTAMINANTS CLEARANCE FROM NITROGEN FERTILIZERS: A REVIEW

Felipe Correa Mahecha*
Diana Marcela Cuesta Parra**
Anyi Paola Melo Hernández***
Laura Juliana Sacristán Yepes****

Recibido: 3 de agosto de 2018

Aceptado: 7 de noviembre de 2018

Resumen

El uso desmedido de fertilizantes, junto a la lixiviación de residuos urbanos y agropecuarios, ha incrementado la presencia de nitratos en las fuentes hídricas, lo que es objeto de varias investigaciones debido a sus repercusiones sobre la salud humana y ambiental. La electrocoagulación ha probado ser una técnica adecuada para la remoción de estos productos; igualmente, tiene ventajas sobre otros tipos de métodos de depuración de aguas, como la coagulación química, la osmosis inversa, el intercambio iónico y los tratamientos biológicos. Este artículo presenta una revisión del desarrollo de la tecnología de electrocoagulación, e incluye información sobre el conjunto de reacciones electroquímicas en los electrodos, así como sobre las reacciones de óxido reducción y en equilibrio en el seno de la solución. Aquí se discute sobre el estudio de las diferentes variables que influyen sobre la eficiencia de remoción, como: densidad de corriente, pH, tipo de electrodos, diseño de la celda y tiempo de retención, al igual que se describe las ventajas y desventajas de esta tecnología. Finalmente se presentan algunas conclusiones generales junto a las perspectivas y enfoques que, según varios autores, deben ser abordados en futuras investigaciones con el fin de llenar los vacíos en el conocimiento de esta tecnología.

Palabras clave: tratamiento de aguas residuales, electrocoagulación, nitratos, remoción, electrodos.

* Ingeniero químico. Docente investigador, grupo de investigación Procesos de Separación no Convencionales, línea de investigación Tratamientos no Convencionales del Agua, Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia. ORCID: orcid.org/0000-0003-1050-8222. felipe.correa@profesores.uamerica.edu.co

** Ingeniera ambiental, máster en Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. Docente investigadora, grupo de investigación Procesos de Separación no Convencionales, línea de investigación Tratamientos no Convencionales del Agua, Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia. ORCID: orcid.org/0000-0001-9287-2452. diana.cuesta@profesores.uamerica.edu.co

*** Estudiante de Ingeniería Química. Grupo de investigación Procesos de Separación no Convencionales, línea de investigación Tratamientos no Convencionales del Agua, Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia. anyi.melo@estudiantes.uamerica.edu.co

**** Estudiante de Ingeniería Química. Grupo de investigación Procesos de Separación no Convencionales, línea de investigación Tratamientos no Convencionales del Agua, Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia. laura.sacristan@estudiantes.uamerica.edu.co

Abstract

The fertilizer overuse joined to the urban and agricultural waste leaching has increased the nitrates presence in the water sources, which has increased the concern due to its human and environmental health repercussion. The electrocoagulation has proven to be a suitable technique for the nitrites removal presenting a series of advantages over other purification methods like the chemical coagulation, reverse osmosis, the ion Exchange and the biological treatments. This article introduces a review of the electrocoagulation technology progress, including information over the set of electrochemical reactions in the electrodes, as well as oxide-reduction electrochemical and balanced reactions within the solution. A discussion is made over the study of different variables that affect over the removal efficiency, like: current density, pH, type of electrodes, cell design and retention time, as well as a description of advantages and disadvantages of this technology. The article concludes with some general conclusions together with outlooks and approaches that, according to several authors, must be addressed in future research to empty spaces in the knowledge of this technology.

Keywords: wastewater treatment, electrocoagulation, nitrates, removal, electrodes.

INTRODUCCIÓN

El aumento en la población mundial, la contaminación de las principales fuentes de agua y el agotamiento de este recurso, por efecto del cambio climático y la sobreexplotación, son las principales causas de la escasez mundial de agua (FAO, 2017). Según la UNESCO, la reserva de agua dulce es suficiente para satisfacer las necesidades actuales de la población mundial; no obstante, el problema radica en su distribución: cerca de 1200 millones de personas habitan en áreas con escasez de agua y 1600 millones sufren de recortes causados por la falta de infraestructura para abastecer los diferentes hogares (FAO, 2013).

A pesar de que el agua es una necesidad básica, más de 1000 millones de personas no tienen acceso a agua potable; como consecuencia, aproximadamente 1.8 millones de niños mueren al año debido a la diarrea y otras enfermedades asociadas al consumo de agua sucia o sin saneamiento (PNUD, 2006).

Por otro lado, el crecimiento de la población mundial también ha requerido de estrategias enmarcadas en la revolución verde, política basada en el uso intensivo de insumos químicos para lograr satisfacer la creciente demanda alimenticia (FAO, 2009), lo que ha llevado a la agricultura a enfrentar nuevos retos relacionados con el incremento de la producción eficiente y sostenible.

Los fertilizantes nitrogenados se han empleado durante décadas con el fin de aumentar la fertilidad de los suelos y su rendimiento productivo (Pérez, 2014); sin embargo, las malas prácticas en el uso de estos fertilizantes, sumadas a la naturaleza altamente soluble de los nitratos, ha hecho que se presente contaminación de los cuerpos de agua superficiales y subterráneos, representado amenazas para la salud pública (Ongley, 1997). Los nitratos se caracterizan por su reducción en nitrito, lo que transforma la hemoglobina en metahemoglobina, sustancia incapaz de fijar oxígeno; esto tiene repercusiones negativas en la salud de los seres humanos, como, por ejemplo, coloración azul de la piel, fatiga, cáncer gástrico, malformaciones del feto y problemas respiratorios (Hashim, Shaw, Al Khaddar, Pedrola y Phipps, 2017; Pérez, 2013; Sevda, Sreekishnan, Pous, Puig y Pant, 2018). Adicionalmente, la presencia de nitratos y nitritos en aguas subterráneas y superficiales pueden causar eutrofización y, por lo tanto, la pérdida de la capacidad de oxigenación de estas aguas, por lo que se han reportado importantes cambios en el ciclo del nitrógeno debido a las intervenciones

antropogénicas, como la escorrentía agrícola y urbana, el uso de pesticidas, actividades industriales con vertimientos no controlados y lixiviación de desechos en aguas residuales y rellenos sanitarios (Khatri y Tyagi, 2015), que elevan el nivel de estos iones en aguas naturales. Por esta razón la eliminación de los nitratos de las fuentes hídricas es fundamental para prevenir estos problemas (Tyagi, Rawtani, Khatri, y Tharmavaram, 2018).

En el caso de Colombia, el río Magdalena transporta 30 millones/año de toneladas de materiales disueltos hacia el mar Caribe, aportando hasta 186 000 toneladas de nitratos al año; cuota que es seguida por la de los ríos Atrato, San Juan y Mira, con 58 000, 25 000 y 14 000 toneladas de nitratos al año, respectivamente. Estos electrolitos provienen mayoritariamente de fuentes antrópicas y causan daños a los ecosistemas; adicionalmente, muchos municipios surten sus acueductos de las aguas de estos ríos, lo que hace necesaria la implementación de tecnologías para la depuración de este contaminante durante el proceso de potabilización (Restrepo y Kjerfve, 2004). La Organización Mundial de la Salud (OMS) ha limitado las concentraciones de nitratos a 50 mg/l para su consumo por parte de adultos y a 15 mg/l para bebés (Li, Feng, Zhang, y Sugiura, 2009). La Resolución 2115 de 2007, del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, estipula una concentración máxima de 10 mg/l de nitratos en agua destinada para consumo humano.

Algunos de los métodos especializados en la remoción de este contaminante son: ósmosis inversa, intercambio iónico y los tratamientos biológicos (Govindan, Noel, y Mohan, 2015). Debido a las dificultades que presentan estas tecnologías para la remoción de nitratos, varios investigadores se han interesado recientemente en la remoción de nitratos empleando la electrocoagulación (Hakizimana et ál., 2017).

Este artículo presenta una revisión del proceso de electrocoagulación enfocada en la remoción de nitratos; aplicación emergente que ha logrado alcanzar un alto rendimiento en el tratamiento puntual de contaminantes, material coloidal y emulsiones. En primera instancia se describe algunas de las técnicas empleadas para la remoción de nitratos, incluyendo los métodos electroquímicos. Luego se profundiza en el proceso de electrocoagulación, los mecanismos de reacción, las ventajas y desventajas de la técnica y los factores que afectan la efectividad de la electrocoagulación, tales como pH, densidad de corriente, tiempo de reacción, concentración inicial de nitratos, voltaje y aspectos del diseño y configuración de las celdas. Finalmente se presentan las perspectivas y campos de estudio que, a criterio de varios autores, son necesarios para llenar los vacíos sobre esta prometedora técnica y garantizar así su aplicación a gran escala.

TÉCNICAS PARA LA REMOCIÓN DE NITRATOS

Las plantas de tratamiento de aguas residuales emplean tres métodos para la depuración del agua, que se pueden dividir en: a) procesos físicos, b) procesos químicos y c) procesos biológicos (Hashim et ál., 2017; Moussa, El-Naas, Nasser, y Al-Marri, 2017). La figura 1 muestra las principales operaciones unitarias asociadas a los tres grupos de procesos típicos.

Procesos físicos	Procesos químicos	Procesos biológicos
<ul style="list-style-type: none"> • Cribado • Flotación • Filtración • Sedimentación • Ósmosis 	<ul style="list-style-type: none"> • Coagulación/floculación • Cloración • Adsorción • Intercambio iónico 	<ul style="list-style-type: none"> • Filtros de goteo • Lagunas de oxidación • Lodos activados • Biodiscos

Figura 1. Clasificación de las operaciones unitarias típicas en plantas de tratamiento de aguas residuales.

Fuente: modificado de Moussa, El-Naas, Nasser y Al-Marri (2017).

En la actualidad se emplean muchos métodos para el tratamiento de aguas destinadas al consumo humano y para la depuración de aguas residuales. La coagulación es el método más usado debido a sus bajos costos. Este método emplea la adición de un agente químico para lograr la desestabilización de partículas, logrando que predominen en la disolución las fuerzas de atracción frente a las de repulsión (Martínez, 2007); aquí las partículas colisionan durante la etapa de agitación rápida mientras el coagulante se difunde por la solución neutralizando las cargas. Durante la floculación se emplea la agitación lenta para lograr la aglomeración de las partículas desestabilizadas, permitiendo así la formación de partículas más grandes y de mayor peso, lo que mejora su separación posterior (Petrii y Safonova, 1992). Sin embargo, la naturaleza estable y altamente soluble de los nitratos hace que las partículas tengan un bajo potencial para su precipitación o adsorción, por lo que los métodos convencionales de tratamiento de aguas suelen ser ineficaces para su remoción (Emamjomeh y Sivakumar, 2009).

El estudio de Lacasa, Cañizares, Sáez, Fernández y Rodrigo (2011) comparó la eficiencia de la electrocoagulación frente a la eficiencia de remoción por coagulación química en aguas subterráneas, empleando $AlCl_3$ y $FeCl_3$ como agentes de coagulación. La investigación llegó a la conclusión de que la coagulación química con estos agentes no es adecuada para la remoción de nitratos; al parecer, el aumento en la conductividad cuando se dosifica el coagulante promueve la competencia entre el contaminante y los contraiones de los coagulantes, lo que reduce el espesor de la doble capa eléctrica en las partículas. Por su parte, la electrocoagulación tiene un poder superior para la remoción de este contaminante, debido a que durante el proceso se forman hidróxidos de hierro o aluminio que adsorben los nitratos en solución mediante mecanismos de barrido; al parecer, la formación de estos precipitados son el principal mecanismo detrás de la alta eficiencia de remoción de nitratos en las técnicas de electrocoagulación (Lacasa et ál., 2011).

A continuación se analizan los métodos más empleados para la eliminación de nitratos y nitritos de diferentes fuentes de aguas.

Osmosis inversa

La osmosis inversa es un proceso de difusión controlada, en el cual la transferencia de iones ocurre a través de una membrana por el principio de difusión (Mora-Molina, Járay, Vatai y Bekassy-Molnar, 2004). El intercambio de sustancias se da gracias a un gradiente de presión de 300-500 psi (Archana, Sharma y Chander, 2012), que impulsa la transferencia para finalmente remover el contaminante (Soto y Soto, 2013). Esta técnica se caracteriza por la alta eficacia (50-98 %) a la hora de remover los nitratos en solución. Las principales variables que influyen la eficacia de esta técnica son el tipo de membrana y la presencia de calcio o iones bivalentes en la solución, que al concentrarse durante el proceso pueden precipitar en la superficie de la membrana, causando incrustaciones y reduciendo su capacidad. Por su parte, el uso combinado de la nanofiltración y la osmosis inversa mejora significativamente la eficiencia de la técnica, debido a que se logra la remoción de iones bivalentes en el agua que pasa a la etapa de osmosis inversa, eliminando así las incrustaciones en la membrana (Bohdziewicz, Bodzek y Wsik, 1999; Schoeman y Steyn, 2003).

El proceso genera una salmuera concentrada en nitratos y otros iones por lo que no puede ser descargada en efluentes, lo que hace que esta técnica tenga limitaciones para su uso industrial (Koparal y Ögütveren, 2002). Adicionalmente, los métodos basados en membranas suelen tener altos costos energéticos debido a los requisitos de altas presiones y desgaste de las membranas (Uzun y Debik, 2019).

Intercambio iónico

El proceso de intercambio iónico implica tener en contacto un lecho que contiene resinas de intercambio aniónico y una mezcla rica en iones (nitratos), con el fin de realizar un intercambio de iones de nitrato por cloruro o bicarbonato hasta que se agote la capacidad de intercambio de la resina (Rodríguez, 1995; Samatya, Kabay, Yüksel, Arda, y Yüksel, 2006)

Esta técnica presenta desventajas debido al exceso de regenerante que se debe emplear periódicamente; adicionalmente, el nitrato removido presente en la solución residual no puede ser eliminado, por lo que se ve reflejado en costos elevados (van der Hoek, van der Hoek y Klapwijk, 1988)

La ósmosis inversa y el intercambio iónico son los métodos físicos de remoción de nitratos más empleados; sin embargo, estos no eliminan los iones nitrogenados, sino que los remueven de la solución acuosa, generando una salmuera concentrada que requiere de procesos adicionales para su disposición (Schoeman y Steyn, 2003). Para que estas tecnologías puedan ser usadas ampliamente se requiere de avances en el desarrollo de resinas y membranas de bajo costo y altos niveles de regeneración, además de procedimientos rentables para la disposición de las salmueras de nitratos obtenidas (Zhao, Kong y Wang, 2017)

Tratamiento biológico

El método más efectivo para la remoción de nitratos en aguas residuales son los mecanismos biológicos. Este proceso basa su principio en el uso de componentes orgánicos como alimento o sustrato que suministra energía para el desarrollo y crecimiento de los microorganismos (Henry, 1999). El tratamiento biológico ocurre en ausencia de oxígeno, es decir, en condiciones anóxicas, ya que en presencia de oxígeno el nitrato y la materia orgánica se oxidan y las bacterias no usan el nitrato como fuente de sustrato (Villaseñor, 1999). La eliminación del nitrato por tratamiento biológico consiste en la reducción del contaminante a nitrito, óxido de nitrógeno o nitrógeno gaseoso (Keith, MacFarlane y Herbert, 1982).

Esta técnica presenta desventajas, ya que existen aguas que por sus características y tipos de contaminante inhiben el crecimiento de los microorganismos (Xu et ál., 2018); por otra parte, puede presentarse una posible contaminación del agua por parte de los microorganismos empujados, lo que hace que se requiera de un control riguroso, con una eficiencia condicionada y altos costos (Park y Yoo, 2009). Además, la generación de lodos durante los procesos biológicos puede ser considerable, lo que llevaría a sobrecostos porque esto hace necesario un tratamiento posterior (Osaka, Shirotani, Yoshie, y Tsuneda, 2008; Schoeman y Steyn, 2003).

Las tecnologías de tratamiento biológico son todavía muy costosas y tienen limitaciones en diversos tipos de aguas residuales, en especial las que contienen altas concentraciones de compuestos clorados y metales pesados. Algunos compuestos químicos conducen a la formación de compuestos más peligrosos por vía biológica; este es el caso del tricloroetano, que presenta una serie de reacciones mediadas por microorganismos que forman cloruro de vinilo, un importante compuesto carcinógeno (Garzón, Rodríguez-Miranda y Hernández-Gómez, 2017). Las aguas con bajos contenidos de fósforo o con pH extremos limitan el crecimiento de microorganismos y plantas, lo que implica la realización de pretratamientos y adición de nutrientes y acondicionadores, encareciendo los tratamientos (Moussas y Zouboulis, 2011). La desnitrificación por vía biológica tiene una alta dependencia de los contenidos de carbono y de la temperatura de operación (Song et ál., 2019)

Los sistemas bioelectroquímicos surgen como una alternativa para la eliminación de múltiples contaminantes; adicionalmente, se ha propuesto la recuperación de energía mediante celdas de combustible microbiano (Sevda et ál., 2018). Recientemente se han publicado nuevas tecnologías de sistemas bioelectroquímicos, en las que un campo eléctrico se aplica para estimular los microorga-

nismos; al parecer, la electrocoagulación combinada con la bioremediación aumenta la abundancia relativa de géneros relacionados con la eliminación de nitrógeno, como *Nitrosomonas*, *Comamonadaceae*, *Haliangium* y *Denitratisoma* (Li, Dong, Qian, Hu, y Ye, 2018).

PROCESOS ELECTROQUÍMICOS

Los métodos electroquímicos presentan algunas ventajas frente a las tecnologías físicas, químicas y biológicas; por una parte, son métodos relativamente simples, ya que no requieren del uso de reactivos químicos, y por otra, producen pocos lodos y sus requerimientos de mantenimiento son mínimos. Estos métodos incluyen la electroreducción, la electrocoagulación y la electrodiálisis; los dos primeros logran la eliminación del nitrato mediante su reducción a nitrógeno gaseoso, mientras que la electrodiálisis emplea principios físicos como la adsorción y la migración (Xu et ál., 2018).

La electroreducción se emplea para la eliminación de nitratos en aguas residuales con alta salinidad, usando electrodos de titanio, iridio, rutherfordio, óxidos de titanio y de cobalto, mientras que la electrocoagulación se emplea preferiblemente para el reciclaje o reutilización de las aguas residuales. Por su parte, la electrodiálisis es más empleada para la obtención de agua potable (Xu et ál., 2018).

La electrocoagulación no es una tecnología nueva, se conoce su uso en plantas de agua potable desde el siglo XIX en Inglaterra y a inicios del siglo XX en los Estados Unidos, tanto en plantas de agua potable como residual. Para inicios de los años cuarenta, fueron sustituidas por plantas de coagulación química y tratamientos biológicos, por razones de operatividad y por el costo de la electricidad de la época. En la actualidad las ventajas de la electrocoagulación han sido “redescubiertas”; se han encontrado aplicaciones emergentes, como la remoción de nitratos, amoníaco, slidos suspendidos, pesticidas, detergentes, fosfatos, cianuro, boro, radio nucleótidos, contaminantes orgánicos, metales pesados y microorganismos (García-Segura, Eiband, Maesia, de Melo y Martínez-Huitle, 2017; Song et ál., 2019). Las publicaciones sobre su uso han aumentado desde la década de los noventa (Hakizimana et ál., 2017).

La electrocoagulación es una tecnología eficaz para el tratamiento de diversos tipos de aguas y tiene una alta eficiencia en la remoción de contaminantes persistentes de origen mineral y orgánico. Se ha empleado para la eliminación de metales pesados (cromo, arsénico, cobre, níquel y zinc) y para el tratamiento de aguas en la industria del cuero y textil, removiendo el cromo hexavalente y la materia orgánica, así como para la eliminación de hidrocarburos en la industria alimenticia y del papel y en refinerías petroquímicas (Hashim et ál., 2017). La versatilidad de la tecnología permite la desestabilización de emulsiones en aguas contaminadas con aceites, grasas e hidrocarburos; la eliminación de tintas en aguas residuales; la remoción de compuestos fenólicos persistentes; el tratamiento de aguas residuales municipales, y la obtención de agua potable a partir de aguas subterráneas y superficiales (Emamjomeh y Sivakumar, 2009).

En la electrocoagulación se desestabilizan las partículas por medio de la electricidad a través de placas metálicas paralelas (llamadas electrodos) para conseguir una neutralización de cargas, o bien para la formación de agregados, permitiendo su separación por sedimentación o flotación.

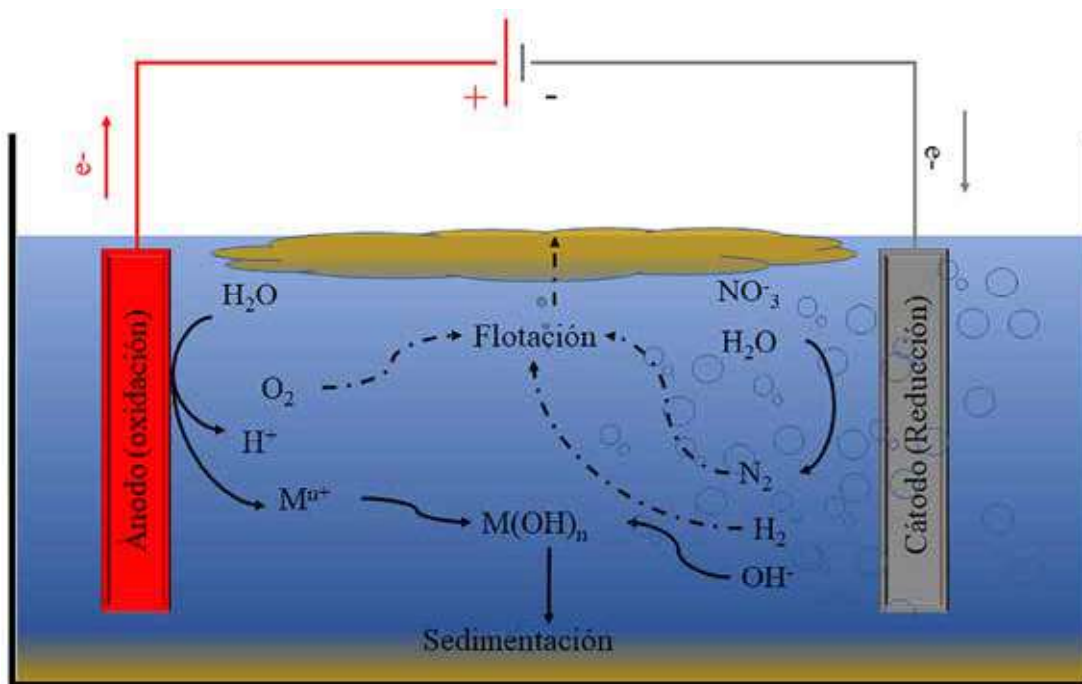


Figura 2. Representación esquemática de una celda de electrocoagulación.

Proceso de electrocoagulación

En su forma más básica, un sistema de electrocoagulación es simplemente una celda electrolítica. Este sistema actúa como una celda galvánica inversa que en lugar de generar electricidad la consume, por lo que requiere de una fuente de potencia externa (figura 2). La fuente de corriente está conectada a un sistema ánodo-cátodo sumergido en una solución acuosa (Lee y Gagnon, 2014).

Al ser una celda electrolítica, el ánodo es conectado al polo positivo de la fuente eléctrica y el cátodo en el polo negativo. Las reacciones electroquímicas ocurren como consecuencia del flujo de electrones entre los electrodos metálicos a través la solución acuosa, generando los procesos de reducción en el cátodo en donde el agua se descompone produciendo hidrógeno (generación de burbujas), mientras que los de oxidación se generan en el ánodo (disolución electroquímica del metal de sacrificio) (Barrera-Díaz, Balderas-Hernández y Bilyeu, 2018). Una serie de reacciones redox y de equilibrio ácido-base tiene lugar en el seno de la solución, gracias a la desestabilización del equilibrio causada por la fuente de energía; cuando esto ocurre, los contaminantes forman componentes hidrofóbicos que se precipitan o flotan, facilitando su remoción por algún método de separación secundario (Morales y Acosta, 2010).

El proceso de la electrocoagulación se desarrolla en tres vías: electrocoagulación, electroflotación y electroreducción. En la electrocoagulación se logra la desestabilización de los nitratos en la solución, emulsión o dispersión, mediante el flujo de una corriente eléctrica que libera a los metales del ánodo, generando iones metálicos que posteriormente se transforman en hidróxidos insolubles; a medida que estos se van agregando, atrapan algunos contaminantes durante la coagulación. Al aumentar su masa molecular se inicia la floculación, en la que las partículas precipitan por acción de la gravedad; los hidróxidos adsorben en su superficie algunos iones y partículas electronegativas en un mecanismo denominado barrido, que remueve la mayoría de los nitratos formando un lodo

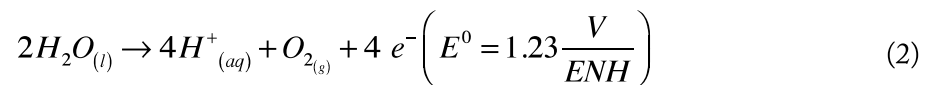
(Song et ál., 2019). En forma simultánea, durante los procesos electrolíticos se generan gases de la descomposición del agua y la reducción de los nitratos, los que promueven la flotación de contaminantes insolubilizados y adsorbidos, llevándolos a la superficie en forma de flóculos que flotan gracias al atrapamiento de burbujas en su estructura. De forma paralela, los nitratos migran por diferencia de concentración y son reducidos en el cátodo, formando nitrógeno gaseoso inocuo y amoníaco, gases que se suman al hidrógeno en el mecanismo de flotación (Essadki y Shao, 2012; Xu et ál., 2018). Estos mecanismos involucran subprocesos electroquímicos (disolución del metal, reducción del agua, electrodepuración de contaminantes), químicos (equilibrios ácido-base, precipitación del hidróxido, reacciones rédox en solución) y físicos (adsorción, coagulación y flotación) (Hakizimana et ál., 2017).

Reacciones en el proceso de electrocoagulación

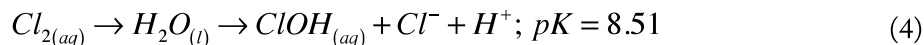
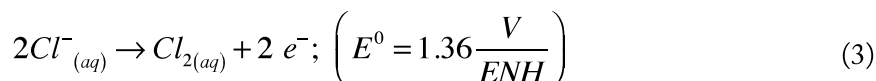
Debido a que el proceso de electrocoagulación es complejo se presentarán las reacciones en tres secciones separadas; algunas ocurren en forma simultánea, y otras, en serie. En primera instancia se presenta las reacciones de oxidación que tienen lugar en el ánodo, seguidas por las reacciones de reducción que ocurren en el cátodo; estos dos conjuntos de reacciones ocurren gracias a la aplicación de un potencial eléctrico entre los electrodos, lo que induce la aparición de una corriente eléctrica responsable del proceso electroquímico. Finalmente se discutirá sobre las reacciones que ocurren en el seno de la solución acuosa y que están dominadas por reacciones rédox y equilibrios ácido base. En cada una de las secciones se incluirán las reacciones específicas del aluminio y el hierro, ya que son los electrodos más empleados en la técnica para la remoción de nitratos.

Reacciones en el ánodo

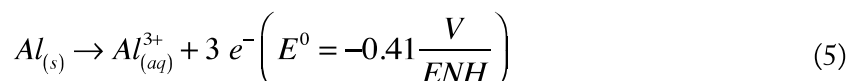
En la electrocoagulación, las especies coagulantes son generadas *in situ* mediante la disolución eléctrica de un ánodo de sacrificio; generalmente, el ánodo de sacrificio se oxida por la acción de la corriente eléctrica, formando iones metálicos que se disuelven en la solución (reacción 1). La intensidad de la corriente influencia la velocidad de dosificación del coagulante a medida que se va desgastando el ánodo; los metales contenidos en él terminarán formando parte de los lodos al final del proceso. De forma simultánea puede ocurrir la hidrólisis del agua (reacción 2) (Arango, 2014; Gilpavas, 2008):



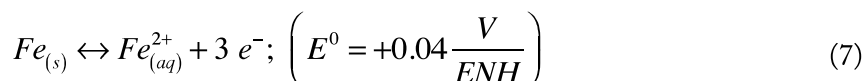
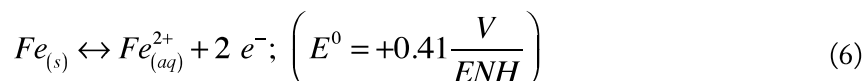
Cuando el potencial anódico es muy alto, esta segunda reacción puede ocurrir de forma significativa aumentando el consumo energético; adicionalmente, en presencia de cloruros, estos pueden ser oxidados a Cl_2 (reacción 3), que al ser un oxidante fuerte contribuye a la eliminación de contaminantes orgánicos. También puede formarse el ácido hipocloroso (a pH ácidos) (Hakizimana et ál., 2017) o el ion hipoclorito a pH alcalinos, que sirven para la disminución de los efectos de pasivación del ánodo mediante reacciones de corrosión por picadura en la superficie del mismo (Mameri et ál., 1998):



Cuando el aluminio actúa como ánodo, las reacciones electroquímicas propuestas (Arango y Garcés, 2007; Demirbas y Kobya, 2017; Hakizimana et ál., 2017) son:

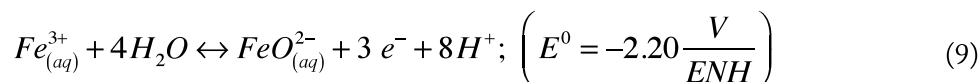
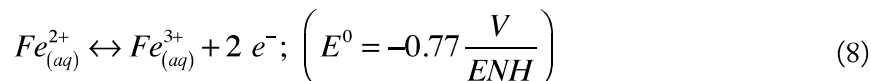


Para los casos en los que el hierro actúa como ánodo se han propuesto dos mecanismos con los que se realiza la formación de hidróxido ferroso $Fe(OH)^2$ e hidróxido férrico $Fe(OH)^3$, respectivamente (Arango y Garcés, 2007; Bayramoglu, Kobya, Can, y Sozbir, 2004; Kobya, Demirbas, Bayramoglu y Sensoy, 2011). El conjunto de reacciones que ocurren hacen que el proceso sea más complejo (Hakizimana et ál., 2017). Por su parte, la oxidación del ánodo puede conducir a cationes ferrosos y férricos:



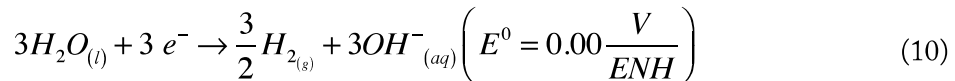
Durante la oxidación del ánodo se forma principalmente Fe^{2+} . Está demostrado que la velocidad de disolución del Fe^{3+} es despreciable (Malakootian, Yousefi, y Fatehizadeh, 2011).

Algunas reacciones electroquímicas que ocurren entre las especies formadas en solución (Hakizimana et ál., 2017) son:



Reacciones en el cátodo

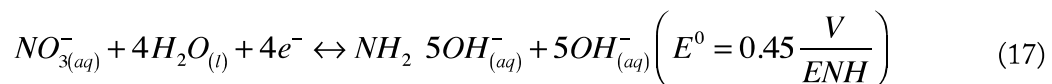
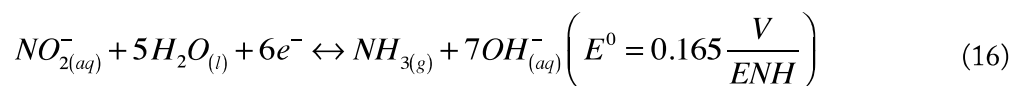
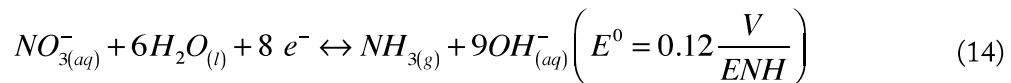
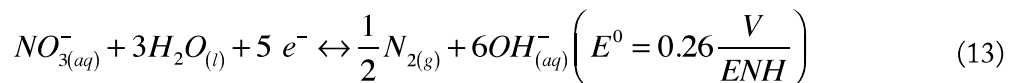
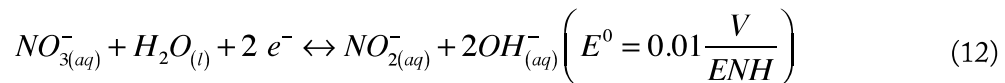
El agua se reduce a hidrógeno gaseoso y a iones hidroxilo (Hakizimana et ál., 2017):



En algunas ocasiones, cuando el potencial de la celda lo permite, puede ocurrir una electrodeposición en el cátodo, descrita por la siguiente reacción (Arango, 2014; Gilpavas, 2008):



Una de las tecnologías de mayor eficiencia para la depuración de aguas contaminadas con nitratos es la desnitrificación con aluminio (Emamjomeh y Sivakumar, 2009; Hashim et ál., 2017). En los procesos de electrocoagulación y electroreducción, cuando se emplean electrodos de aluminio o hierro, se reducen los nitratos a nitrógeno y amoníaco de acuerdo a las siguientes reacciones (Hashim et ál., 2017; Koparal y Ögütveren, 2002; Xu et ál., 2018):



En la figura 3 se presenta un esquema que resume el conjunto de reacciones de eliminación de nitritos por electroreducción en el cátodo (reacciones 12 a 17).

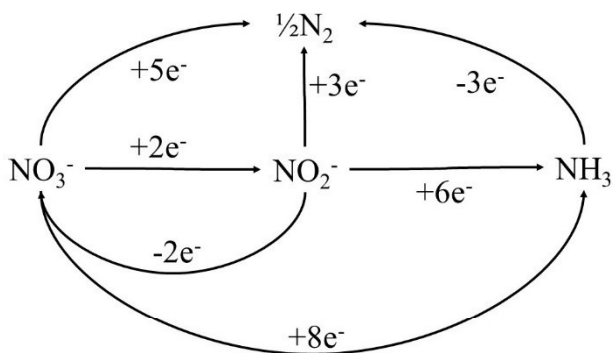


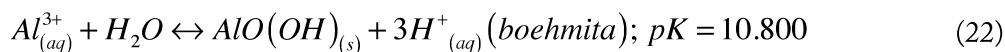
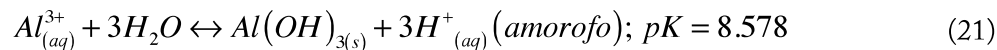
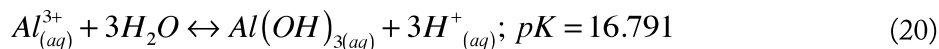
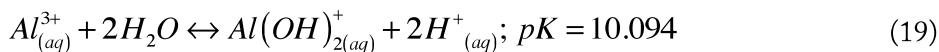
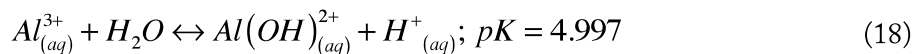
Figura 3. Representación de las reacciones de electroreducción en el cátodo.

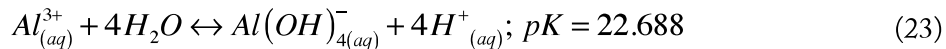
Fuente: modificado de Govindan, Noel y Mohan (2015).

Reacciones en la solución acuosa

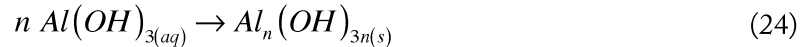
Los metales que son liberados del ánodo experimentan diversas reacciones en equilibrio con el agua y los contaminantes presentes en la solución, que incluyen reacciones ácido-base, complejación, reacciones redox y precipitación. La reacción más extendida es la formación de hidróxidos metálicos con baja solubilidad; por su parte, los contaminantes en el agua pueden ser adsorbidos física o químicamente sobre la superficie de los precipitados (Hakizimana et ál., 2017)

Cuando los electrodos son de aluminio la disolución del ánodo produce especies con cargas eléctricas positivas (como el Al^{3+}), que en contacto con el medio acuoso se transforma en sus respectivos hidróxidos o polihidróxidos, los cuales tienen gran afinidad con la materia orgánica. Este coagulante atrae a la materia orgánica dispuesta en coloides formando coágulos (Arango y Garcés, 2007). Las reacciones que pueden ocurrir son variadas y en equilibrio (reacciones 18 a 23). La distribución de especies puede ser precedida mediante el uso de diagramas de Pourbaix o mediante balances de materia empleando las constantes de equilibrio (Hakizimana et ál., 2017):



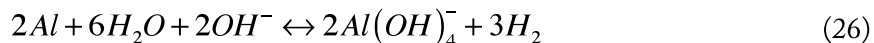


Los cationes solubles del Al^{3+} son mayoritarios cuando el pH es inferior a 4, mientras que los aniones de aluminato son mayoritarios con pH superior a 10; en un rango intermedio de pH prevalece la especie $Al(OH)_3$. Las especies poliméricas ocurren de acuerdo a la siguiente reacción general (Hakizimana et ál., 2017; Kobya et ál., 2011):

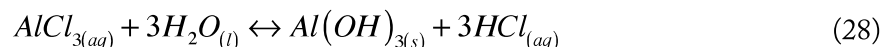
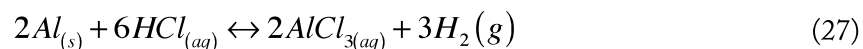


La acidez de Lewis de los compuestos de aluminio produce un efecto tampón o *buffer* frente a la producción de OH^- en el cátodo, logrando pH finales entre 7 y 8, lo que representa una ventaja frente a los cambios de pH experimentados en la coagulación química (Harif, Khai y Adin, 2012). La formación de $Al(OH)_3$ amorfo (reacción 24) y su posterior polimerización generan flóculos hidrófobos e insolubles, con grandes áreas superficiales que favorecen los fenómenos de adsorción y atrapamiento de coloides, por lo que se les ha dado el nombre de “flóculos de barrido” (Kobya et ál., 2011), ya que van depurando el agua a medida que precipitan.

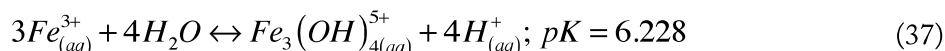
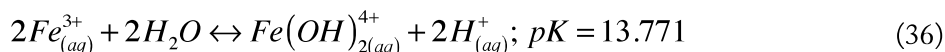
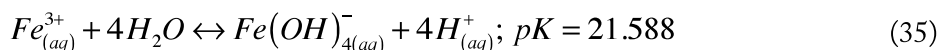
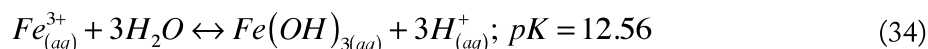
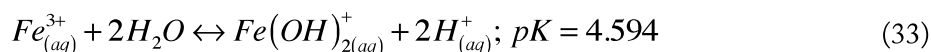
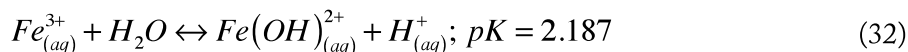
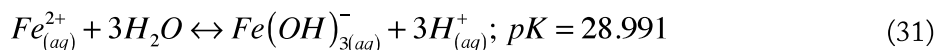
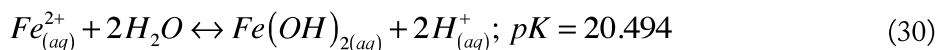
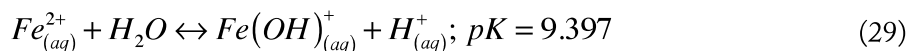
Pueden ocurrir reacciones secundarias entre los electrolitos del agua y el ánodo o cátodo bajo condiciones ácidas o alcalinas (reacciones 25 y 26); por lo tanto, la cantidad de aluminio liberado durante la electrocoagulación puede superar lo predicho por la ley de Faraday en hasta un 200 % (Mouedhen, Feki, Wery y Ayedi, 2008).



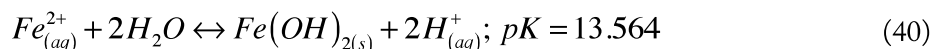
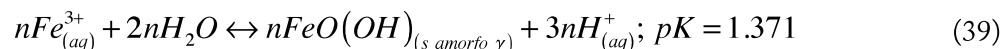
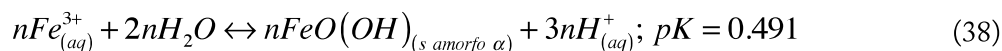
Con el fin de disminuir la pasivación del electrodo se suele adicionar NaCl al agua a depurar, lo que permitirá una corrosión por picadura, creada por reacción entre el Cl-adsorbido en la película de óxido de aluminio con el ion Al^{3+} , fenómeno que depende del pH de la solución, la concentración del electrolito y la densidad de corriente. El mecanismo de corrosión se describe por las reacciones 27 y 28 (Hakizimana et ál., 2017):

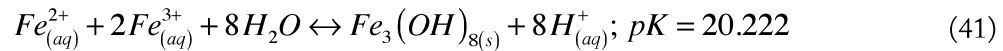


Para el caso en el que el hierro actúa como ánodo se presentan reacciones de un mayor grado de complejidad, representada en el siguiente conjunto de reacciones, en las que los iones ferrosos y férricos se hidrolizan en agua para formar varias especies monoméricas (reacciones 29 a 37) (Hakizimana et ál., 2017; Malakootian et ál., 2011):

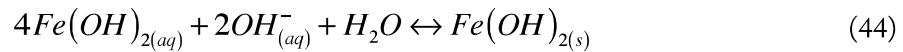
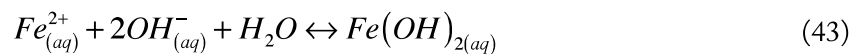
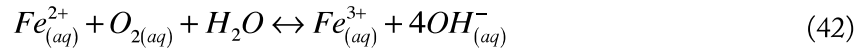


La distribución de las especies en la solución dependerá de la proporción de iones férricos y ferrosos, como también del pH y los contaminantes presentes en el agua; finalmente se llegará a la formación de especies poliméricas en solución con diversas estructuras amorfas (reacciones 38 y 39). También se presentan reacciones entre los iones férrico y ferroso para dar lugar a otras especies insolubles (reacción 41). Finalmente, las especies insolubles se aglomeran, floculan, sedimentan o flotan, realizando una acción de depuración por adsorción de sustancias orgánicas solubles, atrapamiento de partículas coloidales y barrido de los contaminantes (Hakizimana et ál., 2017; Jiménez, Sáez, Martínez, Cañizares y Rodrigo, 2012; Xu et ál., 2018).



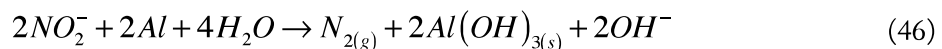
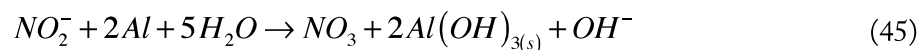
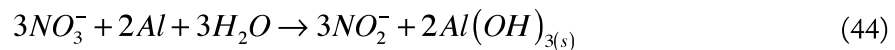


En medios ácidos los cationes Fe^{2+} sufren una lenta oxidación gracias a la presencia de oxígeno disuelto (reacción 42). En medios neutro o alcalinos el Fe^{2+} prefiere transformarse rápidamente a hidróxido ferroso (reacción 43); en presencia de oxígeno disuelto, reacciona rápidamente para formar hidróxido de hierro III (reacción 44) (Hakizimana et ál., 2017), especie insoluble que también participa de los procesos de coagulación, floculación y sedimentación y flotación.

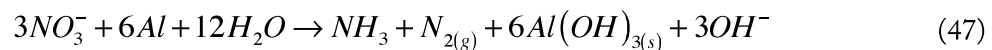


La remoción de nitratos por electrocoagulación ocurre gracias a la oxidación del metal en el ánodo que se descompone; esto libera los iones metálicos que posteriormente precipitarán en forma de hidróxidos adsorbiendo al contaminante; en forma simultánea se realiza la reducción de los nitratos, en nitrógeno o amoníaco, según las condiciones experimentales (Tabash, 2013) (ver figura 3 y reacciones 12 a16). El nitrato se puede reducir por muchos metales, como magnesio, manganeso, zinc, cromo, hierro, cadmio, estaño, aluminio y plomo (Emamjomeh y Sivakumar, 2009). Entre estos metales, el aluminio y el hierro son los más utilizados debido a su disponibilidad y bajo precio; igualmente, porque los hidróxidos formados por precipitación son relativamente no tóxicos y tienen una alta valencia que permite una eficiente eliminación de los nitratos (Hakizimana et ál., 2017).

El mecanismo para la reducción de nitratos descrito por Murphy (1991), utilizando polvo de aluminio y sin mediación de la corriente eléctrica, se muestra a en las siguientes reacciones (Emamjomeh y Sivakumar, 2009):



Reacción global,



Ventajas y desventajas

La electrocoagulación ha logrado alcanzar un desarrollo comercial importante en el tratamiento puntual de algunos contaminantes, ubicándose como una técnica con mayores ventajas comparativas con respecto a las tecnologías tradicionales de tratamiento. Por esta razón se resaltan algunas ventajas y desventajas que tiene este tipo de proceso.

Tabla 1. Ventajas y desventajas de un proceso de electrocoagulación

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Es un método no específico que permite la remoción simultánea de múltiples contaminantes. • Los costos de operación son menores que los de procesos convencionales usando polímeros. • Requiere de equipos simples y fáciles de operar, con la suficiente libertad operacional para manejar los problemas encontrados en su funcionamiento. • La automatización completa del proceso es posible a un bajo costo. • El reactor no requiere de partes móviles. • Puede generar aguas potables, incoloras e inodoras. • Elimina requerimientos de almacenamiento y uso de productos químicos. • Al no emplearse sustancias químicas, se elimina la posibilidad de contaminación secundaria. • Genera lodos más compactos y en menor cantidad, que involucra menor problemática de disposición. • Produce flóculos más grandes que aquellos formados en la coagulación química y contienen menos agua ligada, además de que pueden ser separados rápidamente por filtración. • Alta efectividad en la remoción de un amplio rango de contaminantes. • Purifica el agua y permite su reciclaje. • Reduce la contaminación en los cuerpos de agua. • El agua tratada por electrocoagulación contiene menor cantidad de sólidos disueltos que aquellas tratadas con productos químicos, situación que disminuye los costos de tratamiento de estos efluentes en el caso de ser reusados. • Remueve las partículas coloidales más pequeñas, ya que el campo eléctrico aplicado las pone en movimiento más rápidamente, lo que facilita la coagulación. • Las burbujas de gas producidas pueden llevar el contaminante a la superficie de la solución, donde puede concentrarse fácilmente, ser recuperado y removido. 	<ul style="list-style-type: none"> • Reposición de los electrodos de sacrificio. • Requiere de mantenimiento continuo. • Los lodos contienen altas concentraciones de hierro y aluminio, dependiendo del material del electrodo utilizado. • Puede ser un tratamiento costoso en regiones en las cuales el costo de la energía eléctrica sea alto. • No es efectivo en la remoción de DBO soluble, proveniente de solventes y anticongelantes. • Una película de óxido impermeable puede formarse en el cátodo que lleva a la pérdida de eficiencia del proceso, fenómeno que se denomina pasivación del cátodo. • El agua a tratar requiere tener alta conductividad eléctrica. • Genera lodos con metales como el aluminio o hierro, que deben ser almacenados, tratados y dispuestos.

Fuente: adaptación propia a partir de Hakizimana et ál. (2017), Martínez (2007) y Mollah et ál. (2004).

FACTORES QUE AFECTAN LA ELECTROCOAGULACIÓN

En la mayoría de los procesos electroquímicos, la intensidad de corriente y el tipo de electrodos son los parámetros más influyentes sobre la velocidad de reacción en el reactor. La cinética del proceso sigue un proceso simple de primer orden (Emamjomeh y Sivakumar, 2009); sin embargo, la presencia de turbidez genera un efecto inhibitorio que cambia el orden de la reacción de 1 a 0 (Majlesi, Mohseny, Sardar, Golmohammadi, y Sheikhmohammadi, 2016). Los estudios realizados han mostrado que en procesos de eliminación de nitritos y amoníaco el efecto del pH es menos significativo que el de la conductividad eléctrica, la intensidad de la corriente y el tiempo de reacción (Hakizimana et ál., 2017).

Hakizimana y su equipo (2017) han propuesto modelos del proceso basados en los múltiples fenómenos que intervienen en la electrocoagulación. Los modelos basados en la fenomenología del proceso son complejos y requieren de soportes tanto teóricos como empíricos; en ellos se incluye la cinética de la reacción, en la que la electroquímica es el eje fundamental e implica los fenómenos de transporte de cargas, cinética electroquímica, conocimiento de las interfaces de los electrodos y termodinámica. Estudios más profundos incluyen los fenómenos de transferencia de masa y los modelos de adsorción (Balasubramanian, Kojima, y Srinivasakannan, 2009).

A continuación, se presentan las variables significativas que están relacionadas con la efectividad del proceso, junto a una discusión sobre su efecto.

pH

El pH influye de manera directa sobre la eficiencia del proceso, ya que afecta la conductividad de la solución y mejora la disolución del electrodo para formar los hidroxilos metálicos (Moussa et ál., 2017). Además, se ha encontrado que el pH varía durante todo el proceso de electrocoagulación dependiendo del material de los electrodos y del pH inicial del agua a tratar (Arango, 2012).

Otro efecto está relacionado con la especie coagulante formada, ya que las diferentes especies en equilibrio (especie iónica, complejos hidróxido o polihidróxidos) son diferentes dependiendo del pH (García-Segura et ál., 2017). La solubilidad de los iones metálicos, sus complejos y otras sustancias formadas también varían con el pH de la solución (Nanseu-Njiki, Tchamango, Ngom, Darchen y Ngameni, 2009; Yilmaz, Boncukcuoğlu, Kocakerim, Yilmaz y Paluluoğlu, 2008).

En el caso de ánodos de aluminio y hierro se logra la formación de especies con poder de desestabilización de coloides a pH ligeramente ácido, neutro y ligeramente alcalinos; cuando la solución es muy ácida, los hidróxidos de hierro y aluminio suelen no ser efectivos debido a su baja estabilidad; en condiciones altamente alcalinas se forman los iones $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ y $\text{Fe}(\text{OH})_4^-$, los que tienen un bajo rendimiento de coagulación (Hashim et ál., 2017; Xu et ál., 2018). El pH varía durante el proceso cuando se emplean electrodos de aluminio; este se considera un neutralizador del pH, en especial cuando el valor inicial del pH no es muy extremo; para valores de pH inferiores a 3 y superiores a 11, el cambio en esta variable no suele ser de importancia (Moussa et ál., 2017).

El rendimiento depende de la naturaleza de las sustancias a remover, siendo un pH cercano a 7 el valor óptimo. No obstante, con pH neutro el consumo de energía puede incrementarse debido a la disminución de la conductividad cuando no hay presencia de electrolitos en la solución; pero cuando se presentan altas concentraciones de electrolitos y la conductividad de la solución es alta, el efecto del pH sobre el consumo eléctrico no es significativo. Es común que después de la electrocoagulación el pH tienda a incrementarse para aguas residuales ácidas y a decrecer para aguas alcalinas (Chen, 2004).

El pH en la remoción de nitratos ha sido estudiado por diferentes investigadores. Lakshmi, Sozhan y Vasudevan (2013) realizaron estudios en aguas sintéticas empleando KNO_3 como fuente

de nitratos a una concentración inicial de 500 mg/l. Aquí se evaluaron valores iniciales de pH entre 3 y 10 con electrodos de aluminio, encontrando una eficiencia de remoción del 95.9 % a pH 7. En el caso de pH ácidos y alcalinos se presentó una reducción de la remoción; la menor eficiencia de remoción fue del 86.3 % a un pH de 10. Los autores concluyeron que con pH alcalino la superficie del metal genera una capa de óxido con una carga neta negativa que tiende a repeler el nitrato en la solución (Lakshmi et ál., 2013; Vasudevan et ál., 2010). Por su parte, Malakootian et ál. (2011) evaluaron pH iniciales de 5, 7 y 9 con electrodos de aluminio y soluciones sintéticas de KNO_3 como fuente de nitratos a una concentración inicial de 150 mg/l. A diferencia del estudio realizado por Lakshmi et ál. (2013), en este trabajo se adicionó cloruro de sodio con el fin de aumentar la conductividad eléctrica; los resultados permitiendo concluir que la remoción de nitratos se incrementa con el aumento del pH, debido a que la reacción entre los iones del metal y de hidróxido del aluminio es más favorable en condiciones alcalinas (Malakootian et ál., 2011). Aunque los dos estudios parecen contradictorios, se evidencia que en el segundo caso el uso de cloruro de sodio para aumentar la conductividad pudo causar un efecto de corrosión por picadura sobre la capa de óxido de aluminio, lo que redujo los efectos de la pasivación alcalina del aluminio e incrementó las reacciones no electrolíticas sobre el ánodo (tal y como se describe en el estudio de Wellner, Couperthwaite y Millar [2018] sobre la influencia de los parámetros operativos durante la electrocoagulación de cloruro en presencia de cloruro de sodio empleando electrodos de aluminio).

Ghanbari et ál. (2014) utilizaron, en forma simultánea, ánodos de hierro y aluminio para evaluar el efecto del pH sobre la remoción de nitratos en aguas subterráneas. La máxima remoción se dio a pH 5, con una intensidad de corriente de 300 mA y la adición de 100 mg/l de NaCl durante un tiempo de 40 minutos de electrólisis; la mínima remoción ocurrió a un pH de 3, con una concentración inicial de nitratos de 100 mg/l e intensidad de corriente de 200 mA. Esta investigación encontró también que la presencia de turbidez en la muestra genera un efecto inhibitorio sobre la remoción de nitratos, cambiando el orden de la reacción de 1 a 0. Otros autores han reportado que no existe diferencia significativa en la remoción de nitratos empleando aguas sintéticas a rangos de pH entre 3 y 11, con los que logró remociones cercanas al 96 % para todos los pH evaluados (Majlesi et ál., 2016); sin embargo, este trabajo se llevó a cabo bajo la máxima densidad de corriente del estudio (3.2 mA/cm^2 , y 50 V) y con la presencia cloruro de sodio, lo que redujo la pasivación de los electrodos; esto puede indicar que el experimento realizado no mostró diferencias significativas debido a que el reactor se encontraba en sus máximos operativos; el mismo estudio muestra que con una reducción de la densidad de corriente de 1.6 mA/cm^2 se reduce la remoción a valores cercanos al 85 %.

Para el caso de electrodos de hierro, se ha reportado que a pH más altos la eficiencia de la disolución disminuye por debajo de lo predicho por la ley de Faraday, debido a la aparición de reacciones secundarias que ocurren cerca al ánodo, incluida la generación del oxígeno (ver reacción 2), que desplaza su equilibrio por el consumo de iones H^+ en el seno de la solución. Adicionalmente, la oxidación del hierro conduce a la formación del Fe^{3+} (reacción 7), lo que consume 3 electrones en lugar de los 2 necesarios para la formación del Fe^{2+} (reacción 6), requiriendo valores de intensidad de corriente mayores para lograr la misma concentración de hierro en la solución (Hakizimana et ál., 2017). El rango óptimo para la operación de los electrodos de hierro es de 5 a 9, con un pH inicial favorable entre 8 y 9, lo que garantiza que los iones ferrosos, altamente solubles, se oxiden con mayor facilidad, dando como resultado especies insolubles con alto poder de remoción de nitratos (Moussa et ál., 2017).

En general se presenta en la revisión que el pH es una variable que influencia el proceso de electrocoagulación debido a la variación de las especies formadas; sin embargo, su influencia no es

tan relevante como la presentada por otras variables como el tipo de electrodos y la intensidad de corriente (Hakizimana et ál., 2017).

Densidad de corriente

La densidad de corriente es una de las variables que determinan la cantidad de metal (Mn^+) que se libera en el sistema. En general, un incremento de la densidad de corriente genera un aumento en la remoción de contaminante debido a una mayor dosis de coagulante liberada desde el ánodo (Hakizimana et ál., 2017). Cuando se dosifica la misma cantidad de iones metálicos no se presentan diferencias significativas al variar en forma moderada la densidad de corriente (Lacasa et ál., 2011); sin embargo, una densidad de corriente demasiado alta produce la disminución en la eficiencia del proceso debido a diferentes efectos, como la extensión de la reacción paralela de hidrólisis con producción de oxígeno, por la generación de calor debida al efecto Joule y la intensificación la polarización y pasivación de los electrodos (Martínez, 2007).

Por tanto, se recomienda el empleo de densidades de corriente inferiores a $20-25 \text{ A m}^{-2}$ para el buen funcionamiento del proceso (Chen, 2004). Por su parte, altos valores de densidad de corriente causan la generación de burbujas que afectan la agitación de la solución y la transferencia de masa en la superficie de los electrodos y promueven fenómenos de flotación (Kobyta et ál., 2011), lo que puede ser positivo en cuanto estos permiten la remoción de algunos contaminantes. La velocidad de formación de las burbujas de gases afecta la hidrodinámica de la celda, afectando la transferencia de masa entre el gas, los contaminantes y las sustancias coagulantes, e influenciando el proceso de floculación (Hakizimana et ál., 2017).

La densidad de corriente y la corriente aplicada ha sido muy estudiada en la remoción de nitratos. El estudio realizado por Ghanim y Ajjam (2013) analizó el efecto de diferentes densidades de corriente en un rango de 2 a 10 mA cm^{-2} con electrodos de hierro; el estudio verificó que con el aumento de este factor se incrementa la remoción del nitrato. Este mismo comportamiento fue reportado por otros autores que evaluaron intensidades más altas de 1.5, 3.5 y 4.5 A con electrodos de aluminio, concluyendo que a medida que la corriente aumenta la concentración de nitrato disminuye rápidamente (Yehya et ál., 2014); así que el aumento de la corriente causa el incremento de la velocidad de reacción.

Tiempo de reacción

El tiempo es una variable significativa debido a que un aumento en el tiempo aumenta la eficiencia de eliminación, ya que, como se explica en la ley de Faraday, existe una relación directa entre el tiempo de electrólisis y la cantidad de coagulantes producidos (Hashim et ál., 2017) y, por lo tanto, la remoción de nitratos también aumentará. Además, un tiempo más prolongado del proceso proporciona un mayor tiempo de contacto entre los contaminantes y los coagulantes, lo que a su vez aumenta la eficiencia de eliminación (Lu, Li, Yin, Ma, y Lin, 2015). Pero también hay que aclarar que un aumento progresivo del tiempo provocaría una disminución de la eficiencia de eliminación si la remoción del contaminante en el tiempo ya no es significativa, debido al consumo de energía y el consumo de electrodos que este generaría (An, Huang, Yao, y Zhao, 2017).

Se ha encontrado que la remoción de nitratos por electrocoagulación tiene una cinética de primer orden, que guarda una relación lineal con la intensidad de la corriente eléctrica, lo que demuestra que la cinética sigue una ley exponencial con el tiempo (Dehghani et ál., 2016; Emamjomeh y Sivakumar, 2009; Shafaei, Pajootan, Nikazar y Arami, 2011).

Concentración inicial de nitratos

La concentración de nitratos a remover es un factor relevante debido a que afecta la eliminación del contaminante de manera inversa, es decir, a una mayor concentración inicial de nitratos, menor es la velocidad de sedimentación y, por lo tanto, menor es la remoción; asimismo, se evidencia que se requiere mayor tiempo para lograr la cantidad deseada de nitrato removida (Hashimet ál., 2017; Malakootian et ál., 2011). Sin embargo, este factor es inverso al consumo de energía, ya que a menor concentración de nitratos, mayor es el consumo energético por unidad molar de nitrato removido (Koparal y Ögütveren, 2002).

La disminución de la eficiencia de remoción del contaminante se debe a la falta de flóculos de óxido formados en la solución, ya que al tener una mayor concentración de nitratos es necesaria la formación de más óxidos que generen la eliminación del contaminante (Tabash, 2013); es decir, desde otra perspectiva, el coagulante *in situ* generado se encarga de adsorber mayor proporción de nitratos en las etapas iniciales, pero pierde la capacidad de adsorción con el tiempo (Lakshmi et ál., 2013). Por otra parte, la pérdida de eficiencia se podría explicar debido al aumento de la viscosidad de la mezcla de reacción, que disminuye la difusión de los productos y la conductividad eléctrica, dificultando la movilidad de las especies iónicas (Talhi, Monette, y Azzouz, 2011).

Voltaje

El voltaje es una variable significativa, ya que el efecto del potencial eléctrico es proporcional a la eficacia de la remoción de nitratos, es decir, a mayor diferencia de potencial, mayor es la eliminación del nitrato (Dehghani et ál., 2016).

Esto se explica debido a un aumento en la producción de flóculos, ya que a una mayor tensión eléctrica aumenta la cantidad de metal oxidado y, por lo tanto, de los flóculos de hidróxido, es decir, hay una mayor formación del coagulante *in situ* que permite una mayor adsorción del contaminante y asimismo aumenta la eficiencia de la remoción (Tabash, 2013; Malakootian et ál., 2011). Por otro lado, es importante tener en cuenta que un mayor potencial aplicado es sinónimo de incrementos en el consumo de energía, pero a su vez se requiere un menor tiempo de electrolisis (Koparal y Ögütveren, 2002). Estudios realizados en agua potable mostraron que en reactores de flujo continuo el estado estacionario se logra más rápido a mayores valores de voltaje; la eficiencia de remoción también se incrementó al aumentar el voltaje, así: una eficiencia de remoción del 75 % a 20 V se incrementó al 84 % aumentando el voltaje a 25 V (Kumar y Goel, 2010).

Diseño o configuración de la celda

Durante el diseño de la celda de electrocoagulación es importante tener en cuenta una serie de parámetros o componentes para lograr una alta eficiencia en la remoción del contaminante (Arango y Garcés, 2007). La geometría de celda más común en las publicaciones sigue siendo la de reactor abierto con placa vertical seguido por un decantador; este diseño facilita el mantenimiento de la celda, los ánodos y cátodos, que suelen estar igualmente espaciados en paralelo. Las operaciones de mezclado son la principal dificultad para esta configuración de celda (Hakizimana et ál., 2017).

A continuación, se presentan los principales aspectos del diseño y configuración de la celda que influyen en la remoción de nitratos por electrocoagulación.

Electrodos

Los electrodos se encargan de proveer iones, que desencadenan el proceso de eliminación del contaminante, ya sea por electrorreducción o coagulación química, por tal razón el material de

los electrodos juega un papel muy importante en la eficiencia del proceso de electrocoagulación (Arboleda y Herrera, 2015). En el caso de la desnitrificación, el material de los electrodos debe proporcionar la formación de hidróxidos que remuevan el contaminante por medio de coagulación (Hashim et ál., 2017); pero a su vez el cátodo influye en la tasa de reducción de nitratos que busca mitigar la posible formación de amoníaco (Govindan et ál., 2015; Hui, 2013a).

Algunos de los materiales empleados como electrodos en esta técnica son Ag, Al, Ca, Cd, Cs, Fe, Mg, Si y Zn (Pearse, 2003); para la remoción de nitratos, los electrodos más usados son el aluminio como ánodo y el hierro como cátodo, debido a la alta eficiencia, bajo costo y fácil acceso (Chen, 2004; Govindan et ál., 2015; Piña-Soberanis et ál., 2011); además, los iones multivalentes tienen propiedades coagulantes superiores (Malakootian et ál., 2011).

Aunque el hierro como ánodo de sacrificio obtenía altas remociones, su uso se limita por el aumento de coloración que se da al transcurrir el proceso (Hui, 2013). Adicionalmente, se encontró que, bajo las mismas condiciones experimentales, la remoción de nitratos de aguas subterráneas es más eficiente con el uso del aluminio como ánodo y del hierro como cátodo, frente al uso del hierro como ánodo y cátodo; esto se debe a que los flóculos generados por el aluminio tienen mayor capacidad de coagulación. La adsorción del ion nitrato sobre la superficie del hidróxido metálico en crecimiento parece ser el mecanismo principal tras los altos niveles de remoción. Para todos los casos se observó la generación de alrededor del 20 % de amoníaco (Govindan et ál., 2015). Igualmente, el área efectiva es una variable significativa, debido a que en esta se desarrollan las reacciones de óxido-reducción, de tal manera que al tener una mayor área efectiva se incrementa la eficiencia de remoción del contaminante (Tabash, 2013).

El estudio de Majlesi y su equipo (2016) analizó el efecto que tienen los electrodos de hierro y aluminio sobre la remoción de nitratos, empleando agua sintética fabricada con KNO_3 a una concentración inicial de 100 mg L^{-1} de nitratos. Los resultados obtenidos fueron del 87, 89, 92 y 98 % para combinaciones ánodo-cátodo Fe-Fe, Fe-Al, Al-Fe y Al-Al, respectivamente; de tal manera que el uso del aluminio como ánodo y cátodo presentó la mayor eficiencia de eliminación (resultados similares fueron obtenidos por Shivayogimath y Watawati [2013] en aguas provenientes de lixiviados). Sin embargo, este efecto parece depender a la eficiencia en el uso de electrones, ya que para la misma cantidad de dosis de reactivo (en unidades molares) se obtiene la misma remoción de nitratos (Lacasa et ál., 2011).

En la tabla 2 se presenta un resumen de publicaciones en las que se realiza la remoción de nitratos en diversos tipos de aguas, haciendo énfasis en los electrodos utilizados, las principales condiciones de operación y la eficiencia de remoción obtenida.

Tabla 2. Resumen de electrocoagulación para la remoción de nitratos con diferentes tipos de electrodos

Ánodo-cátodo	Tipo de agua a tratar	Concentración inicial de nitratos (mg/l)	Tiempo (min)	Corriente	Voltaje (V)	pH	Eficiencia de remoción (%)	Referencia
Al-Fe		100	75	-	30	3	27	
Al-Fe	Agua patrón	100	75	-	30	7	78	(Dehghani et ál., 2016)
Al-Fe		100	75	-	30	11	86	
Al-Fe		100	60	2.5 A	25	9	95	(Emamjomeh y Sivakumar, 2009)
Al-Fe	Agua patrón	200	90	2.5 A	25	9	89	
Al-Fe		300	90	2.5 A	25	9	84	
Acero al carbón	Agua patrón	150	75	10 mA	-	8	92.25	(Ghanim y Ajjam, 2013)
Fe-Fe	Agua patrón	150	70	11 mA	-	8	88	
Al-Fe		100	180	25 mA/cm ²	-	-	92	
Fe-Fe	Agua patrón	100	180	25 mA/cm ²	-	-	80	(Govindan, Noel, y Mohan, 2015)
Fe-Gr		100	180	25 mA/cm ²	-	-	58	
Al-Gr		100	180	25 mA/cm ²	-	-	87	
Grafito-tela de carbón	Agua patrón	100	30	-	2.9	7	90	(Koparal y Ögütveren, 2002)
Grafito-tela de carbón		300	60	-	2.9	7	83	
Acero dulce-hierro		300	420	-	10	6	50	
Acero dulce-hierro	Agua destilada y agua de grifo	300	420	-	15	6	60	
Acero dulce-hierro		300	420	-	20	6	74	(Kumar y Goel, 2010)
Acero dulce-hierro		300	420	-	25	6	84	
Al-Al		500	-	0.10 A/dm ²	-	7	93.02	
Al-Al		500	-	0.15 A/dm ²	-	7	94.6	
Al-Al	Agua patrón	500	-	0.25 A/dm ²	-	7	95.9	(Lakshmi, Sozhan, y Vasudevan, 2013)
Al-Al		500	-	0.50 A/dm ²	-	7	96.2	
Al-Al		500	-	0.75 A/dm ²	-	7	96.8	
Fe-Al	Agua de río	1.7	60	13 A	-	-	53	(Guanoluiza, 2013)
Fe- carbón de carbono	Aguas subterráneas	90	240	0.2 A	[2-5]	7	90.4	(Madariaga, Lavorante y Fasoli, 2011)

Ánodo-cátodo	Tipo de agua a tratar	Concentración inicial de nitratos (mg/l)	Tiempo (min)	Corriente	Voltaje (V)	pH	Eficiencia de remoción (%)	Referencia
Fe-Fe	Agua residual urbana	100	60	-	40	7.43	89.7	
Al-Al	Agua patrón	150	60	-	20	5	72	(Malakootian et ál., 2011)
Al-Al		150	60	-	20	7	78	
Mg-Mg		500	-	1 mA/cm ²	-	7	83.33	
Mg-Mg		500	-	1.5 mA/cm ²	-	7	90.27	
Mg-Mg	Agua patrón	500	-	32.5 mA/cm ²	-	7	92.9	(Vasudevan et ál., 2010)
Mg-Mg		500	-	5 mA/cm ²	-	7	93.43	
Mg-Mg		500	-	7.5 mA/cm ²	-	7	93.87	
Al-Al		100	40	3.57 mA/cm ²	-	5	62.8	
Al-Fe	Agua patrón	100	40	3.57 mA/cm ²	-	5	81.5	(Ghanbari et ál., 2014)
Fe-Fe		100	40	3.57 mA/cm ²	-	5	71.2	

Distancia entre los electrodos

La distancia entre los electrodos es un parámetro que influye en la eficiencia del proceso de electrocoagulación, debido a la relación con el aumento de la resistencia eléctrica del flujo de corriente entre el ánodo y el cátodo, que es proporcional al consumo de energía (Hashim et ál., 2017); por tanto, el aumento de la distancia entre los electrodos aumenta la resistencia, aumentando a su vez el potencial entre los electrodos y, por lo tanto, reduciendo la eficiencia en la remoción de nitratos. Este aumento del espacio entre los electrodos es inversamente proporcional a la velocidad de remoción (Hashim et ál., 2017; Xu et ál., 2018).

Igualmente, si la distancia entre los electrodos disminuye, la transferencia de masa es mayor debido a la hidrodinámica turbulenta, por consiguiente, aumenta la velocidad de reacción y la eficiencia del proceso (Hakizimana et ál., 2017).

CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS DEL USO DE LA TECNOLOGÍA

La presencia de nitratos en las aguas superficiales y subterráneas es objeto de preocupación debido a sus efectos adversos sobre la salud humana y del ambiente. Algunas tecnologías para la remoción de estos compuestos, como la ósmosis inversa y el intercambio iónico, presentan dificultades debido a la generación de salmueras, que deben ser tratadas y dispuestas a altos costos. El tratamiento biológico es en la actualidad el método más efectivo para su remoción; sin embargo, presenta dificultades con aguas residuales con altos contenidos en cloro, metales pesados o deficiencias en contenidos de nutrientes.

La electrocoagulación ha sido objeto de mayores estudios en las últimas décadas gracias a algunas ventajas que este método presenta, como su fácil operación, bajas necesidades de mantenimiento y el no uso de insumos químicos. Esta tecnología facilita el tratamiento de aguas y su reutilización, aunque no es una tecnología nueva. Se han desarrollado usos emergentes para la remoción específica de múltiples contaminantes, entre ellos los nitratos, presentándose investigaciones sobre aguas sintéticas, residuales y naturales. Los mecanismos del proceso de electrocoagulación involucran reacciones electroquímicas y químicas en las superficies de los electrodos, como también reacciones redox y equilibrios ácido-base en el seno de la solución. El principal mecanismo en la depuración de nitratos consiste en el barrido realizado por los flocúlos de hidróxidos metálicos a medida que sedimentan en un proceso denominado barrido.

De las variables operativas del proceso, la densidad de corriente es la de mayor importancia, ya que determina la velocidad de dosificación del coagulante. Las altas densidades de corriente suelen no ser recomendables debido a la extensión de reacciones secundarias, como la generación de oxígeno y el aumento de la temperatura por el efecto Joule, procesos que consumen energía eléctrica y reducen la eficiencia del proceso. Los electrodos más usados son los de hierro y aluminio debido a su bajo costo y altas eficiencias de remoción.

Debido a que durante el proceso persiste la formación de amoníaco, se requiere de sistemas extracción y depuración del aire para su implementación a gran escala (Emamjomeh y Sivakumar, 2009; Govindan et ál., 2015; Hui, 2013b). La investigación de técnicas combinadas que permitan la remoción de múltiples contaminantes es uno de los objetos de estudio con mayores perspectivas. La optimización del proceso de electrocoagulación y electrooxido-reducción ha logrado reducir los contaminantes en aguas residuales de la industria láctea y frigoríficos, bajando a la mitad los costos de su tratamiento frente al uso no combinado de las tecnologías (Ghazouani, Akrouit, Jellali, y Bousselmi, 2019).

La electrocoagulación es una técnica con el potencial de eliminar muchos de los contaminantes del agua en forma simultánea. El diseño de las celdas tiene una importante complejidad y, junto

a los sistemas de agitación, puede ser determinante para el desempeño y eficiencia del proceso. Aunque en la última década las publicaciones en torno a su uso en agua potable han venido en aumento, también han aparecido nuevas aplicaciones, como la recolección de microalgas (Hashim et ál., 2017), tema que ha tomado mucha importancia debido a que es una fuente ecológica de biodiesel (Sandoval y Rubio, 2016)

La principal debilidad de esta tecnología es el desconocimiento sobre los fenómenos que gobiernan los procesos y sus diferentes interacciones, por lo que no existe una metodología que permita predecir la remoción de la contaminación o realizar optimizaciones basadas en la fenomenología del proceso, lo que ha hecho que todavía no sea una tecnología plenamente establecida para el tratamiento de aguas. Al respecto, se requieren importantes avances en torno a: comprensión teórica sobre los mecanismos que gobiernan la reducción de los contaminantes, nuevos enfoques de modelamiento de reactores, simulaciones computacionales de dinámica de fluidos, fenómenos de transporte y optimización técnico-económica (Hakizimana et ál., 2017). Lo que se necesita es desarrollos teóricos y datos experimentales para lograr generar herramientas conceptuales que permitan avanzar en el conocimiento de la fenomenología del proceso, similares a las desarrolladas para procesos de electrodiálisis (Morales, Calvache, Cifuentes y Murcia, 2017).

Si bien existen algunas modelaciones con dinámicas de fluidos computacionales, estas se han realizado para una única fase debido a los altos costos computacionales. Se espera que con el avance de los sistemas de cómputo se puedan trabajar modelos de dos o tres fases. Igualmente, es necesario el estudio de la coagulación y el crecimiento de los flocúlos empleando modelos de balance de población que ya han sido usados en el estudio de biorreactores (Bartolini et ál., 2015) y precipitación química (Szilágyi, Şerban Agachi, Barabás y Lakatos, 2014), lo que requerirá de modelos capaces de explicar los procesos de flotación y sedimentación con la aplicación de campos eléctricos y de información experimental más detallada (Hakizimana et ál., 2017)

El desarrollo de nuevos electrodos, diseño óptimo de reactores y el análisis de costos son factores clave para garantizar el éxito futuro de esta tecnología (Xu et ál., 2018), junto con estudios de los aspectos técnicos y económicos (Arango y Garcés, 2007).

La combinación de técnicas en procesos de depuración de aguas es una alternativa prometedora que requiere de mayor estudio. Barbosa y otros investigadores (2018) utilizaron extractos de *Moringa oleifera*, un coagulante natural ampliamente estudiado, en combinación con procesos de electrocoagulación en aguas residuales de una industria de pinturas de base acuosa, obteniendo agua apta para su reutilización en el proceso.

El estudio de los lodos secos, junto a la caracterización de las especies en solución, puede ser una fuente valiosa de información sobre los mecanismos que ocurren durante el proceso de electrocoagulación. La mayoría de los estudios no incluyen información sobre los mecanismos de remoción (Hakizimana et ál., 2017), por lo que se necesita incluirlos en próximas investigaciones.

REFERENCIAS

- An, C., Huang, G., Yao, Y., y Zhao, S. (2017). Emerging usage of electrocoagulation technology for oil removal from wastewater: a review. *Science of the Total Environment*, 579, 537-556 doi://doi-org.hemeroteca.lasalle.edu.co/10.1016/j.scitotenv.2016.11.062
- Arango, Á. (2014). Tratamiento de aguas residuales mediante electrocoagulación: desarrollo y potencial de aplicación. *Journal of Engineering and Technology*, 3(1).
- Arango, Á, y Garcés, L. (2007). Diseño de una celda de electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales de la industria láctea. *Revista Universidad Eafit*, 43(147), 56-67.

- Arango, Á. (2012). Efectos del pH y la conductividad en la electrocoagulación de aguas residuales de la industria láctea. *Producción + Limpia*, 7(1), 59-67. Recuperado de <http://dialnet.unirioja.es/servlet/oaiart?codigo=4331975>
- Arboleda, J., y Herrera, P. (2015). *Evaluación de un proceso de electrocoagulación en un reactor tipo batch para la remoción de cromo hexavalente (Cr6+) con electrodos de aluminio-aluminio y de hierro-aluminio en condiciones de laboratorio* (trabajo de grado). Facultad de Ingeniería Ambiental, Universidad Santo Tomás, Bogotá, Colombia.
- Archana, Sharma, S., y Chander, R. (2012). Nitrate removal from ground water: A review. *E-Journal of Chemistry*, 9(4), 1667-1675.
- Balasubramanian, N., Kojima, T., y Srinivasakannan, C. (2009). Arsenic removal through electrocoagulation: Kinetic and statistical modeling. *Chemical Engineering Journal*, 155(1-2), 76-82. doi://doi-org.bdigital.sena.edu.co/10.1016/j.cej.2009.06.038
- Barbosa, A., da Silva, L., de Paula, H., Romualdo, L., Sadoyama, G., y Andrade, L. (2018). Combined use of coagulation (*M. oleifera*) and electrochemical techniques in the treatment of industrial paint wastewater for reuse and/or disposal. *Water research*, 145, 153-161. doi://doi-org.bdigital.sena.edu.co/10.1016/j.watres.2018.08.022
- Barrera-Díaz, C., Balderas-Hernández, P., y Bilyeu, B. (2018). Chapter 3. Electrocoagulation: fundamentals and prospectives. En C. Martínez-Huitile, M. Rodrigo y O. Scialdone (Eds.), *Electrochemical Water and Wastewater Treatment* (pp. 61-77). EE. UU.: Elsevier-Butterworth-Heinemann. doi://doi.org/10.1016/B978-0-12-813160-2.00003-1
- Bartolini, E., Manoli, H., Costamagna, E., Jeyaseelan, H., Hamad, M., Irhimeh, M., Khademhosseini, A., y Abbas, A. (2015). Population balance modelling of stem cell culture in 3D suspension bioreactors. *Chemical Engineering Research and Design*, 101, 125-134. doi://doi-org.bdigital.sena.edu.co/10.1016/j.cherd.2015.07.014
- Bayramoglu, M., Kobya, M., Can, O., y Sozbir, M. (2004). Operating cost analysis of electrocoagulation of textile dye wastewater. *Separation and Purification Technology*, 37(2), 117-125. doi://doi.org/10.1016/j.seppur.2003.09.002
- Bohdziewicz, J., Bodzek, M., y Wsik, E. (1999). The application of reverse osmosis and nanofiltration to the removal of nitrates from groundwater. *Desalination*, 121(2), 139-147. doi://doi.org/10.1016/S0011-9164(99)00015-6
- Chen, G. (2004). Electrochemical technologies in wastewater treatment. *Separation and Purification Technology*, 38(1), 11-41. doi:10.1016/j.seppur.2003.10.006
- Dehghani, M., Hoseini, M., Fathi Fath-Aabaadi, M., Elhamiyan, Z., Shamsedini, N., Ghanbarian, M., Shahsavani, S., Nourozi, A. (2016). Optimizing electrocoagulation process for the removal of nitrate from aqueous solution. *Jundishapur Journal of Health Sciences*, 8(1). doi: 10.17795/jjhs-31095
- Demirbas, E., y Kobya, M. (2017). Operating cost and treatment of metalworking fluid wastewater by chemical coagulation and electrocoagulation processes. *Process Safety and Environmental Protection*, 105, 79-90. doi://doi-org.bdigital.sena.edu.co/10.1016/j.psep.2016.10.013
- Emamjomeh, M., y Sivakumar, M. (2009). Denitrification using a monopolar electrocoagulation/flotation (ECF) process. *Journal of Environmental Management*, 91(2), 516-522. doi://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.09.020

- Essadki, A., y Shao, Y. (2012). Electrochemical probe for frictional force and bubble measurements in gas-liquid-solid contactors and innovative electrochemical reactors for electrocoagulation/electroflotation. En Y. Shao (Ed.), *Electrochemical Cells—New Advances in Fundamental Researches and Applications* (pp. 46-70). Rijeka, Croacia: IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/34350>
- FAO. (2009). *Como alimentar al mundo en 2050*. Recuperado de <https://search.proquest.com/doc-view/371350150>
- FAO. (2013). *Afrontar la escasez de agua. Un marco de acción para la agricultura y la seguridad alimentaria*. Recuperado de: [https://ebookcentral.proquest.com/lib/\[SITE_ID\]/detail.action?docID=3239163](https://ebookcentral.proquest.com/lib/[SITE_ID]/detail.action?docID=3239163)
- FAO. (2017). *Escasez de agua: uno de los grandes retos de nuestro tiempo*. Recuperado de <http://www.fao.org/zhc/detail-events/es/c/880888/>
- García-Segura, S., Eiband, Maria Maesia S., de Melo, J., y Martínez-Huitle, C. (2017). Electrocoagulation and advanced electrocoagulation processes: A general review about the fundamentals, emerging applications and its association with other technologies. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 801, 267-299. doi://doi-org.bdigital.sena.edu.co/10.1016/j.jelechem.2017.07.047
- Garzón, J., Rodríguez-Miranda, J., y Hernández-Gómez, C. (2017). Aporte de la biorremediación para solucionar problemas de contaminación y su relación con el desarrollo sostenible. *Universidad y Salud*, 19(2), 309-318. doi:10.22267/rus.171902.93
- Ghanbari, F., Moradi, M., Mohseni-Bandpei, A., Gohari, F., Mirtaleb Abkenar, T., y Aghayani, E. (2014). Simultaneous application of iron and aluminum anodes for nitrate removal: A comprehensive parametric study. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 11(6), 1653-1660. doi:10.1007/s13762-014-0587-y
- Ghanim, A., y Ajjam, S. (2013). Kinetic modelling of nitrate removal from aqueous solution during electrocoagulation. *Civil and Environmental Research*, 3(7), 64-73.
- Ghazouani, M., Akrou, H., Jellali, S., y Bousselmi, L. (2019). Comparative study of electrochemical hybrid systems for the treatment of real wastewaters from agri-food activities. *Science of the Total Environment*, 647, 1651-1664. doi://doi-org.bdigital.sena.edu.co/10.1016/j.scitotenv.2018.08.023
- Gilpavas, E. (2008). *Aplicación de la electroquímica en el tratamiento de aguas residuales* (serie Cuadernos de Investigación). Medellín, Colombia: Escuela de Ingeniería, Universidad EAFIT.
- Govindan, K., Noel, M., y Mohan, R. (2015). Removal of nitrate ion from water by electrochemical approaches. *Journal of Water Process Engineering*, 6, 58-63. doi://doi.org/10.1016/j.jwpe.2015.02.008
- Hakizimana, J., Gourich, B., Chafi, M., Stiriba, Y., Vial, C., Drogui, P., y Naja, J. (2017). Electrocoagulation process in water treatment: a review of electrocoagulation modeling approaches. *Desalination*, 404, 1-21. doi://doi.org/10.1016/j.desal.2016.10.011
- Harif, T., Khai, M., y Adin, A. (2012). Electrocoagulation versus chemical coagulation: Coagulation/flocculation mechanisms and resulting floc characteristics. *Water Research*, 46(10), 3177-3188. doi://doi-org.bdigital.sena.edu.co/10.1016/j.watres.2012.03.034

- Hashim, K., Shaw, A., Al Khaddar, R., Pedrola, M., y Phipps, D. (2017). Energy efficient electrocoagulation using a new flow column reactor to remove nitrate from drinking water—experimental, statistical, and economic approach. *Journal of Environmental Management*, 196, 224-233. doi:10.1016/j.jenvman.2017.03.017
- Henry, J. (1999). Principios para el tratamiento de aguas residuales. En J. Henry y G. Heike (Ed.), *Ingeniería ambiental* (pp. 440-450). México: Pearson Educación.
- Hui, C. (2013). *The removal methods of phosphorus/phosphate and nitrogen/nitrate from water and wastewater* (tesis de grado). School of Arts and Science, Tunku Abdul Rahman College, Kuala Lumpur, Malasia.
- Jiménez, C., Sáez, C., Martínez, F., Cañizares, P., y Rodrigo, M. (2012). Electrochemical dosing of iron and aluminum in continuous processes: a key step to explain electro-coagulation processes. *Separation and Purification Technology*, 98, 102-108. doi://doi-org.bdigital.sena.edu.co/10.1016/j.seppur.2012.07.005
- Keith, S., MacFarlane, G., y Herbert, R. (1982). Dissimilatory nitrate reduction by a strain of clostridium butyricum isolated from estuarine sediments. *Archives of Microbiology*, 132(1), 62-66.
- Khatri, N., y Tyagi, S. (2015). Influences of natural and anthropogenic factors on surface and groundwater quality in rural and urban areas. *Frontiers in Life Science*, 8(1), 23-39. doi:10.1080/21553769.2014.933716
- Kobya, M., Demirbas, E., Bayramoglu, M., y Sensoy, M. (2011). Optimization of electrocoagulation process for the treatment of metal cutting wastewaters with response surface methodology. *Water, Air, y Soil Pollution*, 215(1), 399-410. doi:10.1007/s11270-010-0486-x
- Koparal, A., y Ögütveren, Ü. (2002). Removal of nitrate from water by electroreduction and electrocoagulation. *Journal of Hazardous Materials*, 89(1), 83-94. doi://doi.org/10.1016/S0304-3894(01)00301-6
- Kumar, N., y Goel, S. (2010). Factors influencing arsenic and nitrate removal from drinking water in a continuous flow electrocoagulation (EC) process. *Journal of Hazardous Materials*, 173(1-3), 528-533. doi://doi-org.bdigital.sena.edu.co/10.1016/j.jhazmat.2009.08.117
- Lacasa, E., Cañizares, P., Sáez, C., Fernández, F., y Rodrigo, M. (2011). Removal of nitrates from groundwater by electrocoagulation. *Chemical Engineering Journal*, 171(3), 1012-1017. doi://doi-org.bdigital.sena.edu.co/10.1016/j.cej.2011.04.053
- Lakshmi, J., Sozhan, G., y Vasudevan, S. (2013). Recovery of hydrogen and removal of nitrate from water by electrocoagulation process. *Environmental Science and Pollution Research*, 20, 2184-2192.
- Lee, S., y Gagnon, G. (2014). Review of the factors relevant to the design and operation of an electrocoagulation system for wastewater treatment. *Environmental Reviews*, 22(4), 421-429. doi:10.1139/er-2014-0009
- Li, L., Dong, Y., Qian, G., Hu, X., y Ye, L. (2018). Performance and microbial community analysis of bio-electrocoagulation on simultaneous nitrification and denitrification in submerged membrane bioreactor at limited dissolved oxygen. *Bioresource Technology*, 258, 168-176. doi://doi-org.bdigital.sena.edu.co/10.1016/j.biortech.2018.02.121

- Li, M., Feng, C., Zhang, Z., y Sugiura, N. (2009). Efficient electrochemical reduction of nitrate to nitrogen using ti/IrO₂-Pt anode and different cathodes. *Electrochimica Acta*, 54(20), 4600-4606. doi://doi-org.bdigital.sena.edu.co/10.1016/j.electacta.2009.03.064
- Guanoluiza, E. (2013). *Dimensionamiento de un sistema de electrocoagulación aplicado al tratamiento de aguas residuales domésticas, con y sin irradiación de electrones acelerados* (tesis de grado). Facultad de Ingeniería Química y Agroindustrial, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
- Lu, J., Li, Y., Yin, M., Ma, X., y Lin, S. (2015). Removing heavy metal ions with continuous aluminum electrocoagulation: A study on back mixing and utilization rate of electro-generated al ions. *Chemical Engineering Journal*, 267, 86-92. doi://doi.org/10.1016/j.cej.2015.01.011
- Madariaga, L., Lavorante, M., y Fasoli, H. (2011). Eliminación de nitrato en agua de consumo. *Revista Científica de Educación*, 6(23), 41-49.
- Majlesi, M., Mohseny, S., Sardar, M., Golmohammadi, S., y Sheikhmohammadi, A. (2016). Improvement of aqueous nitrate removal by using continuous electrocoagulation/electroflo-tation unit with vertical monopolar electrodes. *Sustainable Environment Research*, 26(6), 287-290. doi://doi-org.bdigital.sena.edu.co/10.1016/j.serj.2016.09.002
- Malakootian, M., Yousefi, N., y Fatehizadeh, A. (2011). Survey efficiency of electrocoagulation on nitrate removal from aqueous solution. *International Journal of Environment Science and Technology*, 8(1), 107-114. doi:10.1007/BF03326200
- Mameri, N., Yeddou, A. R., Lounici, H., Belhocine, D., Grib, H., y Bariou, B. (1998). Defluoridation of septentrional sahara water of north africa by electrocoagulation process using bipolar aluminium electrodes. *Water Research*, 32(5), 1604-1612. doi://doi-org.bdigital.sena.edu.co/10.1016/S0043-1354(97)00357-6
- Martínez, F. (2007). *Tratamiento de aguas residuales industriales mediante electrocoagulación y coagulación convencional*. España: Ediciones de la Universidad de Castilla-La Mancha.
- Mollah, M., Morkovsky, P., Gomes, J., Kesmez, M., Parga, J., y Cocke, D. (2004). Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation. *Journal of Hazardous Materials*, 114(1), 199-210. doi:10.1016/j.jhazmat.2004.08.009
- Mora-Molina, M., Járay, P., Vatai, G., y Bekassy-Molnar, E. (2004). Eliminación de sal y metanol del agua residual industrial por ósmosis inversa. *Tecnología en Marcha*, 17(1), 84.
- Morales, Y., Calvache, J., Cifuentes Aguilera, J., y Murcia Berdugo, N. (2017). Algoritmo matemático de la separación de un sistema binario mediante electrodiálisis. *Revista de Investigación*, 10(1), 161-172. doi:10.29097/2011-639X.74
- Morales, N., y Acosta, G. (2010). Sistema de electrocoagulación como tratamiento de aguas residuales galvánicas. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 20(1), 33-44. Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=91114807003>
- Mouedhen, G., Feki, M., Wery, M., y Ayedi, H. (2008). Behavior of aluminum electrodes in electrocoagulation process. *Journal of Hazardous Materials*, 150(1), 124-135. doi://doi-org.bdigital.sena.edu.co/10.1016/j.jhazmat.2007.04.090
- Moussa, D., El-Naas, M., Nasser, M., y Al-Marri, M. (2017). A comprehensive review of electrocoagulation for water treatment: Potentials and challenges. *Journal of Environmental Management*, 186(pt. 1), 24-41. doi:10.1016/j.jenvman.2016.10.032

- Moussas, P., y Zouboulis, A. (2011). Groundwater and soil pollution: Bioremediation. En J. Nriagu (Ed.), *Encyclopedia of Environmental Health* (pp. 1037-1044). [s. d.]: Elsevier Science.
- Nanseau-Njiki, C., Tchamango, S., Ngom, P., Darchen, A., y Ngameni, E. (2009). Mercury(II) removal from water by electrocoagulation using aluminium and iron electrodes. *Journal of Hazardous Materials*, 168(2-3), 1430-1436. doi://doi-org.bdigital.sena.edu.co/10.1016/j.jhazmat.2009.03.042
- Ongley, E. (1997). Los fertilizantes, en cuanto contaminantes del agua. En *Lucha contra la contaminación agrícola de los recursos hídricos* [edición digital]. Recuperado de [http://www.fao.org/docrep/W2598S/w2598s05.htm#capítulo3losfertilizantes,encuantocontaminantes del agua](http://www.fao.org/docrep/W2598S/w2598s05.htm#capítulo3losfertilizantes,encuantocontaminantes%20del%20agua)
- Osaka, T., Shirotani, K., Yoshie, S., y Tsuneda, S. (2008). Effects of carbon source on denitrification efficiency and microbial community structure in a saline wastewater treatment process. *Water Research*, 42(14), 3709-3718. doi:10.1016/j.watres.2008.06.007
- Pearse, M. (2003). Historical use and future development of chemicals for solid-liquid separation in the mineral processing industry. *Minerals Engineering*, 16(2), 103-108. doi:10.1016/S0892-6875(02)00288-1
- Pérez, A. (2013). Manual de patología general. En GEA (Ed.), *Manual de patología general* (7ª ed., pp. 157-158). Barcelona, España: Elsevier Masson.
- Pérez, J. (2014). *Uso de los fertilizantes y su impacto en la producción agrícola* (tesis de maestría). Facultad de Ciencias, Departamento de Biociencias, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.
- Petrii, O., y Safonova, T. (1992). Electroreduction of nitrate and nitrite anions on platinum metals: A model process for elucidating the nature of the passivation by hydrogen adsorption. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 331(1-2), 897-912. doi://doi.org/10.1016/0022-0728(92)85013-S
- Piña-Soberanis, M., Martín-Domínguez, A., González-Ramírez, C., Prieto-García, F., Guevara-Lara, A., y García-Espinoza, J. (2011). Revisión de variables de diseño y condiciones de operación en la electrocoagulación. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 10(2), 257-271.
- PNUD. (2006). *Informe sobre desarrollo humano 2006. Más allá de la escasez: poder, pobreza y la crisis mundial del agua*. Honduras: PNUD.
- Resolución n.º 2115 de 2007. *Por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano*. Ministerio de la Protección Social y Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 22 de junio de 2007.
- Restrepo, J., y Kjerfve, B. (2004). Hydrochemical aspects of major Pacific and Caribbean rivers of Colombia. En L. Lacerda, R. Santelli, E. Duursma y J. Abrao (Eds.), *Facets of environmental geochemistry in tropical and subtropical environments* (169-187). Verlag, Berlín: Springer.
- Rodríguez, J. (1995). *Eliminación de metales alcalinos de polioles mediante intercambio iónico*. España: Universidad de Castilla-La Mancha.
- Samatya, S., Kabay, N., Yüksel, Ü, Arda, M., y Yüksel, M. (2006). Removal of nitrate from aqueous solution by nitrate selective ion exchange resins. *Reactive and Functional Polymers*, 66(11), 1206-1214 doi://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2006.03.009

- Sandoval, J., y Rubio, D. (2016). Revisión de artículos sobre floculación de microalgas. *Revista de Investigación*, 9(2), 114-132. doi:10.29097/2011-639X.59
- Schoeman, J., y Steyn, A. (2003). Nitrate removal with reverse osmosis in a rural area in south Africa. *Desalination*, 155(1), 15-26. doi://doi.org/10.1016/S0011-9164(03)00235-2
- Sevda, S., Sreekishnan, T., Pous, N., Puig, S., y Pant, D. (2018). Bioelectroremediation of perchlorate and nitrate contaminated water: a review. *Bioresource Technology*, 255, 331-339. doi://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.02.005
- Shafaei, A., Pajootan, E., Nikazar, M., y Arami, M. (2011). Removal of co (II) from aqueous solution by electrocoagulation process using aluminum electrodes. *Desalination*, 279(1), 121-126. doi:10.1016/j.desal.2011.05.070
- Shivayogimath, C., y Watawati, C. (2013). Treatment of solid waste leachate by electrocoagulation technology. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 2(13), 266-269. doi:10.15623/ijret.2013.0213047
- Song, Q., Li, M., Wang, L., Ma, X., Liu, F., y Liu, X. (2019). Mechanism and optimization of electrochemical system for simultaneous removal of nitrate and ammonia. *Journal of hazardous materials*, 363, 119-126. doi://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.09.046
- Soto A., y Soto, B. (2013). *Desalación de agua de mar mediante sistema osmosis inversa y energía fotovoltaica para provisión de agua potable en Isla Damas, región de Coquimbo* (Documento Técnico n.º 33). Uruguay: Unesco.
- Szilágyi, B., Şerban Agachi, P., Barabás, R., y Lakatos, B. (2014). Coupled population balance-CFD modelling of a continuous precipitation reactor. *Computer Aided Chemical Engineering*, 33, 187-192. doi://doi.org/10.1016/B978-0-444-63456-6.50032-6
- Tabash, T. (2013). *Nitrate removal from groundwater using continuous flow electrocoagulation reactor* (tesis de maestría). Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, Deanery of High Studies, Islamic University of Gaza, Gaza, Palestina.
- Talhi, B., Monette, F., y Azzouz, A. (2011). Effective and selective nitrate electroreduction into nitrogen through synergistic parameter interactions. *Electrochimica Acta*, 58, 276-284. doi://doi.org/10.1016/j.electacta.2011.09.044
- Tyagi, S., Rawtani, D., Khatri, N., y Tharmavaram, M. (2018). Strategies for nitrate removal from aqueous environment using nanotechnology: a review. *Journal of Water Process Engineering*, 21, 84-95. doi://doi.org/10.1016/j.jwpe.2017.12.005
- Uzun, H., y Debik, E. (2019). Economical approach to nitrate removal via membrane capacitive deionization. *Separation and Purification Technology*, 209, 776-781. doi://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.09.037
- Van der Hoek, J., van der Hoek, W., y Klapwijk, A. (1988). Nitrate removal from ground water-use of a nitrate selective resin and a low concentrated regenerant. *Water, Air, and Soil Pollution*, 37(1), 41-53. doi:10.1007/BF00226478
- Vasudevan, S., Epron, F., Lakshmi, J., Ravichandran, S., Mohan, S., y Sozhan, G. (2010). Removal of NO₃⁻ from drinking water by electrocoagulation—an alternate approach. *Clean—Soil, Air, Water*, 38(3), 225-229.

- Villaseñor, J. (1999). *Eliminación biológica de fósforo en aguas residuales urbanas*. España: Universidad de Castilla-La Mancha.
- Wellner, D., Couperthwaite, S., y Millar, G. (2018). Influence of operating parameters during electrocoagulation of sodium chloride and sodium bicarbonate solutions using aluminium electrodes. *Journal of Water Process Engineering*, 22, 13-26. doi://doi.org /10.1016/j.jwpe.2017.12.014
- Xu, D., Li, Y., Yin, L., Ji, Y., Niu, J., y Yu, Y. (2018). Electrochemical removal of nitrate in industrial wastewater. *Frontiers of Environmental Science and Engineering*, 12(1), 1-14. doi:10.1007/s11783-018-1033-z
- Yehya, T., Chafi, M., Balla, W., Vial, C., Essadki, A., y Gourich, B. (2014). Experimental analysis and modeling of denitrification using electrocoagulation process. *Separation and Purification Technology*, 132, 644-654. doi://doi.org /10.1016/j.seppur.2014.05.022
- Park, J., y Yoo, Y. (2009). Biological nitrate removal in industrial wastewater treatment: Which electron donor we can choose. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 82(3), 415-429.
- Yilmaz, A., Boncukcuoğlu, R., Kocakerim, M., Yilmaz, M., y Paluluoğlu, C. (2008). Boron removal from geothermal waters by electrocoagulation. *Journal of Hazardous Materials*, 153(1-2), 146-151. doi://doi.org /10.1016/j.jhazmat.2007.08.030
- Zhao, Y., Kong, F., y Wang, Z. (2017). Role of membrane and compound properties in affecting the rejection of pharmaceuticals by different RO/NF membranes. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 11(6), 193-205. doi:10.1007/s11783-017-0975-x

REVISIÓN DEL USO DE SELLOS QUÍMICOS PARA EL CONTROL DE AGUA DE PRODUCCIÓN EN POZOS PETROLEROS

REVIEW ABOUT THE USE OF CHEMICAL SEALS AS A TREATMENT FOR WATER CONTROL IN PRODUCTION WELLS

Juan Sandoval Herrera*
Angie Ortega Ramírez**
Estefanie Luque Castro***
Catherin Moreno León****

Recibido: 6 de junio de 2018

Aceptado: 17 de septiembre de 2018

Resumen

El agua de producción en la industria del petróleo es el fluido que acompaña al crudo y al gas. Este fluido presenta altas concentraciones de sales, metales y compuestos orgánicos que por su volumen y toxicidad generan problemas de manejo. Se estima que en Colombia se producen cerca de 11.6 barriles de agua por cada barril de crudo que se obtiene. Esta excesiva producción de agua sobrecarga los sistemas de tratamiento de superficie y afecta la productividad. Debido a estos problemas, que se presentan cada vez con mayor frecuencia, se están llevando a cabo tratamientos con polímeros para aumentar la tasa de producción de hidrocarburos. Este trabajo realiza una breve revisión de la teoría y práctica alrededor de este tema.

Palabras clave: agua de producción, crudo, gas, polímeros, sellos químicos.

Abstract

Production water is known in the oil industry as the fluid that accompanies oil and gas. It contains high concentrations of salts, metals and organic compounds, generating management problems due to its volume and toxicity. In Colombia, it is estimated that about 11.6 barrels of water are

* Docente investigador. Director grupo de investigación Ambiente y Hábitat, Fundación Universidad de América, Bogotá Colombia. juan.sandoval@profesores.uamerica.edu.co

** Docente investigador. Grupo de investigación Ambiente y Hábitat, Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia. angie.ortega@profesores.uamerica.edu.co

*** Estudiante de Ingeniería Química. Grupo de investigación Ambiente y Hábitat, Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia. estefanie.luque@estudiantes.uamerica.edu.co

**** Estudiante de Ingeniería Química. Grupo de investigación Ambiente y Hábitat, Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia. catherin.moreno@estudiantes.uamerica.edu.co

produced for each barrel of crude obtained. This excessive water production overloads the surface treatment systems, affecting productivity. Due to these problems that occur with greater intensity, polymer treatments that increase the rate of hydrocarbon production are being carried out. Here is a brief review of the theory and practice around this topic.

Keywords: oil, gas, production water, polymer, chemical seals.

INTRODUCCIÓN

Colombia produce cerca de 11.6 barriles de agua por cada barril de crudo (Ecopetrol, 2016). La producción de crudo en Colombia llega aproximadamente a 863 538 barriles por día (Agencia Nacional de Hidrocarburos, 2018), lo que implica que el volumen de las aguas de producción en la superficie es muy alto y que existe un grave problema medioambiental y social. Igualmente, este volumen hace más complejo su tratamiento, ya sea para su eliminación por métodos convencionales o su reutilización, pues sobrecarga los sistemas de tratamiento de superficie y afecta en gran medida la eficacia, productividad y rentabilidad del campo (Mesa, Orjuela, Ramírez y Sandoval, 2018).

La selección de las soluciones de manejo de producción de agua depende directamente de los costos requeridos para su implementación. En otras palabras, la rentabilidad del campo se basa en el límite económico de la relación agua/petróleo (Arnold et ál., 2004; Nabzar y Duplan, 2011). Por lo cual, cuando el volumen de agua supera el volumen de petróleo producido, la mejor opción es abandonar el pozo, con la consiguiente pérdida de reservas.

Para reducir los costos de manejo de agua y aumentar la producción de petróleo en campos petroleros es esencial maximizar el desempeño del campo. Como lo expresan Bailey et ál. (2000): “Si bien el ahorro potencial derivado del control del agua es importante en sí mismo, tiene más valor el potencial aumento de la producción y de la recuperación del crudo” (p. 33).

Una de las alternativas que se utilizan hoy en día es el uso de sellos químicos, los cuales reducen la incorporación de agua de yacimiento en el crudo extraído y, por lo tanto, aumentan la producción de hidrocarburos y minimizan los costos operativos (Fakhru’l-Razi et ál., 2009). Sin embargo, la utilización de estas técnicas depende de las características y condiciones del pozo, por lo que la selección de la mejor alternativa favorecerá dos factores esenciales en la exploración y perforación de los yacimientos: tiempo y costo (Seright, Lane y Sydansk, 2001).

Esta revisión plantea la descripción de las causas, el diagnóstico de los problemas, las alternativas de solución (que varían según cada tipo de problemas), el uso de polímeros en la industria petrolera, los factores que afectan el uso de estas sustancias y el estudio de algunos casos que sirven, a manera de ejemplo, para evaluar los resultados de la aplicación de los polímeros en el control de la producción de agua en la industria petrolera a nivel mundial.

CAUSAS POTENCIALES DE LA PRESENCIA DE AGUA

Uno de los factores que contribuyen a la producción de agua en campos petroleros es la alta capacidad de almacenamiento de agua y crudo que tienen las rocas reservorio, pues su porosidad y permeabilidad permite que agua y crudo fluyan libremente a través de sus poros interconectados y se garantice la producción. Por otro lado, se habla del agua producida debido a los procesos de optimización de campos maduros, cuya finalidad es maximizar la producción aumentando el factor de recobro e incrementar la producción de la reserva a partir de la inyección de fuentes externas (la inyección de agua, por ejemplo).

El corte elevado de agua se conoce en la industria del petróleo como agua “mala”, lo que alude a que la producción de petróleo no es suficiente para compensar el costo que requiere el manejo del agua en superficie. Por lo tanto, una tasa alta de producción de agua reduce la obtención de hidrocarburos y amenaza la rentabilidad del campo.

Algunas causas del corte elevado de agua son: a) fugas en la tubería de producción, la tubería de revestimiento o el empacador; b) terminación en zona de agua; c) flujo en zonas posteriores a la tubería de revestimiento; d) desplazamiento del contacto agua/aceite; e) presencia de capa de muy permeable con empuje natural; f) presencia de una capa muy permeable en pozo inyector; g) formación fracturada naturalmente; h) fracturas inducidas en acuíferos o en operaciones de inyección; i) fenómenos de conificación y segregación de capa por gravedad.

Estos factores se pueden determinar gracias a los diferentes estudios del yacimiento de producción y su respectiva caracterización, el tipo de formación, la relación agua/petróleo (RAP), los datos de producción, las mediciones de los registros (Chan, 1995), entre otros diagnósticos que se describen a continuación.

Gráfico de recuperación

Es un gráfico semilogarítmico de la RAP con respecto a la producción acumulada de petróleo (Bailey et ál., 2000). Se extrapola la tendencia de producción de crudo, así: si la producción iguala a las reservas esperadas para ese pozo, el agua se está produciendo en un nivel aceptable; de lo contrario, el pozo está produciendo agua no aceptable y se deben tomar medidas de control.

Gráfico de la historia de producción

Gráfico en escala doblemente logarítmica de los flujos en barriles de petróleo y el flujo de producción de agua con respecto al tiempo. El análisis es el siguiente: si se percibe un incremento de la producción de agua y una disminución en la generación de petróleo de manera casi simultánea, se requerirá un tratamiento de control; por el contrario, si disminuye la tasa de producción de agua y aumenta la formación de hidrocarburos, se concluye que el pozo está comportándose de manera ideal (Cheng y Li, 2014).

Gráfico de diagnóstico

Gráfica doblemente logarítmica de petróleo acumulado contra el tiempo. Se conoce también como “curva de declinación”. Se usa para identificar el límite económico por medio de la extrapolación de la curva y, a su vez, determinar el tiempo en el cual se logra el pico de la producción de petróleo y el tiempo en el que hay respuesta a la inyección de agua (Yortsos, Choi, Yang y Shah, 1999).

Registros de producción

Registros que muestran cómo se comportan los fluidos en el pozo o alrededor de este en la producción o inyección. Son eficaces para analizar el desempeño dinámico del pozo y su productividad en varias zonas (Bailey et ál., 2000).

Es de vital importancia conocer los factores que contribuyen a la producción de agua en superficie, las diferentes técnicas o tratamientos a emplear y los resultados de los análisis de rentabilidad económica. Cada tipo de problema tiene una amplia gama de soluciones mecánicas, químicas o la combinación de ambas.

USO DE POLÍMEROS EN LA INDUSTRIA DEL PETRÓLEO

Los polímeros se emplean en la industria de petróleo para controlar las propiedades reológicas y la estabilidad de diversos productos comerciales derivados. Estos son usados en diferentes etapas de la producción de petróleo: perforación, producción, transporte y procesamiento de crudo (Yadav y Mahto, 2013). Específicamente, durante el proceso de producción se puede controlar la formación excesiva de agua usando polímeros en mezclas para el arrastre de crudo, que también son utilizados como geles para controlar el perfil de inyección. A continuación se describen los principales usos de los polímeros en la industria petrolera.

Fluidos de yacimientos

Desde la formación hasta las instalaciones de producción en superficie, los fluidos de yacimiento siguen un trayecto específico de PVT (relación presión-volumen-temperatura) y tienen cambios en sus propiedades físicas y químicas. El monitoreo de estas condiciones es esencial para la toma de decisiones sobre la planeación de métodos de recobro y las operaciones de construcción, producción y monitoreo de pozos.

Fluidos de perforación

Permiten la perforación del área prospectiva, produciendo el menor daño a la formación y a los instrumentos. Las funciones de los polímeros en los lodos de perforación se indican a continuación:

- *Viscosificantes*. Inicialmente, en la operación de perforación, las soluciones son poco viscosas para facilitar su bombeo; pero su viscosidad se incrementa al finalizar la operación para mantener los sólidos en suspensión (Sydansk, Al-Dhafeeri, Xiong y Seright, 2004).
- *Defloculantes de arcilla*. Diluyente formado por polímeros con cargas aniónicas de bajo peso molecular que es utilizado para reducir la viscosidad o evitar la floculación.
- *Floculante de arcilla*. Sustancia formada por polímeros de cargas aniónicas con alto peso molecular que permite la generación de flóculos.
- *Aditivos*. Se usan para regular la pérdida de crudo, agua o gas hacia las rocas permeables que han sido perforadas, gracias a que forman una pasta sobre las paredes de la formación durante la perforación.

Fluidos para recuperación mejorada de crudo

Al culminar el proceso exploratorio, se lleva a cabo la perforación del área prospectiva, es decir, aquella en la cual se predijo la presencia de hidrocarburos. Las presiones naturales generadas por los pozos al perforar proporcionan una fuerza suficiente para extraer cierta cantidad de crudo (no su totalidad). Con el fin de arrastrar la mayor cantidad de hidrocarburos posible a la superficie se utilizan los métodos de recuperación secundaria o terciaria de crudo, lo que implica la inyección de soluciones de polímeros en el pozo (Raffa, Broekhuis y Picchioni, 2016). Esta técnica es capaz de proporcionar una extracción del 70 % del crudo en la formación (Abidin, Puspasari y Nugroho, 2012; Hatzignatiou, Giske y Stavland, 2018).

SOLUCIONES PARA EL CONTROL DEL AGUA

Las soluciones para el control de agua de producción se rigen por una operación denominada “corte de agua” (*water shut-off*), la cual actúa como obstáculo para el paso del agua hacia los pozos de producción. Estas soluciones son variadas, incluyen sellos químicos, mecánicos, entre otros (Arnold et ál., 2004).

Soluciones mecánicas

Este tipo de tratamiento consiste en un tapón mecánico que se puede transportar con tubería flexible, lo que garantiza el cegado del hueco, ya sea revestido o abierto (Qin y Wojtanowicz, 2009; Jia y Ren, 2016; Muktadir, Amro y Schramn, 2016; Wang, Li, Wang y Ye, 2012).

Soluciones químicas

Se basan en compuestos poliméricos resultantes de la unión de una o más unidades (denominadas monómeros). Las propiedades de estos polímeros en solución están determinadas por las características estructurales de la cadena de macromoléculas que lo conforman. Estas estructuras dependen en sí de la naturaleza de la unidad repetitiva; en otros casos (como el de los copolímeros), estos dependen de la composición y la distribución de los monómeros en la cadena (ver figura 1).


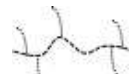
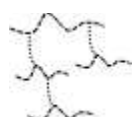
Estructura	Tipos de monómeros que lo forman
<p>Lineal</p> 	<p>Homopolímeros A-A-A-A-A-A-A</p>
<p>Ramificado</p> 	<p>Copolímeros A-B al azar A-A-A-B-B-A-B-A Alternado A-B-A-B-A-B-A-B</p>
<p>Entrecruzado</p> 	<p>En bloque A-A-A-A-B-B-B-B Injerto B B B A-A-A-A-A-A-A-A</p>

Figura 1. Clasificación de los polímeros de acuerdo con su estructura y al tipo de monómeros que lo forman.

Fuente: Fernández (s.f.).

Estas soluciones cuentan con una tubería que permite colocar los fluidos necesarios para llevar a cabo el tratamiento sin riesgo de afectar la zona de hidrocarburos. Constituyen la técnica más usada para cortar el flujo de agua y controlar la conformación por su eficiencia y relación beneficio/costo.

Factores que afectan el comportamiento de las soluciones poliméricas en medio acuoso

Cuando se emplean polímeros en operaciones relacionadas con yacimientos petroleros es necesario garantizar que las propiedades de la solución polimérica se mantengan por un tiempo determinado para evitar la degradación estructural del polímero dentro del reservorio. Los factores que afectan la estabilidad del polímero pueden ser de tipo mecánico, químico y biológico (Fernández, s.f.). A continuación se enuncian los efectos más relevantes que interfieren en la estabilidad de la solución polimérica.

- *Influencia de las sales.* Por lo general, la viscosidad de los polímeros disminuye al aumentar la concentración salina (Rodríguez, 1998; Qamar, Pervez, Al-Kharusi y Akhtar, 2011). El efecto de iones divalentes es aún más pronunciado que el de iones monovalentes; su presencia en pequeñas cantidades puede ocasionar, incluso, el fenómeno de floculación del polímero.
- *Influencia de la temperatura.* En este aspecto se deben tener en cuenta dos factores: la temperatura a la que se somete el polímero y el periodo de tiempo que se mantenga esta condición. Por lo general, las soluciones poliméricas pierden viscosidad con el incremento de la temperatura. Por su parte, cuando las soluciones de polímeros pasan periodos de tiempo prolongados a elevadas temperaturas, las cadenas poliméricas se degradan, lo que también afecta la viscosidad de la solución. Por ello se han estudiado diversos aditivos para mejorar la estabilidad y viscosidad del gel obtenido; por ejemplo, el uso de taninos modificados para agregar a poliacrilamida modificada con el fin de usar en reservorios de altas temperaturas (Wang, Li, Wang y Ye, 2012). Otros autores han estudiado diversas mezclas para ser usadas en reservorios a muy bajas temperaturas (Reddy, Crespo y Eoff, 2012; Jia, Ren, Li y Ma, 2016).
- *Degradación mecánica.* La degradación por corte se debe generalmente a efectos mecánicos del bombeo de la solución a la formación en la entrada de las perforaciones, que llega a ser lo suficientemente fuerte como para romper las cadenas moleculares del polímero. Los biopolímeros presentan buena resistencia a la degradación mecánica, mientras que las poliacrilamidas son susceptibles a ese tipo de degradación debido al tipo de molécula. Esta degradación ocurre por ruptura de las cadenas grandes de polímero en varias más pequeñas (Jiménez, Castro y Maya, 2017).
- *Degradación química.* Provoca una disminución en la viscosidad de las soluciones poliméricas debido al rompimiento de las moléculas que conforman el polímero; esto se puede dar por el efecto del oxígeno, iones metálicos (como el hierro) o procesos relacionados con la hidrólisis. Cuando el agua empleada para disolver el polímero contiene oxígeno libre bajo condiciones alcalinas, se reduce la viscosidad y se limita la estabilidad de la solución (Kabir, 2001). Por lo anterior, usualmente se adicionan inhibidores de oxígeno al agua de mezcla para prevenir la degradación.
- *Degradación biológica.* Descomposición microbiana de las moléculas de polímeros por bacterias durante el almacenamiento en el yacimiento. Los productos poliméricos sintéticos son más resistentes al ataque biológico que los biopolímeros. Como consecuencia del ataque, la viscosidad de la solución disminuye. Para evitar esta degradación se usan biocidas, que actúan efectivamente contra un ataque bacterial (Floerger, 2016).

Clasificación de las soluciones químicas para control de agua

De acuerdo con la naturaleza de los polímeros, hay dos categorías básicas usadas en las aplicaciones de campos petroleros: los biopolímeros y los polímeros sintéticos. Los biopolímeros incluyen la goma xantana, hidroxietilcelulosa, goma guar, entre otras sustancias, las cuales se caracterizan por tener altos pesos moleculares y ser sintetizadas a partir de reacciones de fermentación de sustancias ricas en hidratos de carbono. Por su naturaleza, estos biopolímeros son susceptibles de degradación biológica y térmica. Los polímeros sintéticos se obtienen químicamente partiendo de un derivado del petróleo como materia prima. Dentro de esta categoría se encuentra uno de los polímeros más importantes para la industria petrolera por sus propiedades y aplicaciones en campo, la poliacrilamida. Esta molécula puede ser reticulada orgánicamente con compuestos como la polietilamina, e inorgánicamente con elementos metálicos (el cromo, por ejemplo) para mejorar su estabilidad. También se encuentran las resinas, terpolímeros, microgeles, entre otros (Dalrymple, Eoff, Vasquez y van Eijden, 2008; Mercado, Acuna, Najera, Caballero y Soriano, 2009; Joseph y Ajenka, 2010; Ghosh et ál., 2012; Sengupta, Sharma y Udayabhanu, 2012; Dai, Zhao, You y

Zhao, 2014; Zhao, Dai, Chen, Yan y Zhao, 2015; Liu et ál., 2016; Sun et ál., 2017; Zhu, Hou, Wei, Chen y Peng, 2017).

Actualmente, los polímeros más usados para control de producción de agua son de base poliacrilamida parcialmente hidrolizada (ver figura 2), entrecruzada con sales inorgánicas o algunas sustancias orgánicas, lo que genera una estabilidad térmica que permite que el polímero soporte temperaturas por encima de los 250 °F (Reddy, Crespo y Eoff, 2012). Una revisión detallada sobre los geles poliméricos de poliacrilamida, clasificados según composición y condiciones de operación, se encuentra en Bai, Zhou y Yin (2015).

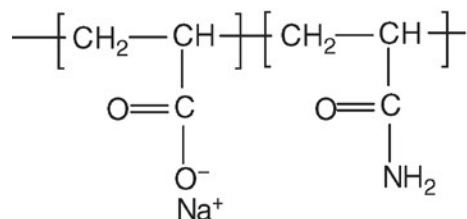


Figura 2. Poliacrilamida parcialmente hidrolizada.

Fuente: Kurenkov et ál. (2001).

Otra clasificación se basa en la funcionalidad en términos de selectividad:

- *Los agentes selectivos o sellantes.* Se caracterizan porque interactúan de preferencia con el agua, de manera que bloquean solo esta zona, permitiendo así el paso de petróleo. Entre estos se encuentran los bloqueadores de permeabilidad selectiva, los reductores desproporcionados de permeabilidad y los modificadores de permeabilidad relativa. Los agentes selectivos son la mezcla de soluciones acuosas con un polímero reticulado que actúa como modificador de la permeabilidad relativa del agua (RPM). Estos agentes se inyectan en pequeñas fracturas, penetrando únicamente en aquellas formaciones que tengan una permeabilidad superior a 5 darcies.
- *Los agentes no selectivos o no sellantes.* No distinguen entre el agua y el petróleo por lo que pueden taponar ambas zonas a la vez. Son también llamados “gelificantes”. Dentro de los agentes no selectivos se pueden encontrar desde el cemento hasta geles activados. La mayoría de estos geles requieren un tiempo de activación.

CASOS REALES EN CAMPO

Kohler y Zaitoun propusieron en 1991 un tratamiento basado en el uso de polímeros, específicamente, los polisacáridos no iónicos de alto peso molecular, para el control del agua en pozos de producción con elevadas temperaturas. Este polímero tiene un excelente poder viscosificante en todos los tipos de salmueras de yacimiento, alta resistencia al cizallamiento, buena estabilidad térmica, alta capacidad para disminuir la permeabilidad relativa de la salmuera (sin afectar la permeabilidad relativa de los hidrocarburos) y gran eficacia en reservorios de arenisca y piedra caliza. También muestra excelentes resultados aplicar el tratamiento a yacimientos de temperaturas superiores a los 70-75 °C, de manera que con ayuda de aditivos especialmente diseñados se pueden proponer tratamientos a temperaturas de hasta 120-130°C, manteniendo la estabilidad y la función correcta del polisacárido. Kohler y Zaitoun (1991) determinaron, de igual manera, la facilidad de bombear el polisacárido a altas velocidades de inyección aplicando un ligero aumento de presión en el cabezal del pozo.

Por otro lado, El-Karsani, Al-Muntasheri y Hussein (2014) estudiaron otros problemas relacionados con la producción de agua no deseada en los pozos productores de petróleo y gas, como la generación de corrosión, incrustaciones y pérdida de productividad. Los autores evaluaron un método para tratar este problema reduciendo químicamente el agua no deseada por medio del uso de sistemas de polímeros. Igualmente, presentaron una revisión exhaustiva de la literatura disponible en la última década. En esta investigación, los datos de aplicaciones de campo para varios sistemas de polímeros se aplican a temperaturas de 40 a 150 °C y permeabilidades de 20 a 2.720 milidarcies para reservorios de areniscas y carbonatos en todo el mundo. La revisión reveló, además, que la última década de desarrollos se puede categorizar en dos tipos: el primero corresponde a geles poliméricos para el cierre total de agua en la región próxima al pozo; el segundo se relaciona con la alteración de la permeabilidad de zonas canalizadas, lo que provoca que el fluido de inyección se desvíe hacia secciones menos permeables del yacimiento con alta saturación de aceite. Este tipo de modificación de la permeabilidad en el yacimiento se logra a partir de procesos de inyección de sistemas de geles, tales como resinas de poliuretano, terpolímeros de reticulación de cromo (Cr^{3+}), poliacrilamida parcialmente hidrolizada (PHPA) de polimerización cruzada Cr^{3+} (Xu, 2017) o, incluso, microgeles (Feng et ál., 2003). Además, Al-Muntasheri, Nasr-El-Din, Al-Noaimi y Zitha (2009) identificaron la polietilenimina (PEI) como un buen agente para reticular diversos polímeros basados en poliacrilamida (PAM), con miras a usarla en control de conformación y de producción de agua. Otros estudios posteriores revelan las bondades de su uso, específicamente por poliacrilamida parcialmente hidrolizada (Jia et ál., 2012). Finalmente, la tendencia es el uso de geles poliméricos diseñados específicamente para un solo uso, por ejemplo, con una distribución de tamaño de partícula muy homogéneo (ver Elsharafi y Bai, 2016).

CONCLUSIONES

Es necesario identificar la causa principal del problema de la producción excesiva de agua con el fin de buscar la alternativa y/o tratamiento más eficiente y que se adecúe a las condiciones del pozo productor. Estas causas se pueden determinar gracias al tipo de formación, la historia de producción, las mediciones de los registros y la relación agua/petróleo del yacimiento. La selección del tratamiento para controlar la producción de agua debe tener en cuenta el resultado del análisis de rentabilidad económica y considerar que cada causa conlleva varias soluciones, ya sean mecánicas, químicas o la combinación de ambas.

Los polímeros, cuya estructura química está fuertemente relacionada con sus propiedades, son esenciales en la industria del petróleo para tratar problemas de producción de agua en yacimientos, específicamente, por su actividad como sellantes químicos.

REFERENCIAS

- Abidin, A., Puspasari, T., y Nugroho, W. (2012). Polymers for enhanced oil recovery technology. *Procedia Chemistry*, 4, 11-16.
- Al-Muntasheri, G., Nasr-El-Din, H., Al-Noaimi, K., y Zitha, P. (2009). A study of polyacrylamide-based gels crosslinked with polyethyleneimine. *SPE Journal*, 14(2), 245-251.
- Agencia Nacional de Hidrocarburos (2018). *Estadísticas de producción*. Recuperado de <http://www.anh.gov.co/Operaciones-Regalias-y-Participaciones/Sistema-Integrado-de-Operaciones/Paginas/Estadisticas-de-Produccion.aspx>
- Arnold, R., Burnett, D., Elphick, J., Feeley III, T., Galbrum, M., y Hightower, M. (2004). Manejo de la producción de agua: de residuo a recurso. *Oilfield Review*, 16(12), 30 -45.

- Bai, B., Zhou, J., y Yin, M. (2015). A comprehensive review of polyacrylamide polymer gels for conformance control. *Petroleum Exploration and Development*, 42(4), 525-532.
- Bailey, B., Crabtree, M., Tyrie, J., Elphick, J., Kuchuk, F., Romano, C., y Roodhart, L. (2000). Control del agua. *Oilfield Review*, 12(1), 32-53.
- Chan, K. (1995, enero). Water control diagnostic plots. En Society of Petroleum Engineers, *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Ponencia presentada en Dallas, Texas, EE. UU.
- Cheng, C., y Li, K. (2014). Comparison of models correlating cumulative oil production and water cut. *Journal of Energy Resources Technology*, 136(3), 032901.
- Dai, C., Zhao, G., You, Q., y Zhao, M. (2014). A study on environment-friendly polymer gel for water shut-off treatments in low-temperature reservoirs. *Journal of Applied Polymer Science*, 131(8), 1-7
- Dalrymple, D., Eoff, L., Vasquez, J., y van Eijden, J. (2008, septiembre). Shallow penetration particle-gel system for water and gas shut-off applications (Russian). En Society of Petroleum Engineers, *SPE Russian Oil and Gas Technical Conference and Exhibition*. Ponencia presentada en Denver, Colorado, EE. UU.
- Ecopetrol. (2016). *Reporte integrado de gestión sostenible*. Recuperado de <https://www.ecopetrol.com.co/documentos/reportes-integrados-gestion-sostenible-2016.pdf>
- El-Karsani, K., Al-Muntasheri, G., y Hussein, I. (2014). Polymer systems for water shutoff and profile modification: a review over the last decade. *SPE Journal*, 19(01), 135-149.
- Elsharafi, M., y Bai, B. (2016). Influence of strong preformed particle gels on low permeable formations in mature reservoirs. *Petroleum Science*, 13(1), 77-90.
- Fakhru'l-Razi, A., Pendashteh, A., Abdullah, L., Biak, D., Madaeni, S., y Abidin, Z. (2009). Review of technologies for oil and gas produced water treatment. *Journal of Hazardous Materials*, 170 (2-3), 530-551.
- Feng, Y., Tabary, R., Renard, M., Le Bon, C., Omari, A., y Chauveteau, G. (2003, febrero). Characteristics of microgels designed for water shutoff and profile control. En Society of Petroleum Engineers, *International Symposium on Oilfield Chemistry*. Ponencia presentada en Houston, Texas, EE. UU.
- Fernández, I. (s. f.). Polímeros en solución y aplicación de los polímeros en la industria petrolera. *Revista Iberoamericana de Polímeros*. Recuperado de <http://www.reviberpol.iibcaudo.com.ve/pdf/publicados/fernandez.pdf>
- Ghosh, B., Bemani, A., Wahaibi, Y., Hadrami, H., y Boukadi, F. (2012). Development of a novel chemical water shut-off method for fractured reservoirs: laboratory development and verification through core flow experiments. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 96-97, 176-184.
- Hatzignatiou, D., Giske, N., y Stavland, A. (2018). Polymers and polymer-based gelants for improved oil recovery and water control in naturally fractured chalk formations. *Chemical Engineering Science*, 187, 302-317.
- Jia, H., Ren, Q., Li, Y., y Ma, X. (2016). Evaluation of polyacrylamide gels with accelerator ammonium salts for water shutoff in ultralow temperature reservoirs: Gelation performance and application recommendations. *Petroleum*, 2(1), 90-97.

- Jia, H., y Ren, Q. (2016). Evidence of the gelation acceleration mechanism of HPAM Gel with ammonium salt at ultralow temperature by SEM study. *SPE Production & Operations*, 31(03), 238-246.
- Jia, H., Zhao, J., Jin, F., Pu, W., Li, Y., Li, K., y Li, J. (2012). New insights into the gelation behavior of polyethyleneimine cross-linking partially hydrolyzed polyacrylamide gels. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 51(38), 12155-12166.
- Jiménez, R., Castro, R., y Maya, R. (2017). Análisis comparativo de procesos de inyección de polímeros ejecutado en Colombia. Recuperado de <http://oilproduction.net/files/ACIPET%20-%20TEC-452-EOR%20-%20OilProduction.pdf>
- Joseph, A., y Ajiienka, J. (2010, agosto). A review of water shutoff treatment strategies in oil fields. En Society of Petroleum Engineers, *Nigeria Annual International Conference and Exhibition*. Ponencia presentada en Tinapa-Calabar, Nigeria.
- Kabir, A. (2001, octubre). Chemical water y gas shutoff technology. An overview. En Society of Petroleum Engineers, *SPE Asia Pacific Improved Oil Recovery Conference*. Ponencia presentada en Kuala Lumpur, Malasia.
- Kohler, N., y Zaitoun, A. (1991, febrero). Polymer treatment for water control in high-temperature production wells. En Society of Petroleum Engineers, *SPE International Symposium on Oilfield Chemistry*. Ponencia presentada en Anaheim, California, EE. UU.
- Kurenkov, V., Hartan, H., y Lobanov, F. (2001). Alkaline Hydrolysis of Polyacrylamide. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 74(04), 543-554.
- Liu, Y., Dai, C., Wang, K., Zhao, M., Zhao, G., Yang, S., y You, Q. (2016). New insights into the hydroquinone (HQ)-hexamethylenetetramine (HMTA) gel system for water shut-off treatment in high temperature reservoirs. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 35, 20-28.
- Mercado, M., Acuna, J., Najera, D., Caballero, C., y Soriano, J. (2009, mayo-junio). High-temperature water control with an organically crosslinked polymer-case histories from Mexico. En Society of Petroleum Engineers, *Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference*. Ponencia presentada en Cartagena de Indias, Colombia.
- Mesa, S., Orjuela, J., Ramírez, A., y Sandoval, J. (2018). Revisión del panorama actual del manejo de agua de producción en la industria petrolera colombiana. *Gestión y Ambiente*, 21(1), 87-98.
- Muktadir, G., Amro, M., y Schramm, A. (2016, noviembre). Review and applicability of downhole separation technology. En Society of Petroleum Engineers, *SPE Middle East Artificial Lift Conference and Exhibition*. Ponencia presentada en Manama, Baréin.
- Nabzar, L., y Duplan, J. (2011). Water in fuel production. Oil production and refining. *Panorama*, 9. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/276292861_Water_in_fuel_production_Oil_production_and_refining
- Qamar, S., Pervez, T., Al-Kharusi, M., y Akhtar, M. (2011, diciembre). Material characterization of water-swelling and oil-swelling elastomers. En *15th International Research/Expert Conference on Trends in the Development of Machinery and Associated Technology*. Ponencia presentada en Praga, República Checa.
- Qin, W., y Wojtanowicz, A. K. (2009, marzo). Water problems and control techniques in heavy oils with bottom Aquifers. En Society of Petroleum Engineers, *SPE Americas E&P Environmental and Safety Conference*. Ponencia presentada en San Antonio, Texas, EE. UU.

- Raffa, P., Broekhuis, A., y Picchioni, F. (2016). Polymeric surfactants for enhanced oil recovery: a review. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 145, 723-733.
- Reddy, B., Crespo, F., y Eoff, L. (2012, abril). Water shutoff at ultralow temperatures using organically crosslinked polymer gels. En Society of Petroleum Engineers, *SPE Improved Oil Recovery Symposium*. Ponencia presentada en Tulsa, Oklahoma, EE. UU.
- Rodríguez, S. (1998). *Disoluciones de polímeros: efecto de los enlaces de hidrógeno sobre sus propiedades termofísicas* (disertación doctoral). Universidad Complutense de Madrid, Madrid, España.
- Sengupta, B., Sharma, V., y Udayabhanu, G. (2012). Gelation studies of an organically cross-linked polyacrylamide water shut-off gel system at different temperatures and pH. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 81, 145-150.
- Seright, R., Lane, R., y Sydansk, R. (2001, diciembre). A strategy for attacking excess water production. En Society of Petroleum Engineers, *SPE Permian Basin Oil and Gas Recovery Conference*. Ponencia presentada en Midland, Texas, EE. UU.
- SNF Floerger. (2016). *Geología del petróleo. Sistemas petrolíferos*. [s. f.]: SNF Floerger.
- Sun, Y., Fang, Y., Chen, A., You, Q., Dai, C., Cheng, R., y Liu, Y. (2017). Gelation behavior study of a resorcinol-hexamethyleneteramine crosslinked polymer gel for water shut-off treatment in low temperature and high salinity reservoirs. *Energies*, 10(7), 913.
- Sydansk, R., Al-Dhafeeri, A., Xiong, Y., y Seright, R. (2004, abril). Polymer gels formulated with a combination of high and low molecular-weight polymers provide improved performance for water-shutoff treatments of fractured production Wells. En Society of Petroleum Engineers *SPE/DOE Symposium on Improved Oil Recovery*. Ponencia presentada en Tulsa, Oklahoma, EE. UU.
- Wang, J., Li, C., Wang, W., y Ye, Y. (2012). Preparation and evaluation of novel high temperature resistance water shutoff agent. *Physics Procedia*, 24, 354-361.
- Wang, X., Zeng, Q., Wang, Z., Guo, X., y Zhao, Y. (2016, marzo). A novel oil-water separator design based on the combination of two flow resistance mechanisms. En *Offshore Technology Conference Asia*. Ponencia presentada en Kuala Lumpur, Malasia.
- Xu, L. (2017). Chemical water shutoff profile research status and development trends. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 82(1), 012061.
- Yadav, U., y Mahto, V. (2013). Rheological study of partially hydrolyzed polyacrylamide-hexamine-pyrocatechol gel system. *International Journal of Industrial Chemistry*, 4(1), 8.
- Yortsos, Y., Choi, Y., Yang, Z., y Shah, P. (1999). Analysis and interpretation of water/oil ratio in waterfloods. *SPE Journal*, 4(04), 413-424.
- Zhao, G., Dai, C., Chen, A., Yan, Z., y Zhao, M. (2015). Experimental study and application of gels formed by nonionic polyacrylamide and phenolic resin for in-depth profile control. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 135, 552-560.
- Zhu, D., Hou, J., Wei, Q., Chen, Y., y Peng, K. (2017, julio). Development of a high-temperature resistant polymer gel system for conformance control in Jidong Oilfield. En Society of Petroleum Engineers, *SPE/IATMI Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition*. Ponencia presentada en Jakarta, Indonesia.

LA AUDITORÍA INTERNA DE CALIDAD. ESTUDIO DE CASO

Carolina Quintero Londoño*

Recibido: 18 de octubre de 2018

Aceptado: 21 de noviembre de 2018

INTRODUCCIÓN

El constante cambio del entorno empresarial y la alta competitividad de los mercados han llevado al empresario a usar nuevas tecnologías e innovar en sus procesos. Sin embargo, esto no es suficiente. Es necesario implementar sistemas de gestión de calidad que permitan mantener altos estándares en los productos o servicios.

Las nuevas políticas mundiales han permitido identificar la importancia de gestionar las empresas integralmente desde los campos de la calidad, la seguridad y salud ocupacional y el ambiente; hecho que repercute en la forma como se llevan a cabo las actividades propias de la gestión de la organización y en la manera en que se pueden fortalecer los procesos internos y externos.

Las auditorías internas son el mecanismo por el cual la organización identifica, proceso a proceso, las debilidades, fortalezas u oportunidades de mejora que tiene el sistema integrado de gestión implementado; a partir de allí se analizan y se planifican las acciones para tomar decisiones que lleven a la mejora.

El objetivo de este documento es dar al lector (por medio de un estudio de caso) una idea general sobre las auditorías internas, que le permitirá conocer ciertas particularidades de una auditoría interna real hecha a una organización, con las correspondientes descripciones de cada situación en cada una de las etapas de una auditoría.

GENERALIDADES SOBRE AUDITORÍA

“Auditoría” se deriva del verbo latino *audire*, que significa “oír”. En la antigüedad el auditor era un oyente, y así era como se le llamaba al representante del gobierno que cobraba los impuestos (Arter, 2003). En la II Guerra Mundial se hizo necesario controlar los procesos de fabricación de las tecnologías bélicas, por lo que las fuerzas militares implementan los primeros procesos de normalización y auditoría.

En 1946 los delegados de 25 países se reunieron en el Instituto de Ingenieros Civiles de Londres para crear una organización internacional que facilitara “la coordinación internacional y la unificación de estándares industriales”. Debido a que “Organización Internacional para la Estandarización” tendría diferentes acrónimos en los diferentes idiomas (IOS en inglés, OIN en francés, por ejemplo), los fundadores decidieron llamarla ISO (ISO se deriva del griego *isos*, que significa “igual”) (ISO, s. f.).

* Ingeniera de Alimentos, magíster en Gestión Ambiental, Calidad y Auditoría para Empresas, magíster en Docencia de la Química. Auditora interna de sistemas integrados de calidad, Facultad de Ingeniería, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia. carolina.quintero@unimilitar.edu.co

A mediados de los años noventa ISO preparó la norma sobre auditorías de sistemas de gestión. La GTC ISO 19011 da al auditor una orientación general sobre la planificación y la realización de una auditoría, así como la competencia y la evaluación de un auditor y un equipo auditor.

Las versiones actuales son:

- NTC ISO 45001:2018, *Sistemas de gestión de la seguridad y salud en el trabajo*
- NTC ISO 14001:2015, *Sistemas de gestión ambiental. Requisitos con orientación para su uso*
- NTC ISO 9001:2015, cuarta revisión del modelo original (actualmente vigente)
- GTC ISO 19011:2018, *Directrices para la auditoría de los sistemas de gestión*

Según el numeral 3.13.1 de NTC ISO 9000:2015, la auditoría es “un proceso sistemático, independiente y documentado para obtener evidencias objetivas y evaluarlas de manera objetiva, con el fin de determinar el grado en que se cumplen los criterios de auditoría”. Existen tres tipos de auditorías de calidad, basadas principalmente en la relación auditor vs. auditado: de primera, de segunda y de tercera parte.

Las auditorías de primera parte son las comúnmente conocidas como auditorías internas, que corresponden a las que la misma organización realiza en su propio sistema de gestión con todos y cada uno de sus procedimientos y documentos que lo conforman. Su función, principalmente, es la de verificar el cumplimiento de la organización de sus propias normas y las que legalmente le son exigidas para su buen funcionamiento.

Las auditorías de segunda parte son auditorías realizadas por un ente externo a la organización, al que se le proveen productos o servicios. Esta se realiza entre partes interesadas.

Las auditorías de tercera parte son las ejecutadas por organismos independientes de auditoría, que se encargan de verificar el cumplimiento de las normas. Estos organismos pueden ser gubernamentales, que verifican el cumplimiento de leyes, decretos, entre otras normativas, o de entidades certificadoras, cuyo objetivo es certificar que la organización ha implementado y mantiene adecuadamente su sistema de gestión de calidad.

EL AUDITOR

El equipo auditor es una o más personas que llevan a cabo la auditoría, con el apoyo, si es necesario, de expertos técnicos. Generalmente, el auditor de este equipo es designado como auditor líder. Pueden existir auditores en formación o entrenamiento y/u observadores, que son personas relacionadas que acompañan el equipo auditor, pero no auditan. La definición que da la norma ISO 9000: 2015 de “auditor” es bastante simple: “persona que lleva a cabo una auditoría”. En el auditor recae realmente la fiabilidad de una auditoría, ya que tiene los conocimientos y habilidades para ejecutar una auditoría en una organización. Las habilidades auditoras se logran a través de las continuas experiencias en diversas auditorías.

GTC-ISO 19011:2018 define una serie de principios que deben ser manejados por el equipo auditor, que son esenciales para que la auditoría sea una herramienta eficaz y fiable y que dé a la organización información que permita tomar las acciones pertinentes para mejorar. Estos principios son:

Integridad. El fundamento de la profesionalidad del auditor. Desempeñar su trabajo éticamente, con honestidad y responsabilidad, permanecer ecuanimes y sin sesgo en todas sus acciones; ser sensible a cualquier influencia que se pueda ejercer sobre su juicio mientras lleva a cabo una auditoría.

Presentación imparcial. Notificar con veracidad y exactitud. Los hallazgos, conclusiones e informes de la auditoría deben reflejar con veracidad y exactitud las actividades de auditoría. La comunicación debe ser veraz, exacta, objetiva, oportuna, clara y completa.

Debido cuidado profesional. La aplicación de diligencia y juicio al auditar. Los auditores deben proceder con el debido cuidado, de acuerdo con la importancia de la tarea que desempeñan y la confianza depositada en ellos, haciendo juicios razonados en todas las situaciones de la auditoría.

Confidencialidad. Seguridad de la información. Los auditores deben proceder con discreción en el uso y la protección de la información adquirida en el curso de sus tareas y no debe usarse inapropiadamente para su beneficio personal o el de alguien, o de modo que perjudique el interés legítimo del auditado.

Independencia. La base para la imparcialidad de la auditoría y la objetividad de las conclusiones de la auditoría. Los auditores deben ser independientes de la actividad que se audita; en todos los casos deben actuar de una manera libre de sesgo y conflicto de intereses.

Enfoque basado en evidencia. El método racional para alcanzar conclusiones de la auditoría, fiables y reproducibles mediante un proceso de auditoría sistemático. La evidencia de la auditoría debe ser verificable.

Enfoque basado en el riesgo. Un enfoque de auditoría que considere riesgos y oportunidades. El enfoque basado en el riesgo debería afectar sustantivamente la planificación, realización y reporte de las auditorías, para asegurar que están enfocadas en asuntos que son significativos para el cliente de la auditoría, y para lograr los objetivos del programa de auditoría. (ISO 19011:2018, pp. 5-6)

El perfil comúnmente aceptado en Colombia para un auditor interno de calidad corresponde a una persona con formación técnica, tecnológica o profesional en las áreas referentes al cargo que desempeña en su organización y con conocimientos en informática. Igualmente, debe contar con una formación complementaria que le dé un mayor bagaje en su área de conocimiento, tener el certificado que lo acredite como auditor interno de calidad y cursos relacionados con las diferentes normas y reglamentaciones que va a auditar. Además, tiene que tener experiencia como auditor, inicialmente como observador, posteriormente como acompañante, con la debida evaluación satisfactoria como auditor.

FASES DE LA AUDITORIA

Los aspectos más destacados que se consideran para efectuar una auditoría interna eficaz, son:

- La organización debe planificar un programa de auditorías anual, tomando en consideración el estado y la importancia de los procesos, así como los resultados de auditorías previas o la proximidad de una auditoría de certificación. La programación generada por el personal responsable de calidad debe ser comunicada a cada una de las partes interesadas, usando los canales de comunicación establecidos para tal fin.
- En el programa de auditoría se deben evidenciar los criterios de auditoría, el alcance de la misma y la frecuencia o las fechas programadas.
- Según las fechas programadas, las competencias de los auditores y los procesos a auditar, se debe hacer una selección de los auditores asegurando la objetividad e imparcialidad del proceso de auditoría. Los auditores no deben auditar su propio proceso.
- Para que una auditoría surta el efecto que se busca, el dueño o responsable del proceso auditado debe asegurarse de que se realizan las acciones necesarias para eliminar los hallazgos detectados y sus causas. Además, se deben realizar actividades de seguimiento que deben incluir la verificación de las acciones tomadas y el informe de los resultados de la verificación.

Preparación o planificación de la auditoría

Definido el programa anual o semestral de auditorías en el interior de una organización, el equipo auditor (guiado por el auditor líder) inicia labores concernientes a la obtención de información relacionada con el proceso, área o unidad que se va a auditar. Esta información permite conocer la caracterización de su proceso más a profundidad, sus objetivos y funciones, los procedimientos que tiene implementados y los responsables, además de los posibles riesgos que tiene el logro de los objetivos del proceso y los controles que se ejercen para evitarlos.

En voz del auditor líder del equipo auditor debe asegurarse de que el dueño del proceso a auditar y su equipo están informados de los objetivos, el alcance, los criterios y de los métodos que se utilizarán en la auditoría; adicionalmente, conoce la composición del equipo auditor, incluyendo los expertos técnicos y las fechas de la auditoría. En algunas organizaciones se acostumbra a realizar una reunión previa en la que los auditores proporcionan toda esta información al auditado y a su vez el auditado proporciona la información relevante de su proceso, solicitada por el auditor.

El plan de auditoría es definido por la GTC-ISO 19011: 2018 como la “descripción de las actividades y de los detalles acordados de una auditoría”. Este es elaborado por el líder o el responsable del equipo auditor. Entre otros puntos, el plan debe contar con:

1. Los objetivos de la auditoría.
2. El alcance de la auditoría, incluyendo la identificación de la organización y sus funciones, así como los procesos a ser auditados.
3. Los criterios de auditoría y cualquier información documentada de referencia.
4. Las ubicaciones (físicas y virtuales), fechas, tiempos y duraciones esperados de las actividades de auditoría a realizar, incluyendo reuniones con la alta dirección del auditado.
5. La necesidad del equipo auditor de familiarizarse con las instalaciones y procesos de auditado (por ejemplo, realizando un recorrido por las locaciones físicas, o revisión de la tecnología de información y comunicación).
6. Los métodos de auditoría a ser utilizados, incluyendo la extensión con la cual el muestreo de auditoría es necesario para obtener suficiente evidencia de auditoría.
7. Roles y responsabilidades de los miembros del equipo auditor, así como las directrices para observadores o intérpretes.
8. La asignación de los recursos apropiados con base en la consideración de riesgos y oportunidades relacionados con las actividades a ser auditadas (ISO 19011:2018, num. 6.3.2.2).

Ejecución de la auditoría

Es el momento cumbre del proceso, implica analizar la información, observar la implementación y ejecución de los procedimientos, entrevistar al personal involucrado, revisar la documentación, verificar los registros, realizar encuestas o hacer muestreos, visitar las diferentes áreas físicas que se requieran, etc., siempre tomando nota de lo observado.

De acuerdo con la lista de verificación previamente realizada, cada uno de los auditores hacen las preguntas o pruebas de cumplimiento para obtener información. Al respecto, la Institución Universitaria Pascual Bravo recomienda obtener información a través de:

- Observación de las actividades, de las condiciones y medios de trabajo circundantes.
- Documentos tales como la política, objetivos, planes, proyectos, caracterizaciones, procedimientos, formatos, entre otros.
- Registros de inspección, supervisión, interventoría, actas de reuniones, comités, reportes de auditorías, registros de programas y seguimientos, informes de gestión y resultados, etc.

- Resúmenes de datos e indicadores de desempeño.
- Registros de las bases de datos y los procedimientos.
- Registros de otras fuentes, por ejemplo, retroalimentación de la ciudadanía y demás información externa pertinente, como la de los proveedores.
- Bases de datos computarizadas y sitios de red. (“Proceso de auditoría”, s. f.)

Preparación del informe

Una vez recopilada toda la información, la GTC-ISO 19011: 2018 recomienda que el equipo auditor se reúna antes del cierre de la auditoría para:

- Analizar los hallazgos de la auditoría y cualquier otra información recolectada. Los hallazgos pueden indicar conformidad o no conformidad con los criterios de la auditoría y/o identificar una oportunidad de mejora.
- Acordar las conclusiones de la auditoría.
- Formular las recomendaciones pertinentes.
- Hacer otras observaciones y exponer oportunidades de mejora, caso en el cual se puede pedir un plan de mejoramiento. (GTC-ISO 19011: 2018, p. 30)

Estos hallazgos pueden indicar la conformidad o no conformidad respecto a los criterios de auditoría, por consiguiente, pueden ser: conformidades, no conformidades y observaciones. Al determinar los hallazgos de la auditoría se debe considerar:

- El seguimiento a los registros y conclusiones de auditorías previas.
- Requisitos del cliente de la auditoría.
- Precisión, suficiencia e idoneidad de la evidencia objetiva que soporta los hallazgos de auditoría.
- La extensión en la cual las actividades planificadas de auditoría son realizadas y los resultados previstos son logrados.
- Hallazgos que exceden las prácticas normales u oportunidades de mejora.
- Tamaño de la muestra.
- Categorización de los hallazgos (si los hay) de la auditoría. Estos pueden ser mayores o menores, según el contexto de la organización.

Los hallazgos deben ser redactados en tono constructivo (mostrando objetividad y sin emitir juicios) y deben ser claros y simples. Para una correcta comunicación, el hallazgo debe contener los siguientes elementos:

- Descripción o referencia a los criterios de auditoría.
- Evidencia de auditoría.
- Declaración de la no conformidad.

En la redacción de los hallazgos de observación siempre se inicia con un verbo en infinitivo, como, por ejemplo, “asegurar”, “garantizar”, “fortalecer”, etc.; mientras que en la redacción de los hallazgos de no conformidad existen una gran variedad de posibilidades, de las cuales la más generalizada es:

- Negación: se evidenció que la organización no garantiza.
- Cuál es la falla: la organización no garantiza la independencia en sus procesos de auditoría.

- Dónde se falla: corresponde al proceso donde se evidencia el incumplimiento, es el proceso que se auditado.
- Evidencia: corresponde a los documentos, registros, observaciones, declaraciones de hecho.
- Incumplimiento y criterio afectado

Las conclusiones de la auditoría pueden tratar aspectos tales como:

- El grado de conformidad del proceso con el sistema de calidad o la norma auditada.
- La efectiva implementación, mantenimiento y mejora del sistema.
- La capacidad del proceso de asegurar la permanente idoneidad, adecuación, eficacia, eficiencia, efectividad y mejora del sistema.
- El logro de los objetivos de la auditoría, el cubrimiento del alcance y el cumplimiento de los criterios de auditoría.

Cierre e informe de auditoría

Esta reunión se lleva a cabo por el auditor líder, en presencia de su equipo de trabajo y los responsables del proceso auditado. Aquí se desarrolla y documenta formalmente las conclusiones sobre los objetivos de la auditoría basándose en el resultado de la ejecución.

El auditor debe asegurarse que el auditado comprende todos los hallazgos y los acepta, ya que puede suceder que alguno de los auditados no está de acuerdo, ante lo cual el auditor debe estar preparado para sustentar y justificar el hallazgo, basado en evidencias cuidadosas y precisas, y evitando involucrarse en discusiones. Si se comete un error o el proceso auditado justifica apropiadamente el hallazgo, hay que disculparse y hacer corrección. Si bien la auditoría se centra en los aspectos a mejorar, esto no significa que los aspectos positivos no deban ser resaltados también. Luego hay que nombrar las fortalezas que presenta el proceso.

El informe final de auditoría debe contener:

- Nombre de la organización
- Fecha y lugar de la auditoría
- Objetivos, alcance y criterios de la auditoría
- Personal clave contactado
- Miembros del equipo auditor
- Solicitudes de acciones correctivas emitidas
- Asistentes a las reuniones de apertura y cierre
- Conclusión
- Resumen de los principales puntos de la auditoría (análisis de las fortalezas del sistema y capacidad del sistema para lograr los objetivos de calidad definidos)
- Lista de distribución

ESTUDIO DE CASO

Antecedentes de la organización

Se trata de una entidad universitaria autónoma, cuyo objeto es la educación superior y la investigación. Su autonomía le permite autogobernarse, designar sus autoridades, manejar su propio presupuesto, lo que le da una amplia autonomía académica, administrativa y financiera.

La institución busca posicionarse tanto nacional como internacionalmente y mejorar sus procesos académicos y administrativos, además de consolidar su acreditación de alta calidad. Esta en-

tividad ha implementado un sistema integrado de calidad fundamentado, así: el sistema de gestión de calidad está sustentado en la Norma Internacional ISO 9001; el sistema de gestión ambiental, en la NTC ISO 14001 y lo estipulado en el Decreto 1076 de 2015, y el sistema de gestión de seguridad y salud en el trabajo, en la NTC OHSAS 18001 y lo estipulado en el Decreto 1072 de 2015.

En el proceso de implementación la institución definió 15 macro procesos (de direccionamiento estratégico, misionales, apoyo y evaluación y seguimiento), condensados en 31 procesos con sus correspondientes caracterizaciones y dueños de proceso; para ello cuenta con una división de calidad que revisa y planifica el sistema, asegurando su conveniencia, adecuación, eficacia, eficiencia y efectividad, y que siempre en busca de la mejora continua de la institución.

En cabeza de la división de calidad se designan y capacitan líderes de calidad, a fin de que se comprometan como auditores internos, junto con un recurso humano de un amplio nivel de apropiación, capacitación constante y los medios adecuados. Estos auditores hacen que se consolide un sistema integrado de calidad sólido y maduro en la organización.

Desarrollo de la auditoría interna

La organización universitaria emite el cronograma de auditorías para el primer semestre del año, con los correspondientes objetivos que se pretenden lograr para la vigencia. Este cronograma es dado a conocer a cada uno de los auditores involucrados en el proceso y a los dueños de proceso que van a ser auditados, con el fin de garantizar su realización, con un uso adecuado de recursos y el cumplimiento de los objetivos (ver figura 1).

Informado el auditor líder, este inicia la planeación de trabajo a realizar con su equipo. En la planeación se distribuyen actividades de tal forma que se tenga un conocimiento integral de la actividad operativa del proceso que van a auditar y se determinan cuáles procedimientos son relevantes de auditar y quién realiza cada uno, acorde a las competencias del equipo.

Por ejemplo, en la norma ISO 14001:2015, el auditor determina qué información documentada la organización debe tener, controlar y mantener (ver tabla 1).

**PROGRAMA ANUAL DE AUDITORÍAS INTERNAS INTEGRALES
AÑO 2018**

Actualizado a: Enero 10 de 2018

Objetivos de la auditoría:

1. Verificar el cumplimiento de los requisitos ISO 9001:2015 Sistema de Gestión de Calidad
2. Verificar el cumplimiento de los requisitos de la norma ISO 14001:2015 Sistema de Gestión Ambiental
3. Verificar el cumplimiento de los requisitos de la norma OHSAS 18001:2007 Sistema de Seguridad y Salud Ocupacional
4. Verificar en los procesos el adecuado análisis de causas y formulación de planes de acción.

No.	Código del Proceso	Proceso	Responsable del Proceso	Equipo Auditor 1. Líder (ISO 9001 y OHSAS 18001) 2. Líder (ISO 9001 y NTC GP 988) 3. Acompañante 4. Observador	FECHA DE AUDITORÍA					
					Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
1	FE-CE-CP-1	Direccionamiento Estratégico Incluye	Rector	1. JUAN CARLOS 2. AURORA 3. DIANA 4. CRISTINA						01 de junio de 2018
2	FE-PP-CP-1	Renovación Presupuestal	Jefe Oficina Asesora de Direccionamiento Estratégico e Inteligencia Competitiva	1. BEATRIZ 2. BEATRIZ 3. PATRICIA						09 de junio de 2018
4	FE-OT-CP-1	Gestión Estratégica TIC	Jefe de la Oficina Asesora de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones TIC	1. LEONARDO 2. JUAN 3. DANIEL				04 de abril de 2018		
3	FE-CE-CP-1	Comunicaciones Estratégicas	Jefe de la División de Comunicaciones, Publicaciones y Mercado	1. JULY 2. ARIANNA 3. JOHANNA 4. CLARA				24 de abril de 2018		
8	AR-AR-CP-1	Admisiones y Registro	Jefe División de Admisiones, Registro y Control Académico	1. MARIBEL 2. NATALIA 3. GLADYS LEONOR					16 de mayo de 2018	
9	AC-GA-CP-1	Gestión Académica Facultad de Ciencias Básicas y Aplicadas Departamento de Matemática Departamento de Física Departamento de Química	Decano Facultad	1. SAOGEREY 2. LUZ DARY 3. ALEXANDER 4. LERNA ANDREA		27 de febrero de 2018				
10		Gestión Académica Facultad de Medicina	Decano Facultad	1. CAMILO 2. CAMILO 3. MARITZA 4. JHON JAIRO		15 de marzo de 2018				
10		Gestión Académica Facultad de Ciencias Económicas	Decano Facultad	1. ARIANNA 2. JOSE 3. JUAN CARLOS				03 de abril de 2018		
GA-GH-CP-1	Gestión del Talento Humano	Jefe División de Talento Humano	1. CAROLINA 2. DIANA 3. DIANA 4. JAIRO						05 de junio de 2018	
GR-AR-CP-1	Administración de Recursos Educativos Bogotá	Jefe División Recursos Educativos	1. DANIEL 2. MARIA 3. PALOMA				24 de abril de 2018			
	Administración de Recursos Educativos	Jefe Sección de Recursos Educativos	1. JOSE 2. LEONARDO 3. CARLOS 4. DIEGO					31 de mayo de 2018		
GR-AB-CP-1	Administración de Biblioteca y Hemerooteca	Jefe División Recursos Educativos	1. MARIBEL 2. ARIANNA 3. DIESEL					16 de mayo de 2018		
GR-AB-CP-1	Administración de Biblioteca y Hemerooteca	Jefe Sección de Recursos Educativos	1. JAIRO RAFAEL 2. OLGA 3. FLORE				24 de abril de 2018			
GL-AA-CP-1	Apoyo a la Academia Incluye Departamentos de Estudios Interdisciplinarios y Departamento de Tecnología del Conocimiento	Jefe División de Laboratorios Sede Bogotá Director del Departamento de Estudios Interdisciplinarios Director de Departamento de Tecnologías del Conocimiento	1. JORNA 2. NATALIA 3. JONATHAN						09 de junio de 2018	
GL-AA-CP-1	Apoyo a la Academia Laboratorios	Jefe División Laboratorios	1. NUBIA 2. DIANA 3. ALEXANDRA					10 de mayo de 2018		

Figura 1. Programa de auditoria.

Tabla 1. Información documentada requerida en la NTC ISO 14001: 2015

Numeral	Información documentada requerida
4.3 Determinación del alcance del sistema de gestión ambiental	El alcance se debe mantener como información documentada y debe estar disponible para las partes interesadas.
5.2 Política ambiental	La política ambiental debe mantenerse como información documentada.
6.1 Acciones para abordar riesgos y oportunidades	La organización debe mantener la información documentada de riesgos y oportunidades que es necesario abordar y procesos necesarios (especificados en los apartados 6.1.1 al 6.1.4), en la medida necesaria para tener confianza de que se llevan a cabo de la manera planificada.
6.1.1 Generalidades	

Numeral	Información documentada requerida
6.1 Acciones para abordar riesgos y oportunidades 6.1.2 Aspectos ambientales	La organización debe mantener información documentada de: aspectos ambientales e impactos ambientales asociados; criterios usados para determinar sus aspectos ambientales significativos, y aspectos ambientales significativos.
6.1 Acciones para abordar riesgos y oportunidades 6.1.3 Requisitos legales y otros requisitos	La organización debe mantener información documentada de sus requisitos legales y otros requisitos.
6.2 Objetivos ambientales y planificación para lograrlos 6.2.1 Objetivos ambientales	La organización debe conservar información documentada sobre los objetivos ambientales.
7.2 Competencia	La organización debe conservar información documentada apropiada como evidencia de la competencia
7.4 Comunicación 7.4.1 Generalidades	La organización debe conservar información documentada como evidencia de sus comunicaciones, según corresponda.
7.5 Información documentada 7.5.1 Generalidades	El sistema de gestión ambiental de la organización debe incluir: a) información documentada requerida por esta norma Internacional y b) información documentada que la organización determina como necesaria para la eficacia del sistema de gestión ambiental.
8.1 Planificación y control operacional	La organización debe mantener la información documentada sobre la planificación y los controles operacionales, en la medida necesaria para tener la confianza en que los procesos se han llevado a cabo según lo planificado.
8.2 Preparación y respuesta ante emergencias	La organización debe mantener la información documentada sobre la preparación y la respuesta a emergencias, en la medida necesaria para tener confianza en que los procesos se llevan a cabo de la manera planificada.
9.1 Seguimiento, medición, análisis y evaluación 9.1.1 Generalidades	La organización debe conservar información documentada apropiada como evidencia de los resultados del seguimiento, la medición, el análisis y la evaluación del desempeño ambiental
9.1 Seguimiento, medición, análisis y evaluación 9.1.2 Evaluación del cumplimiento	La organización debe conservar información documentada como evidencia de los resultados de la evaluación del cumplimiento de sus requisitos legales y otros requisitos.
9.2 Auditoría interna 9.2.2 Programa de auditoría interna	La organización debe conservar información documentada como evidencia de la implementación del programa de auditoría y de los resultados de ésta.
9.3 Revisión por la dirección	La organización debe conservar información documentada como evidencia de los resultados de las revisiones por la dirección.
10.2 No conformidad y acción correctiva	La organización debe conservar información documentada como evidencia de: la naturaleza de las no conformidades (y cualquier acción tomada posteriormente), y los resultados de cualquier acción correctiva.

Fuente: NTC ISO 14001:2015.

Además, debe considerar que registros son obligatorios y debe disponer según la misma norma (ver tabla 2) de:

Tabla 2. Registros requeridos en la NTC ISO 14001: 2015

Numeral	Información documentada requerida
6.1 Acciones para abordar riesgos y oportunidades 6.1.1 Generalidades	La organización debe conservar información documentada sobre los objetivos ambientales.
7.2 Competencia	La organización debe conservar información documentada apropiada como evidencia de la competencia de las personas.
7.4 Comunicación 7.4.1 Generalidades	La organización debe conservar información documentada como evidencia de sus comunicaciones, según corresponda.
9.1 Seguimiento, medición, análisis y evaluación 9.1.1 Generalidades	La organización debe conservar información documentada apropiada como evidencia de los resultados del seguimiento, la medición, el análisis y la evaluación del desempeño ambiental.
9.1.2 Evaluación del cumplimiento	La organización debe conservar información documentada como evidencia de los resultados de la evaluación del cumplimiento de sus requisitos legales y otros requisitos.
9.2 Auditoría interna 9.2.2 Programa de auditoría interna	La organización debe conservar información documentada como evidencia de la implementación del programa de auditoría y de los resultados de esta.
9.3 Revisión por la dirección	La organización debe conservar información documentada como evidencia de los resultados de las revisiones por la dirección.
10.2 No Conformidad y acción correctiva	La organización debe conservar información documentada como evidencia de: la naturaleza de las no conformidades (y cualquier acción tomada posteriormente) y los resultados de cualquier acción correctiva.

Fuente: NTC-ISO 14001:2015.

Esta tarea es realizada con los miembros del equipo auditor, y dado que es una auditoría integral, deben considerar todos los requisitos que se presentan para las tres normas: ISO 9001:2015, *Sistema de gestión de calidad*, ISO 14001:2015, *Sistema de gestión ambiental*, y OHSAS 18001:2007, *Sistema de seguridad y salud ocupacional*.

El equipo auditor se informa sobre qué criterios legales adicionales están obligados a cumplir, como los decretos 1076 del 2015 y 1072 del 2015, entre otros, y verifica los requisitos internos que la organización ha implementado para el buen desarrollo de los procesos.

Toda esta información debe proceder esencialmente de dos partes: la solicitud formal que se le hace al dueño del proceso que se va a auditar (caracterización del proceso, procedimientos para el desarrollo de sus actividades, registros y evidencias de su ejecución) y al buen conocimiento y manejo que el auditor interno tiene de las diferentes normas y reglamentaciones que le competen a la organización.

Entendidos todos estos documentos e información, el auditor líder, apoyado por su equipo, realiza la descripción de las actividades y los detalles a acordar de la auditoría en un documento denominado plan de auditoría (ver tabla 3).

Tabla 3. Modelo de plan de auditoría

PLAN DE AUDITORIA	Fecha emisión: 2018/01/31	GC-ML-14
	Revisión n.º 1	Página 1 de 1
Macroproceso auditado: GESTIÓN DE RECURSOS EDUCATIVOS	Fecha de la auditoría: 03 de febrero de 2018	
Proceso auditado: Proceso de administración de biblioteca	Auditoría n.º 001-2018	
Responsable del proceso: Juan X.		
Objetivo de la auditoría:	Alcance de la auditoría: se aplicará a todo el proceso de la dependencia auditada, así como a todo el personal que interviene en el proceso de administración de biblioteca y hemeroteca.	
<ul style="list-style-type: none"> • Verificar el cumplimiento de los requisitos ISO 9001:2015, <i>Sistema de gestión de calidad</i>. • Verificar el cumplimiento de los requisitos de la norma ISO 14001:2015, <i>Sistema de gestión ambiental</i>. • Verificar el cumplimiento de los requisitos de la norma OHSAS18001:2007, <i>Sistema de seguridad y salud ocupacional</i>. • Verificar el análisis de causas de las acciones preventivas y correctivas generadas en los procesos • Verificar en los procesos el adecuado análisis de los datos, a fin de garantizar que contribuya a la toma de decisiones y a la mejora continua • Verificar la pertinencia de los otros mecanismos de seguimiento y medición. 		
Criterios de auditoría:	Recursos requeridos:	
<ul style="list-style-type: none"> • Requisitos legales (normograma) • ISO 9001:2015, <i>Sistema de gestión de calidad</i> • ISO 14001:2015, <i>Sistema de gestión ambiental</i> • OHSAS 18001:2007, <i>Sistema de seguridad y salud ocupacional</i>. • Criterios legales • Manuales, lineamientos y los demás referidos en el proceso 	<ul style="list-style-type: none"> • Recurso humano: disposición del personal para atender la auditoría • Físico • Infraestructura • Transporte para el traslado de sedes • Recursos tecnológicos • Formatos-registros • Documentación 	
PLAN DETALLADO DE LA AUDITORIA		
Fecha y Hora	Auditor	Actividades por desarrollar
02-03-2018 8:30 a. m. - 8:50 a. m.	Equipo Auditor	Apertura a la Auditoría Interna del proceso "Administración de biblioteca y hemeroteca".

02-03-2018 8:50 a. m. 01:00 p. m.	Auditora líder observador	<ol style="list-style-type: none"> 1. Entrevista con el dueño de proceso y funcionarios que participan en el proceso. 2. Verificación del cumplimiento de la norma ISO 9001:2015, <i>Sistema de gestión de la calidad</i>, a los procedimientos: <ul style="list-style-type: none"> • Procedimiento “Adquisición de material bibliográfico” • Procedimiento “Suscripción de revistas - hemeroteca-V4” 3. Numerales a auditar: <ul style="list-style-type: none"> • 5.2. Enfoque al cliente • 6.3. Infraestructura • 7.2. Procesos relacionados con el cliente • 8.2. Control de producto y/o servicio no conforme • 8.4. Análisis de datos • 8.5. Mejora
02-03-2018 8:50 a. m.-01:00 p. m.	Auditor líder acompañante	<p>Verificación del cumplimiento de la norma ISO 14001:2015, <i>Sistema de gestión ambiental</i>, y la norma OHSAS18001:2007, <i>Sistema de seguridad y salud ocupacional</i>:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Evidenciar conocimiento de la matriz de impactos y peligros en el proceso y el seguimiento a los mismos. 2. Evidenciar los controles operacionales aplicables al proceso frente a los peligros e impactos. 3. Evidenciar el cumplimiento legal asociados a los temas de seguridad y salud en el trabajo y ambiente. 4. Evidenciar el conocimiento para preparación y respuesta ante emergencias.
02-03-2018 01:00 p.m.-02:00 p. m.	Equipo auditor	Almuerzo
02-03-2018 02:00 p. m.-03:00 p. m.	Equipo auditor Auditor líder	Cierre preliminar de la auditoría interna
02-03-2018 3:00 p. m.-3:40 p. m.	Equipo auditor Auditor líder	Cierre de auditoría interna
Equipo auditor:		
<ul style="list-style-type: none"> • Líder (ISO 9001:2015) • Líder (ISO 14001:2015 y OHSAS 18001:2007) • Acompañante (ISO 14001:2015 y OHSAS 18001:2007; ISO 9001:2015) • Observador 		

Fuente: NTC-ISO 14001:2015, ISO 9001:2015 y OHSAS 18001:2007

Aceptado este plan de auditoría por las dos partes y hechas las modificaciones pertinentemente solicitadas, como actividad final del alistamiento a la auditoría se crea la lista de verificación. Si bien no la exige la norma ISO 19011:2018, la lista de verificación permite estructurar la auditoría, facilita la recopilación de la evidencia y ayuda a gestionar el tiempo y cubrir cada actividad.

Su contenido puede cambiar de acuerdo con: a) lineamientos proporcionados por las directivas frente a las auditorías programadas; b) relevancia de la información documentada; c) disponibilidad de los procedimientos y, en general, de todos los documentos auditados; d) autorizaciones, emisiones y controles de los documentos; e) adiestramiento, experticia y demás cualificaciones del personal que ejecuta trabajos en el área; f) comprensión de los procedimientos que se requieren aplicar en el desarrollo de las actividades del proceso; g) la efectiva y correcta implantación y empleo de los procedimientos; h) si es requerido, calibración y control de los equipos usados; i) manejo, almacenamiento y mantenimiento de la documentación, de tal forma que se asegure su recuperación; j) acciones correctivas desarrolladas a partir de auditorías anteriores; k) control de los indicadores, entre otras.

En el desarrollo de su contenido, los ítems de la verificación no pueden ser repetitivos y deben ser claros para el auditor líder, el equipo auditor y el auditado. La lista de verificación está compuesta por una serie de ítems o preguntas que evalúan desde lo cualitativo hasta lo cuantitativo, priorizando siempre su contenido y, de ser posible, en auditorías integrales, unificando criterios en puntos en donde las tres normas convergen (para evitar repetir temáticas). Al final, se condensan todos los hallazgos de la auditoría para realizar el informe de cierre (ver tabla 4).

Tabla 4. Modelo de una lista de verificación

NORMA	NUMERAL	FORMULACIÓN DE PREGUNTAS DE AUDITORÍA
9001:2015	5.1 Compromiso de la dirección 9001:2015	¿Cómo se evidencia el compromiso de la dirección para cumplir los objetivos del proceso?
9001:2015	5.5.3 Comunicación interna	¿Qué mecanismos maneja su proceso para la difusión de información dentro del mismo? ¿Cómo se lleva a cabo la comunicación entre la alta dirección y su proceso?
9001:2015	6.1 Provisión de los recursos	¿Cómo se proveen los recursos necesarios para la prestación del servicio?
9001:2015	6.2.2 Competencia, toma de conciencia y formación	¿Cómo y en dónde se encuentran definidas las competencias de los funcionarios de su proceso?
9001:2015	6.3 Infraestructura	¿Cómo se verifican las condiciones de trabajo en su proceso?
9001:2015	7.2.1 Determinación de los requisitos relacionados con el producto	¿Cómo se realiza el seguimiento a las solicitudes en concordancia con las necesidades del servicio?
9001:2015	7.2.3 Comunicación con el cliente	¿Cómo se evidencia el seguimiento a las quejas presentadas al proceso?
OHSAS 18001:2007	4.1 Requisitos generales	Verificar el cumplimiento de los requisitos de la norma OHSAS 18001:2007, sobre los requisitos de los sistemas de gestión en seguridad y salud ocupacional ¿Cómo se puede evidenciar la implementación y mejora continua de los requisitos exigidos con el fin de mantener la seguridad y salud en el trabajo de cada una de las personas que se encuentran vinculadas a los procesos del área?
OHSAS 18001:2007	4.2 Política S&SO	Conocen la política establecida por la universidad para cumplir con los requisitos de seguridad y salud en el trabajo

NORMA	NUMERAL	FORMULACIÓN DE PREGUNTAS DE AUDITORÍA
OHSAS 18001:2007	4.3.1 Identificación de peligros, evaluación del riesgo y determinación de controles	Revisar la efectividad del procedimiento en la que se observe la identificación de los peligros, la evaluación de los riesgos y el establecimiento de los controles en el proceso. ¿Cómo se realiza la identificación de los peligros, la evaluación del riesgo, la aplicación de controles necesarios para mantener la seguridad y salud en el trabajo y la socialización de los mismos frente al grupo de trabajo?
OHSAS 18001:2007	4.3.2 Requisitos legales y otros requisitos	Evidenciar la forma cómo se comunica las disposiciones concernientes a los requisitos legales y demás requisitos a las personas que integran los procesos.
OHSAS 18001:2007	4.3.3 Objetivos y programas	Establecer que los objetivos seguridad y salud del proceso se encuentren debidamente documentados. Verificar que se conocen y aplican los objetivos de seguridad y salud para la prevención de lesiones y enfermedad.
OHSAS 18001:2007	4.4.1 Recursos, roles, responsabilidad, funciones, autoridad y rendición de cuentas	¿Cómo se evidencia el compromiso de la alta dirección en el sentido de asegurar la disponibilidad de los recursos primordiales para mantener y mejorar la seguridad y salud en el trabajo de las personas vinculadas a cada uno de los procesos?
OHSAS 18001:2007	4.4.2 Competencia, formación y toma de conciencia	Verificar la formación y competencias de las personas que están involucradas directamente con el proceso de seguridad y salud en el trabajo. Evidenciar si existen solicitudes de capacitación o entrenamiento en seguridad y salud en el trabajo realizadas por el proceso para todos sus integrantes. Verificar el procedimiento establecido en el proceso para lograr que las personas vinculadas al proceso tomen conciencia sobre las consecuencias reales y potenciales de sus actividades y comportamientos en el trabajo
OHSAS 18001:2007	4.4.3.1 Comunicación, participación y consulta	Revisar si existe un procedimiento documentado para la divulgación interna entre los miembros de la división.
OHSAS 18001:2007	4.4.3.2 Comunicación, participación y consulta	Evidenciar si los miembros de la dependencia tienen conocimiento de los procesos de seguridad y salud en el trabajo y los medios de participación dentro del proceso.
OHSAS 18001:2007	4.4.5 Control de documentos	Evidenciar si existe un procedimiento o una forma para controlar los documentos pertenecientes a seguridad y salud en el trabajo.
OHSAS 18001:2007	4.4.6 Control operacional	Verificar qué controles se han implementado en el proceso para reducir el riesgo en la seguridad y salud en el trabajo.
OHSAS 18001:2007	4.5.1 Medición y monitoreo del desempeño	Verificar la aplicación de mediciones cuantitativas y cualitativas necesarias para monitorear el grado de cumplimiento de los objetivos, la efectividad de los controles establecidos, las acciones preventivas y correctivas tomadas y la eficiencia, eficacia y efectividad de las mediciones establecidas para el control de la seguridad y salud en el trabajo.
OHSAS 18001:2007	4.5.1 Medición y monitoreo del desempeño	Verificar la existencia de indicadores de gestión en cuanto a pertinencia, con el fin de garantizar que los resultados apunten a la eficacia, la eficiencia y la efectividad.

NORMA	NUMERAL	FORMULACIÓN DE PREGUNTAS DE AUDITORÍA
OHSAS 18001:2007	4.5.2 Evaluación del cumplimiento legal y otros	Evidenciar la existencia del registro de evaluaciones periódicas realizadas al interior de la dependencia, con el fin de evidenciar la efectividad de los controles que se han establecido y que garanticen la mejora continua de la seguridad y la salud en el trabajo
OHSAS 18001:2007	4.5.3.1 Evaluación del cumplimiento legal y otros	Evidenciar la existencia y conocimiento de los procedimientos establecidos para registrar, investigar y analizar cualquier incidente que se relacione con la seguridad y salud en el trabajo.
OHSAS 18001:2007	4.5.3.2 No conformidad, acción correctiva y acción preventiva	Verificar el procedimiento establecido para dar respuesta a las no conformidades actuales y potenciales y tomar acción preventiva y correctiva para mitigar sus consecuencias en la seguridad y salud en el trabajo. Verificar el desarrollo y seguimiento de las acciones preventivas y correctivas.
OHSAS 18001:2007	4.5.4 Control de registros	Verificar que exista un procedimiento para la identificación, archivo, protección, recuperación, retención y disposición de los registros relacionados con seguridad y salud en el trabajo.
OHSAS 18001:2007	4.5.5 Auditorías internas	Evidenciar la realización de seguimiento a los resultados de auditorías anteriores.
OHSAS 18001:2007	4.6 Revisión por las directivas	Verificar el seguimiento y cumplimiento de los compromisos adquiridos por el proceso en la última revisión por las directivas en lo relacionado con seguridad y salud en el trabajo
ISO 14001:2004	4.1 Requisitos generales	Verificar el cumplimiento de los requisitos de la norma ISO 14001:2004 sobre sistemas de gestión ambiental. ¿Cómo se puede evidenciar el aporte que hace el proceso a la mejora continua del sistema de gestión ambiental establecido por la organización?
ISO 14001:2004	4.2 Política ambiental	Verificar el conocimiento, comunicación y cumplimiento de la política ambiental establecida por la organización.
ISO 14001:2004	4.3.1 Aspectos ambientales	Verificar si existen procedimientos documentados para determinar aquellos aspectos que tienen o podrían tener impacto significativo sobre el medio ambiente
ISO 14001:2004	4.3.2 Requisitos legales y otros requisitos	Verificar el conocimiento y cumplimiento de los requisitos aplicables establecidos por la organización y las normas legales vigentes en materia medio ambiental.
ISO 14001:2004	4.3.3 Objetivos, metas y programas	Verificar el establecimiento y cumplimiento de objetivos y metas en el proceso, coherentes con la política ambiental de la organización.
ISO 14001:2004	4.4.1 Requisitos, funciones, responsabilidad y autoridad	¿Cómo se puede evidenciar que el proceso cuenta con los recursos y aporta al cumplimiento de la mejora continua del sistema de gestión ambiental establecido por la organización?
ISO 14001:2004	4.4.2 Competencia, formación y toma de conciencia	Verificar que se conozcan y controlen los aspectos ambientales significativos que afectan al proceso, y que se cuente con personal capacitado para la interpretación y aplicación de los controles ambientales necesarios para aportar a la mejora del sistema medioambiental establecido por la organización

NORMA	NUMERAL	FORMULACIÓN DE PREGUNTAS DE AUDITORÍA
ISO 14001:2004	4.4.3 Comunicación	Verificar que en todos los niveles del proceso se conozca, comunique y controle la política establecida por la organización para reducir riesgos al medio ambiente.
ISO 14001:2004	4.4.4 Documentación	Verificar que se encuentre claramente documentada la política, objetivos y metas ambientales del proceso, en coherencia con lo dispuesto por la organización y normas legales con respecto al ambiente
ISO 14001:2004	4.4.5 Control de documentos	Verificar que los documentos relacionados con el medioambiente se controlen adecuadamente.
ISO 14001:2004	4.4.6 Control de documentos	Verificar si existen procedimientos relacionados con aspectos ambientales significativos diferentes de los bienes y servicios utilizados por el proceso.
ISO 14001:2004	4.4.7 Preparación y respuesta ante emergencias	Verificar si existen procedimientos para identificar y responder a situaciones reales o potenciales de emergencia y posibles accidentes que puedan tener impacto en el medio ambiente.
ISO 14001:2004	4.5.1 Seguimiento y medición	¿Cómo se mide y se hace seguimiento a aquellas situaciones que puedan tener un impacto negativo en el medioambiente?
ISO 14001:2004	4.5.2.2 Evaluación del cumplimiento legal	¿Cómo se puede evidenciar que se realizan evaluaciones periódicas para garantizar y mantener la mejora continua del proceso, en aspectos relacionados con el cumplimiento de la normatividad relacionada con el medioambiente?
ISO 14001:2004	4.5.3 No conformidad, acción correctiva y acción preventiva	Verificar si existe seguimiento a no conformidades reales o potenciales relacionadas con el medioambiente y las acciones tomadas. Verificar si existen acciones preventivas para garantizar la mejora continua del proceso en lo relacionado con aspectos medioambientales.
ISO 14001:2004	4.5.4 Control de registros	¿Cómo se puede evidenciar el control de los registros para la identificación y protección de los requisitos del sistema medioambiental?
ISO 14001:2004	4.5.5 Control de registros	Verificar el seguimiento a los resultados de las dos últimas auditorías internas, en lo relacionado con el medioambiente.
ISO 14001:2004	4.6 Revisión por la dirección	Verificar si existen compromisos no cumplidos en relación con la revisión por las directivas en lo relacionado con el desempeño medioambiental del proceso

Fuente: NTC-ISO 14001:2015, ISO 9001:2015 y OHSAS 18001:2007

Con este documento de apoyo se realiza la auditoría. En la fecha señalada se inicia con las presentaciones pertinentes, el diligenciamiento del acta de apertura de auditoría y el auditor líder explica a las partes qué desarrollará, según lo concertado en el plan de auditoría. La auditoría comienza cuando ambas partes van comprobando el desempeño de los requisitos fijados en la lista de verificación, a través de la recolección de informaciones y su verificación a profundidad, para determinar si el proceso está siguiendo lo establecido por la organización y sus estándares, procedimientos y registros.

En esta fase, el equipo auditor entrevista a las personas que cumplen funciones específicas, haciendo preguntas y tomando nota de sus aportaciones y evidencias físicas. En caso de encontrarse

incumplimientos de los requisitos establecidos por la norma, por la ley o por lo establecido internamente en la organización, el auditor interno hace las anotaciones pertinentes y deja registrada la no conformidad. Si se da el caso en que el proceso auditado desarrolla sus actividades de acuerdo con lo estipulado en sus procedimientos, pero se evidencian algunas debilidades que son susceptibles de mejora, en este momento el equipo puede generar una observación.

Después de concluida la sesión de entrevistas y recolección de evidencias se da como ejecutada la auditoría, y es aquí donde comienza la reunión del equipo auditor. Se hace la revisión de cada uno de los hallazgos con sus evidencias encontrados en el proceso auditado, todo con el fin de unificar criterios y generar el informe final de auditoría, que será socializado en la reunión de cierre con los dueños del proceso. Algunas evidencias y hallazgos encontrados en el estudio de caso fueron:

Evidencia

El Ministerio de Educación ha realizado una visita e investigado la organización, debido a quejas interpuestas por estudiantes por la calidad de la educación. Como resultado de la investigación, el Ministerio concluyó que la institución no tiene dos registros de dos programas; adicionalmente, no cumple con las condiciones mínimas básicas para la extracción de gases y vapores en los laboratorios y no está manejando adecuadamente los residuos peligrosos generados. Como resultado, la organización ha implementado un plan de acción para solucionar estas situaciones, pero al cabo de seis meses no ha sido eficaz en su solución.

Hallazgos

No Conformidad

En la organización se evidencia que el plan de acción para solucionar los hallazgos provenientes de la visita del Ministerio de Educación no han sido eficaces en su resolución. Aquí se está incumpliendo los literales c y e del numeral 4.5.3 de la norma ISO 14001 y los literales c y e del numeral 4.5.3.2 de la norma OHSAS 18001, en cuanto a la toma de acciones apropiadas para prevenir su ocurrencia y garantizar su eficacia.

Evidencia

De acuerdo con lo evidenciado en las órdenes de servicio y pedido y en los contratos solicitados (adjunto descripción), se evidencia:

- Para las órdenes de investigación, la sección de seguridad, salud en el trabajo y ambiente no realiza la revisión y visto bueno de la solicitud, de acuerdo con lo establecido en el manual de gestión de proveedores y contratistas, teniendo en cuenta que son personas y/o empresas que comercializan sustancias peligrosas.
- No se evidencia envío de notificación a la sección de seguridad, salud en el trabajo y ambiente una vez se crea la orden o el contrato, con el fin de garantizar que se cumpla posteriormente lo que se describe en el manual de gestión de proveedores y contratistas.
- No se evidencia acta de terminación ni comunicación al supervisor, en la que se recuerde la elaboración de esta con el certificado de la OS 10 del 21 de enero de 2017.
- Para órdenes de pedido, estas se tramitan a través del almacén, por lo que el seguimiento a la evaluación del proveedor no se controla desde la División de Contratación y Adquisiciones.
- Para el contrato de Obra 02 de 2015 no se evidencian los soportes de la validación de la cláusula: “18° obligaciones del contratista, en su numeral 3”.
- Incumplimiento de las funciones del supervisor establecidas en la resolución 2780 de 2016.

Hallazgos*No Conformidad*

Lo anterior no es compatible con lo establecido en el numeral 4.4.6 de la norma OHSAS 18001:2007, ni con lo descrito en el *Manual de Gestión de Proveedores y Contratistas* vigente.

Evidencia

En la zona de parqueaderos se pudieron identificar manchas de aceite en diferentes partes. El encargado afirma que es inevitable esta situación, ya que no es responsabilidad el mantenimiento de los vehículos. Debido a esto no está contemplado como aspecto ambiental.

Hallazgos*No Conformidad*

No se evidencia la identificación del aspecto ambiental en la zona de parqueaderos, correspondiente a los derrames de aceite causado por los vehículos, incumpliendo con el literal a del numeral 4.3.1 de la norma ISO 14001:2007

Evidencia

En el proceso de contratación, durante la verificación del contrato 29, no se encontró la respuesta a dos comunicados de un proponente, solicitando la aclaración de dos aspectos de los pliegos de condiciones. Se revisó el libro de salida de correspondencia y en este sí aparece registrado el envío del comunicado aclaratorio del proponente.

Hallazgos*No Conformidad*

No se evidencia en el proceso de contratación el cumplimiento del numeral 4.2.4 de la norma ISO 9001:2008, *Control de registros*, debido a que no se encontró la respuesta física a dos comunicaciones solicitadas por el proponente, solicitando la aclaración de dos aspectos de los pliegos de condiciones del contrato 29, incumpliendo con el almacenamiento y la recuperación de los registros.

Ante estos hallazgos encontrados por los auditores, solo queda la realización del informe de auditoría y el cierre de la misma (ver tabla 5).

Tabla 5. Modelo de un informe de auditoría

INFORME DE AUDITORIA INTERNA	
FECHA: 05/03/2018	INFORME n.º 012
LUGAR: Organización Universitaria	
OBJETIVOS:	
<ul style="list-style-type: none"> • Verificar el cumplimiento de los requisitos ISO 9001:2015, <i>Sistema de gestión de calidad</i>. • Verificar el cumplimiento de los requisitos de la norma ISO 14001:2015, <i>Sistema de gestión ambiental</i>. • Verificar el cumplimiento de los requisitos de la norma OHSAS18001:2007, <i>Sistema de seguridad y salud ocupacional</i>. • Verificar el análisis de causas de las acciones preventivas y correctivas generadas en los procesos • Verificar en los procesos el adecuado análisis de los datos a fin de garantizar que contribuya a la toma de decisiones y a la mejora continua. • Verificar la pertinencia de los otros mecanismos de seguimiento y medición establecidos en los procesos. 	

ALCANCE:

Se aplicará a todo el proceso de la dependencia auditada, así como se aplicará a todo el personal que interviene en el proceso.

EQUIPO AUDITOR:

Auditor Líder: Pedro Zubieta N.

Equipo: Juan Xaver T.

Lucas Duero L.

PROCESOS AUDITADOS:

Servicios Generales

Contratación y financiera

Gestión de laboratorios

Mantenimiento

PERSONAL AUDITADO:

Jorge Fridole

Teresa Gustav

FORTALEZAS:

- A los auditores se les suministraron los recursos para el buen desarrollo de las actividades inherentes a la auditoría.
- Se hace reutilización de los equipos que aún pueden ser utilizados por parte de fundaciones de beneficencia.
- La alta dirección está comprometida con el Sistema Integrado de Gestión de Calidad.

NO CONFORMIDADES:

- En la organización se evidencia que el plan de acción para solucionar los hallazgos provenientes de la visita del Ministerio de Educación, al cabo de 6 meses, no han sido eficaces en su resolución, incumpliendo con los literales c y e del numeral 4.5.3 de la norma ISO 14001 y los literales c y e del numeral 4.5.3.2 de la norma OHSAS 18001, en cuanto a la toma de acciones apropiadas para prevenir su ocurrencia y garantizar su eficacia.
- No se evidencia la identificación del aspecto ambiental en la zona de parqueaderos, correspondiente a los derrames de aceite causado por los vehículos, incumpliendo con el literal a del numeral 4.3.1 de la norma ISO 14001: 2007
- No se evidencia en el proceso de contratación el cumplimiento del numeral 4.2.4 de la norma ISO 9001: 2008, *Control de registros*, debido a que no se encontró la respuesta física a dos comunicaciones solicitadas por el proponente, solicitando la aclaración de dos aspectos de los pliegos de condiciones del contrato 29, incumpliendo con el almacenamiento y la recuperación de los registros.

OBSERVACIONES: No aplica

FIRMAS

Auditor líder

Equipo auditor

Dueño del proceso

Experto técnico

Realizado este informe por parte del equipo auditor, se hace necesario presentarlo al proceso auditado, esto con el fin de que tengan una visión clara de los resultados. A esta reunión de cierre se presentan los dueños de proceso y los responsables de cada una de las dependencias, lo que garantiza que haya una correcta transmisión de la información allí condensada.

Es el momento en el que los líderes de proceso pueden solicitar aclaraciones o exclusiones si se evidencia que lo allí expuesto no es correcto o fue mal interpretado, para lo cual se verificará la evidencia. En la medida que exista claridad de los problemas detectados en cada proceso, los dueños de proceso y demás responsables convertirán estos hallazgos en acciones de mejora, tanto para el proceso como para la organización.

GLOSARIO

Cliente. Persona u organización que podría recibir o que recibe un producto o un servicio destinado a esa persona u organización o requerido por ella (ISO 9000:2015).

Documento. Información y el medio en el que está contenida (ISO 9000:2015).

Gestión. Actividades coordinadas para dirigir y controlar una organización (ISO 9000:2015).

Mejora continua. Actividad recurrente para mejorar el desempeño (ISO 9000:2015).

Procedimiento. Forma especificada de llevar a cabo una actividad o un proceso (ISO 9000:2015).

Producto. Salida de una organización que puede producirse sin que se lleve a cabo ninguna transacción entre la organización y el cliente (ISO 9000:2015).

Registro. Documento que presenta resultados obtenidos o proporciona evidencia de actividades realizadas (ISO 9000:2015).

Requisito. Necesidad o expectativa establecida, generalmente implícita u obligatoria (ISO 9000: 2015).

Sistema. Conjunto de elementos interrelacionados o que interactúan (ISO 9000:2015).

Organización. Persona o grupo de personas que tiene sus propias funciones con responsabilidades, autoridades y relaciones para lograr sus objetivos (ISO 9000:2015).

Proceso. Conjunto de actividades mutuamente relacionadas o que interactúan, que utilizan las entradas para proporcionar un resultado previsto (ISO 9000:2015).

No conformidad. Incumplimiento de un requisito (ISO 9000:2015).

Servicio. Salida de una organización con al menos una actividad, necesariamente llevada a cabo entre la organización y el cliente (ISO 9000:2015).

Evidencia objetiva. Datos que respaldan la existencia o veracidad de algo (ISO 9000:2015).

Verificación. Confirmación, mediante la aportación de evidencia objetiva de que se han cumplido los requisitos especificados. (ISO 9000:2015).

BIBLIOGRAFÍA

Arter, D. (2003). *Auditoras de calidad para mejorar la productividad*. Milwaukee, EE: UU.: ASQ Quality Press.

Álvarez, V., y Rivera, M. (2006). La auditoría como proceso de control: concepto y tipología. *Ciencias de la Información*, 37(2-3), 53-59.

Báez, L. (2013). Mejoramiento de la gestión pública con ISO 9001:2008, estudio de caso. *Scientia et Technica*, 18(1), 126-131.

Chávez, A., y Rodríguez, R. (2012). La auditoría interna como herramienta de gestión en las organizaciones públicas y privadas. *Ciencia y Tecnología*, 8(22), 163-168.

Dalmau, G. (2014). *Manual práctico para la implantación del estándar OHSAS 18001*. Madrid: Editorial Fremap.

- Fernández, A. (2003). *Sistemas integrados de gestión: calidad gestión medioambiental prevención de riesgos laborales*. Madrid: Instituto de Desarrollo Económico del Principado de Asturias.
- Fontalvo, T., y Vergara J. (2010). *La gestión de la calidad en los servicios ISO 9001: 2008*. Recuperado de <http://www.eumed.net/libros-gratis/2010e/823/index.htm>
- González, V. (2011). Sistemas integrados de gestión, un reto para las pequeñas y medianas empresas. *Escenarios*, 9(1), 69-89.
- Mancera, G. (2013). Mejoramiento de la gestión pública con ISO 9001: 2008, estudio de caso. *Scientia et Technica*, 18(1), 126-131.
- Mesada, A. (1988). *Gestión de la calidad. Series productiva*. Barcelona, España: Editorial Marcombo.
- Moreno, G., García, L., y Torre, T. (2013). Análisis de los riesgos en la toma de decisiones de la alta dirección a través de la auditoría de gestión. *Global Conference on Business and Finance Proceedings*, 8(1), 955-963.
- Proceso de auditoría. Cartilla para auditores. (s. f.). Recuperado de <http://www.pascualbravo.edu.co/pdf/calidad/procesoauditoria.pdf>
- Icontec. (2007). *Norma Técnica Colombiana NTC-OHSAS 18001:2007. Sistemas de gestión en seguridad y salud ocupacional: requisitos*. Bogotá: Icontec.
- Icontec. (2015a). *Norma Técnica Colombiana ISO 9000:2015. Sistemas de gestión de la calidad: fundamentos y vocabulario*. Bogotá: Icontec.
- Icontec. (2015b). *Norma Técnica Colombiana ISO 9001: 2015. Sistemas de gestión de calidad: requisitos*. Bogotá: Icontec.
- Icontec. (2015c). *Norma Técnica Colombiana ISO 14001: 2015. Sistemas de gestión ambiental: requisitos*. Bogotá: Icontec.
- International Organization for Standardization. (s. f.). About ISO. Recuperado de <https://www.iso.org/about-us.html>
- Senlle, A., y Stoll, G. (1995). *Calidad total y normalización: ISO 9000. Las normas para la calidad en la práctica* (2ª edición). Barcelona: Editorial Gestión 2000.
- Sevilla, T. (2012). *Auditoría de los sistemas integrados de gestión*. Madrid: Editorial Fundación Confemetal.
- Yáñez, J., y Yáñez, R. (2012). Auditorías, mejora continua y normas ISO: factores clave para la evolución de las organizaciones. *Ingeniería Industrial. Actualidad y Nuevas Tendencias*, 3(9), 83-92.

PAUTAS PARA LA PRESENTACIÓN DE ARTÍCULOS

Revista de Investigación es una publicación arbitrada, de carácter académica científico con periodicidad semestral, editada por la Dirección de Investigaciones de la Fundación Universidad de América (Bogotá- Colombia). Su objetivo es difundir los resultados de investigaciones científicas y tecnológicas sobre temáticas asociadas específicamente con ingeniería. La revista está dirigida a investigadores, docentes, estudiantes, empresarios y profesionales que estén interesados en conocer los resultados de investigaciones recientes en el área de las ingenierías.

TIPOLOGÍA DE ARTÍCULOS ACEPTADOS

La *Revista de Investigación* privilegia la publicación de artículos resultado de investigación científica y tecnológica, artículos de reflexión, artículos de revisión y reporte de casos, que se caractericen por su rigurosa metodología investigativa con aportes significativos al área de las ingenierías.

FORMATO DE PRESENTACIÓN DE LOS ARTÍCULOS

Los artículos remitidos a la revista deben ser trabajos inéditos escritos en español. Se presentan en Microsoft Word y deben seguir las siguientes indicaciones:

- Tamaño carta, espacio y medio, una columna, márgenes simétricas de 2.5 cm en los cuatro lados y letra Arial tamaño 12.
- Extensión máxima de 20 páginas.
- El párrafo debe ir con interlienado a espacio y medio (1.5) y tener una sangría de 5 caracteres. Sin espacio entre párrafos.
- El material gráfico debe presentarse en formato TIF o PDF (editable) con una resolución mínima de 300ppi. En el caso de que los autores usen fotografías y/o imágenes extraídas de otros trabajos, deben tramitar y remitir los respectivos permisos de uso y publicación. Las figuras y tablas deben presentarse de acuerdo a la sexta edición de Manual de Publicaciones de la American Psychological Association (APA).

ESTRUCTURA DEL ARTÍCULO

Título

Debe ser conciso, claro, corresponder estrictamente a lo que se presenta en el artículo, de máximo doce palabras y escrito en español (con su correspondiente traducción al inglés).

Información sobre autores

Indicar el nombre y apellidos completos del autor o autores, en el orden en que se desea que aparezcan. Adicionalmente, en un párrafo se debe incluir la información sobre el autor, formación académica y afiliación institucional actual.

Resumen

Escrito en español, no debe exceder las 120 palabras, sin sangría y debe reflejar la estructura del artículo. La estructura del resumen tiene que exponer de forma abreviada los objetivos de la investigación, la metodología, los principales resultados y conclusiones. Debe incluirse el resumen en inglés.

Palabras clave

Cinco palabras en español adecuadas para la clasificación temática del artículo, ordenadas alfabéticamente y cuyo origen sea un diccionario de Tesoros. Debe incluirse la versión en inglés de estas palabras.

Texto principal

Debe cumplir de forma obligatoria con los aspectos enunciados a continuación:

Estructura de artículos de investigación científica y tecnológica

1. Introducción
2. Metodología
3. Resultados
4. Conclusiones
5. Referencias bibliográficas
6. Puede incluir una sección adicional para agradecimientos

Estructura artículos de revisión

1. Introducción
2. Metodología
3. Desarrollo del tema
4. Resultados
5. Conclusiones
6. Referencias bibliográficas

Introducción

En esta sección el autor da una visión resumida y concisa del problema objeto de la investigación, el alcance del problema y de los trabajos previos e investigaciones que se han realizado sobre el tema.

Metodología

Aquí se describe detalladamente cada uno de los procedimientos empleados que condujeron la investigación.

Resultados

Exposición breve y concisa los resultados obtenidos. En esta sección se incluyen las tablas, gráficas y figuras que, por sí solas, expresen los resultados.

Conclusiones

Síntesis de la interpretación e implicaciones de los resultados.

Referencias

El estilo de citación y referencia adoptado por *Revista de Investigación* es APA (sexta edición). El sistema de citación del artículo no debe usar notas de pie de página para referencias bibliográficas (los pie se utilizan únicamente para aclarar o ampliar conceptos). Las citas literales deben ir entre comillas; si exceden las 40 palabras, se presentan endentadas y aparte. Para ampliar la información sobre citación remitirse a las normas APA (sexta edición en inglés y tercera edición en español).

ENVÍO DE ARTÍCULOS

El artículo debe remitirse junto a una carta de presentación dirigida al Comité Editorial de la revista, en la que el autor declare que el contenido del artículo es original e inédito y no ha sido publicado en otra revista científica, ni ha sido ni será enviado a otra revista para su publicación mientras dure el proceso de evaluación y aceptación en la revista (ver Formato carta de presentación de artículos).

Los autores deben remitir sus documentos a través de la plataforma OJS ingresando al Portal de Revistas de la Fundación Universidad de América <https://revistas.uamerica.edu.co/>

La revista es de acceso abierto, no cobra cargos de procesamientos y edición de artículos.

PROCESO DE REVISIÓN POR PARES

Los artículos serán recibidos hasta la fecha máxima establecida en cada convocatoria y serán sometidos al siguiente proceso:

Antes de iniciar el proceso de asignación de pares, el editor realizará una evaluación previa de los artículos recibidos para verificar que el artículo cumpla con los criterios establecidos en las pautas de presentación de artículos de la revista, así como para verificar la originalidad a través de software especializado. En caso de encontrar similitudes que revelen que el trabajo ya fue publicado o tiene problemas en la citación de fuentes, se le informará al autor de contacto y solicitará revisar el artículo. Esta revisión se realiza en un plazo máximo de tres semanas.

Para los artículos que no cumplan con los estándares de presentación, el editor solicitará a los autores que realicen modificaciones al artículo antes de ser sometido a la evaluación de los pares. Para tal fin, los autores tendrán un máximo de quince días para adaptar el artículo al formato definido por la revista en las pautas de presentación y enviarlo al editor nuevamente para su consideración. Una vez el editor verifique el cumplimiento de estos criterios, los artículos podrán iniciar el proceso de evaluación de pares.

La decisión de continuar o no con el proceso de evaluación se comunicará a los autores en un plazo no mayor a cuatro semanas.

Los artículos que cumplieron con los criterios definidos en este primer filtro serán sometidos a la evaluación de dos pares anónimos expertos en la temática, es decir, los autores no conocen la identidad de los evaluadores, y viceversa (evaluación doblemente ciega).

El editor, con el apoyo de los miembros del Comité Editorial y Científico, asigna los pares evaluadores de acuerdo con la temática específica de cada artículo. Posteriormente, el editor envía la invitación a los evaluadores y una vez aceptada la participación de los pares evaluadores se les envía el artículo y el formato de evaluación. En esta solicitud se le notifica que el plazo establecido para dicha revisión es de aproximadamente tres semanas a partir de la fecha de aceptación. Sin embargo, los tiempos de revisión dependen de su disponibilidad.

En cuanto al concepto, los pares evaluadores deben diligenciar el formato de evaluación, en el que se recomienda al editor lo publicación o no del artículo. El resultado del proceso de evaluación será el insumo que utilizará el editor y Comité Editorial para decidir si el artículo es: publicable, publicable con ajustes mínimos, publicable con ajustes significativos y no publicable.

En caso de recibir un concepto favorable y uno desfavorable, el artículo será enviado a evaluación de un tercer par evaluador.

Una vez se dispone de la evaluación de pares, el editor le comunica al autor principal la decisión, indicando si el artículo continuará o no en el proceso o si requiere ajustes. El autor tiene un plazo máximo de cuatro semanas para ajustar el artículo y enviarlo nuevamente a la revista. Posteriormente, el editor revisa el artículo y toma la última decisión acerca de la aceptación de la versión corregida, considerando el concepto de los evaluadores y las correcciones efectuadas por los autores.

Sí el artículo es aceptado para publicación, se procederá a realizar el proceso de revisión de estilo; una vez se cuente con la versión final del artículo, esta será enviada al autor para su aprobación antes de iniciar el proceso de diagramación de la revista.

CRITERIOS PARA LA EVALUACIÓN DE ARTÍCULOS

El Comité Editorial decidirá sobre la publicación de los artículos recibidos, teniendo en cuenta los siguientes criterios de evaluación: cumplimiento de las condiciones de presentación, rigor conceptual y metodológico, originalidad, pertinencia y calidad científica.

CESIÓN DE DERECHOS Y DIFUSIÓN DEL MATERIAL PUBLICADO

Los autores deben firmar la carta de cesión de derechos antes de la publicación del artículo; esta carta autoriza al equipo editorial de *Revista de Investigación* para difundirlo por los medios que se consideren pertinentes, ya sean impresos o electrónicos. Para tal efecto, los autores deben enviar la carta de cesión de derechos debidamente diligenciada y firmada a través de la plataforma OJS ingresando al Portal de Revistas de la Fundación Universidad de América <https://revistas.uamerica.edu.co/>

LICENCIA CREATIVE COMMONS

Revista de Investigación usa de la licencia Creative Commons de Atribución –No comercial– Sin Derivar 4.0; de tal forma que los textos publicados en la revista son de libre distribución y publicación, siempre que sea reconocida la autoría y el texto no sea modificado.

POLÍTICA DE ACCESO ABIERTO

Revista de Investigación es una publicación de libre acceso y los archivos de los artículos se pueden descargar por medio de la plataforma Open Journal System (OJS) en formato PDF. No tiene ningún costo para autores y lectores.

DECLARACIÓN ÉTICA Y DE BUENAS PRÁCTICAS EDITORIALES

El equipo editorial de *Revista de Investigación*, comprometido con la comunidad científica, garantiza la ética y calidad de los artículos publicados. Las prácticas editoriales de la revista tienen como referente el código de conducta y buenas prácticas que el Comité de Ética en Publicaciones (COPE) define para editores de revistas científicas, así como por los estándares éticos y editoriales establecidos en la sexta edición de *Manual de Publicaciones de la American Psychological Association* (APA).

Todas las partes implicadas en la publicación de la *Revista de Investigación* (editor, comités, autores y pares evaluadores) deben aceptar y respetar los principios éticos expresados en el presente documento.

Ediciones Universidad de América
Revista de Investigación
Dirección de Investigaciones
Av. Circunvalar No. 20-53 Bogotá, Colombia
PBX: (+571) 3376680
revista@uamerica.edu.co
www.uamerica.edu.co

GUIDELINES FOR THE PRESENTATION OF ARTICLES

The Revista de Investigación is a peer-reviewed journal of scientific-academic nature published every six months, edited by the Research Department of the Fundación Universidad de América (Bogotá-Colombia). Its objective is to disseminate the results of scientific and technological research on topics specifically associated with engineering.

The journal aims at researchers, teachers, students, entrepreneurs and professionals interested in knowing the results of recent research in the engineering area.

TPOLOGY OF ARTICLES ACCEPTED

The Revista de Investigación privileges the publication of articles resulting from scientific and technological research, articles on reflection, review articles and case reports, which can be characterized by their rigorous research methodology with significant contributions to the engineering area.

THE FORMAT FOR THE PRESENTATION OF ARTICLES

The articles sent to the journal must be unpublished works written in Spanish. The articles are presented in Microsoft Word and should follow the following indications:

- A4 or letter size, 1.5 spacing, one column, symmetrical margins of 2.5 cm on all four sides using 12 points Arial fonts.
- Maximum 20 pages.
- The paragraph must have 1.5 line spacing and have a 5-character tab spacing. No space between paragraphs.
- The graphic material must be in TIF or PDF (editable) format with a minimum resolution of 300ppi. In case the authors use photographs and/or images taken from other works, they must process and remit the respective permissions for their use and publication. The figures and tables should be according to the sixth edition of the Publications Manual of the American Psychological Association (APA).

STRUCTURE OF THE ARTICLE

Title

It must be concise, clear, strictly correspond to what it represents in the article, of a maximum of twelve words and written in Spanish (with its corresponding English translation).

Information about authors

Indicate full name and surnames of the author or authors, in the order in which they wish to appear. Also, in a paragraph, should include information about the author, academic background and current institutional affiliation.

Summary

Spanish written, should not exceed 120 words, no tab spacing and should reflect the structure of the article. The structure of the summary must briefly state the objectives of the research, the methodology, the main results, and conclusions. Must include an abstract in English.

Keywords

Five words in Spanish suitable for the thematic classification of the article, arranged alphabetically and whose origin is a Thesaurus dictionary. Must include the English version of these words.

Main Text

Must meet on a mandatory basis with the aspects set forth below:

Structure of scientific and technological research articles

1. Introduction
2. Methodology
3. Results
4. Conclusions
5. Bibliographic references
6. Can include an additional section for acknowledgments

Review articles structure

1. Introduction
2. Methodology
3. Development of the topic
4. Results
5. Conclusions
6. Bibliographic references

Introduction

In this section, the author provides a summary and concise view of the problem object of the investigation, the scope of the problem and the previous work and research done on the subject.

Methodology

Here, describes in detail each of the procedures used to conduct the investigation.

Results

Short and concise presentation of the results obtained. This section includes tables, graphs, and figures that, by themselves, express the results.

Conclusions

Synthesis of the interpretation and implications of the results.

References

APA (sixth edition) is the style of citation and reference adopted by the Revista de Investigación. The quotation system of the article should not use footnotes for bibliographic references (footers are used only to clarify or expand concepts). Must enclose literal quotes in quotation marks; if they exceed 40 words and presented indented and separate. For more information on citation, refer to the APA standards (sixth edition in English and third edition in Spanish).

SUBMISSION OF ARTICLES

The article must be submitted together with a cover letter addressed to the Editorial Committee of the journal, in which the author declares that the content of the article is original and unpublished and has not been published in another scientific journal, nor has it been or will be submitted to another journal for publication during the evaluation and acceptance process in the journal (Letter of presentation of articles format).

Authors should submit their documents through the OJS platform entering the Portal de Revistas of the Fundación Universidad de América <https://revistas.uamerica.edu.co/>

The journal is open access, does not charge processing fees and article editing.

PEER REVIEW PROCESS

Peers will receive the articles until the maximum date established in each call and submitted to the following process:

Before starting the process of peer assignment, the editor will perform a prior evaluation of the articles received to verify that the article complies with the criteria established in the guidelines for the presentation of articles of the journal, as well as to verify the originality through specialized software. In case of finding similarities that reveal that the work was already published or has problems in the citation of sources, the author of the contact will be informed and asked to review the article. It performs this review within a maximum period of three weeks.

For articles that do not comply with the presentation standards, the editor will ask the authors to make modifications to the article before its submission to the peer evaluation. For this purpose, the authors will have a maximum extension of fifteen days to adapt the article to the format defined by the journal in the presentation guidelines and send it to the editor again for its consideration. Once the editor verifies compliance with these criteria, the articles may initiate the peer evaluation process.

The decision whether or not to continue with the evaluation process will be communicated to the authors within no more than four weeks.

The articles that met the criteria defined in this first filter will be submitted to the evaluation of two anonymous expert peers in the subject, meaning that, the authors do not know the identity of the evaluators, and vice versa (dually blind evaluation).

The editor, with the support of the members of the Editorial and Scientific Committee, assigns the peer reviewers according to the specific theme of each article. Then, the editor sends the invitation to the evaluators and once accepted the participation of the peer reviewers, send them the article and the evaluation format. In this application, it notifies that the deadline for such review is approximately three weeks from the date of acceptance. However, the review times depend on its availability.

Regarding the concept, Peer Reviewers must complete the evaluation format, in which the editor received the recommendation whether publish or not the article. The result of the evaluation process will be the input that the editor and Editorial Committee will use to decide if the article

is: publishable, publishable with minimum adjustments, publishable with significant adjustments and not publishable.

In case of receiving a favorable and an unfavorable concept, the article will be sent for evaluation by a third evaluating pair.

Once the peer evaluation is available, the editor communicates the decision to the main author, indicating whether the article will continue or not in the process, or if it requires adjustments. The author has four weeks to adjust the article and send it back to the journal. Subsequently, the editor reviews the article and makes the final decision about the acceptance of the corrected version, considering the concept of the evaluators and the corrections made by the authors.

If the article has the approval for publication, the style review process will proceed; Once the final version of the article is available, it will be sent to the author for approval before beginning the process of diagramming the journal.

CRITERIA FOR THE EVALUATION OF ARTICLES

The Editorial Committee will decide on the publication of the articles received, considering the following evaluation criteria: compliance with the conditions of presentation, conceptual and methodological rigor, originality, relevance and scientific quality.

TRANSFER OF RIGHTS AND DISSEMINATION OF PUBLISHED MATERIAL

The authors must sign the transfer of rights before the publication of the article; This letter authorizes the editorial team of the Revista de Investigación to disseminate it through the media considered relevant, whether printed or electronic. For this purpose, the authors should send the letter of assignment of rights duly completed and signed through the OJS platform by entering the Portal de Revistas of the Fundación Universidad de América <https://revistas.uamerica.edu.co/>

CREATIVE COMMONS LICENSE

The Revista de Investigación uses the Creative Commons Attribution -Non -Commercial - No Derivate 4.0 license; in such a way that the texts of the journal are freely distributed and published, if the authorship is recognized, and the text is not modified.

OPEN ACCESS POLICY

The Revista de Investigación is an open-access publication and can download the files of the articles through the Open Journal System (OJS) platform in PDF format. It has no cost for authors and readers.

ETHICAL DECLARATION AND GOOD EDITORIAL PRACTICES

The editorial team of the Revista de Investigación, committed to the scientific community, guarantees the ethics and quality of the articles published. The editorial practices of the journal have its basis on the code of conduct and good practices that the Committee on Publication Ethics (COPE) defines for editors of scientific journals, as well as the ethical and editorial standards established in the sixth edition of the Publications Manual from the American Psychological Association (APA).

All parties involved in the publication of the Revista de Investigación (editor, committees, authors and peer reviewers) must accept and respect the ethical principles expressed in this document.

AGRADECIMIENTOS A PARES EVALUADORES

El comité editorial agradece a los siguientes pares evaluadores por sus valiosos aportes, comentarios y por el tiempo dedicado a revisar los manuscritos sometidos a Revista de Investigación vol. 11 n° 2, julio-diciembre de 2018:

JAIME LEONARDO BARBOSA PÉREZ
Universidad EAFIT, Colombia

NUBIA LILIANA BECERRA OSPINA
Fundación Universidad de América, Colombia

LUIS HUMBERTO CANTILLO SILVA
Fundación Universidad de América, Colombia

NILTON CHUCOS BAQUERIZO
Universidad Nacional Agraria de la Selva, Perú

MIGUEL ÁNGEL DÍAZ RODRÍGUEZ
Universidad de los Andes, Venezuela

WILLIAM JAVIER ESPITIA ABRIL
Fundación Universidad de América, Colombia

JOSÉ INÁCIO FERRÃO DE PAIVA MARTINS
Universidad de Porto, Portugal

MARÍA VALENTINA FUENTES HERNÁNDEZ
Universidad de Oriente, Venezuela

DIANA MARÍA GRANDA RESTREPO
Universidad de Antioquia, Colombia

DIANA CAROLINA MARTÍNEZ TORRES
Fundación Universitaria Colombo Internacional – UNICOLOMBO, Colombia

SANDRA MESA ESPITIA
Fundación Universidad de América, Colombia

WALTER NÚÑEZ GARCÍA
Oxy Colombia

DIANA INÉS PARAVIE
Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Argentina

JORGE EMILIO PARRA AMIN
Universidad Militar Nueva Granada, Colombia

JORGE LUIS RAMOS RAMOS
Fundación Universidad de América, Colombia

ANGIE TATIANA ROBAYO MEDINA
Universidad Nacional de Colombia, Colombia

CARLOS ALBERTO SEVERICHE SIERRA
Corporación Universitaria Minuto de Dios – UNIMINUTO. Barranquilla, Colombia

OSCAR JAVIER SUÁREZ GARCÍA
Universidad Nacional de Colombia, Colombia

RANNOVERG YANAC MONTESINO
Universidad Nacional Agraria de la Selva, Perú