

MUTIS

REVISTA ELECTRÓNICA EDITADA POR LA
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES E INGENIERÍA



MUTIS, Journal of the Faculty of Sciences and Engineering, Jorge Tadeo Lozano University, is licensed under the Creative Commons 4.0: Attribution - Noncommercial - No Derivative Works



UNIVERSIDAD DE BOGOTÁ JORGE TADEO LOZANO
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES E INGENIERÍA

MUTIS

Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano
Dirección de Publicaciones
Carrera 4 N° 23-76 Módulo 29
Piso 2, Bogotá D. C., Colombia
Tel: (571) 242 7030 Exts. 1880-3132

ISSN: 2256-1498
DOI: <http://dx.doi.org/10.21789/issn.2256-1498>
revista.mutis@utadeo.edu.co

Rectora
CECILIA MARÍA VÉLEZ WHITE

Vicerrectora Académica
MARGARITA MARÍA PEÑA BORRERO

Vicerrectora Administrativa
NOHEMY ARIAS OTERO

Director de Investigación, Creación y Extensión
LEONARDO PINEDA SERNA

Decano de la Facultad de Ciencias Naturales
e Ingeniería
ISAAC DYNER REZONZEW

Director de Publicaciones
ANDRÉS FELIPE ECHAVARRÍA

Coordinador Editorial
JUAN CARLOS GARCÍA SÁENZ

Director de Arte y Diseño
LUIS CARLOS CELIS CALDERÓN

Diagramación
MARY LIDIA MOLINA BERNAL



MUTIS, Journal of the Faculty of Sciences and Engineering, Jorge Tadeo Lozano University, is licensed under the Creative Commons 4.0: Attribution - Noncommercial - No Derivative Works

Mutis es una publicación electrónica semestral de ciencia e investigación editada por la Facultad de Ciencias Naturales e Ingeniería de la Universidad. Los artículos publicados son responsabilidad de sus autores y no comprometen la posición editorial de *Mutis*.

Editores

JAVIER HERNÁNDEZ FERNÁNDEZ
Ciencias Naturales
CÉSAR ORLANDO DÍAZ BENITO
Ingeniería

Comité Editorial

ISAAC DYNER REZONZEW
Universidad Jorge Tadeo Lozano
MICHAEL J. AHRENS
Universidad Jorge Tadeo Lozano
LEONARDO MARIÑO RAMÍREZ
NCBI - National Center for Biotechnology Information,
Bethesda MD, EE. UU.
MYRON SPECTOR
Harvard University, EE. UU.

Comité Científico

MÓNICA PUYANA HEGEDUS
Universidad Jorge Tadeo Lozano
ANDRÉS FELIPE SUÁREZ ESCOBAR
Universidad Jorge Tadeo Lozano
JOSÉ HERNEY RAMÍREZ
Universidad Nacional de Colombia
ALBA GRACIELA ÁVILA
Universidad de los Andes
ANDRÉS FELIPE LÓPEZ
Universidad Libre
SILVIO ALEJANDRO LÓPEZ PASOS
Colegio Mayor de Cundinamarca

Actualmente el contenido esta indexado e incluido en: Pubindex – Categoría C, EBSCO, Latindex, DOAJ, CENGAGE learning, Base, ResearchGate, Google Scholar

CONTENIDO

Vol 6 N° 1, enero-junio 2016

Editorial

César Orlando Díaz Benito

Editor

4

ARTÍCULOS DE INVESTIGACIÓN – RESEARCH ARTICLES

Establecimiento *in vitro* de protocormos de *Prosthechea* sp. bajo diferentes concentraciones de ácido naftalenacético.

In vitro establishment of *Prosthechea* sp. protocorms under different concentrations of naphthalene acetic acid.

Arlette Ivonne Gil Clavijo, Diego Fernando Contreras Pico y Luis Carlos Gutiérrez Rojas

6

Modelación espacial de la calidad del agua en el río Tapartó, municipio de Andes, Antioquia, Colombia

Spatial modelling of the water quality on the Tapartó river, Andes municipality, Antioquia, Colombia

Julián Andrés Ruiz Toro, Fabio de Jesús Vélez Macias, Orlando Caicedo Quintero y Néstor Jaime Aguirre Ramírez

16

ARTÍCULOS DE REVISIÓN – REVIEW ARTICLES

Alimentos funcionales, alfalfa y fitoestrógenos.

Functionals foods, alfalfa and phytoestrogens.

Alejandro de Jesús Cortés-Sánchez, José Rubén León-Sánchez, Francisco Javier Jiménez-González, Mayra Díaz-Ramírez, Adriana Villanueva-Carvajal y Cynthia A. Guzmán-Medina

28

Mezclas gasolina-etanol en motores de combustión interna en Colombia.

Gasoline-ethanol blends in internal combustion engines in Colombia.

Juan Mantilla, Carlos Galeano y Alejandro Muñoz

41

Revisión de los métodos estadísticos multivariados usados en el análisis de calidad de aguas.

A review of multivariate statistical methods for analysing water quality.

Ingry Natalia Gómez Miranda y Gustavo Antonio Peñuela Mesa

54

INNOVACIÓN EDUCATIVA – EDUCATIONAL INNOVATION

El juego de rol: aportes de la educación universitaria a la cultura de la paz.

Role-play: higher education contributions to peace culture

Liliam Palomeque-Forero

64

Instrucciones para autor

73

Comité evaluador

76

EDITORIAL

Computación de alto desempeño para Ciencias biológicas

En 2006, con el liderazgo académico, Colombia le apostó a nuevas oportunidades para su desarrollo en computación de alto desempeño. Junto con el Dr. Jorge Zuluaga de la Universidad de Antioquia y el ingeniero Álvaro Ospina de la Universidad Pontificia Bolivariana de Medellín, presentamos la primera iniciativa en Colombia para formar una infraestructura de computación en malla entre varias universidades utilizando la Red Nacional de Tecnología Avanzada RENATA. Luego de socializar este trabajo entre varias instituciones de educación superior, se concretó una Fuerza de Trabajo para formar la iniciativa de Grid Nacional, *Grid Colombia*. Esta se basó en aquellas iniciativas que estaban en pleno surgimiento en diferentes países y su objetivo principal era formar una comunidad con los investigadores en el área de computación de alto desempeño.

Grid Colombia, se creó con la finalidad de reunir esfuerzos provenientes de todo el país que conformarían una infraestructura disponible en donde el investigador pudiera utilizar los recursos de cómputo disponibles, para procesar trabajos en las diferentes áreas de investigación primordiales para el país, una de ellas es la Biología Computacional. La iniciativa de formar una infraestructura en malla a nivel nacional no era fácil, el acceso a los recursos que cada institución colocaría a disposición de *Grid Colombia* involucraría un software de administración muy pesado, y peor aún, una posible brecha de seguridad dentro de cada intranet. Las dificultades fueron superadas y con el apoyo de RENATA logramos conformar la comunidad *Grid Colombia* en el año 2009 mediante un proyecto presentado a Colciencias por 11 universidades colombianas.

Adicionalmente, en el año 2007, nace la idea de un centro de Bioinformática y Biología computacional en Colombia llamado BIOS. Tomado como conclusión de la visita a Colombia de Bill Gates, que apuntara a aprovechar la mega diversidad colombiana e impulsara su gran potencial en los campos de la Bioinformática y la Biología Computacional¹ que en el año 2012 empieza actividades en la ciudad de Manizales, centro de la región cafetera, debido a su gran biodiversidad. Desde el año 2013 cuenta con una de las supercomputadoras más rápidas de Latinoamérica y desde el año 2015 con el muro de visualización más avanzado para investigación científica en Suramérica.

La computación de alto desempeño en Colombia, con estos dos proyectos, se impulsó de manera vertiginosa. Ahora, con el surgimiento de nuevos paradigmas en la computación como son Cloud Computing, Service Oriented Computing (SOC) y Utility Computing, la computación distribuida tomó una nueva dirección en cómo es percibida y ofrecida al público. Estos nuevos paradigmas surgieron a través de servicios como elemento fundamental para el desarrollo de aplicaciones y soluciones. SOC y Cloud Computing, tenían una relación recíproca, una proveía “la computación de servicios” y la otra proveía “los servicios de computación”. Sin embargo, actualmente Cloud Computing hace parte de SOC. Utility Computing, proviene de entender la computación como una quinta utilidad, (las cuatro que se conocen son, electricidad, gas, telefonía y agua), la idea es ofrecer un nivel básico de servicios de computación que puede ser considerado como esencial para satisfacer necesidades de la comunidad en general, aún más en ciencias biológicas.

1 Tomado de: <http://www.bios.co/-Qui%C3%A9nes-Somos/Historia>

Uno de los mayores retos de la computación de alto rendimiento (HPC por sus siglas en inglés) para los proyectos biológicos es la accesibilidad de los recursos. La mayoría de los investigadores en ciencias biológicas se centran en los aspectos experimentales de su investigación y no están familiarizados con el entorno HPC. Ahora, cuentan, con una gama de herramientas web brindados a través del Cloud computing para la resolución de sus problemas y el análisis de sus datos ya que este es computacionalmente intensivo y no se puede desarrollar de forma local. Estos problemas se hacen aún más importantes ahora con el aumento del flujo de datos de secuenciación de próxima generación (NGS Next Generation Sequencing) que requieren la integración especializada de infraestructura computacional. La secuenciación del genoma humano alimentó una revolución en la biología computacional. Como resultado, la biología moderna produce el mayor número de nuevos algoritmos como cualquier otro ámbito fundamental de la ciencia. La secuenciación del genoma es solo uno de los cientos de problemas biológicos que se han vuelto inseparables de los métodos computacionales necesarios para resolverlos.

Junto con investigadores de la Universidad de los Andes y del centro BIOS estamos trabajando en proyectos en conjunto que fortalezcan aún más la apropiación de la computación de alto desempeño, enfocándonos en problemas para ciencias biológicas.

César Díaz. PhD.

Editor Ingeniería

Revista Mutis

doi: <http://dx.doi.org/10.21789/22561498.1107>

Establecimiento *in vitro* de protocormos de *Prosthechea* sp. bajo diferentes concentraciones de ácido naftalenacético

Arlette Ivone Gil Clavijo^{1*}, Diego Fernando Contreras Pico²,
Luis Carlos Gutiérrez Rojas²

¹Universidad de Cundinamarca, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Programa de Ingeniería Agronómica, Grupo de investigación PROSAFIS, Diagonal 18 N° 20-29, Fusagasugá, Colombia.

*Autor para correspondencia: arlettegil@hotmail.com

² Universidad de Cundinamarca, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Programa de Ingeniería Agronómica, semillero de investigación SEMINAC, Diagonal 18 N° 20-29, Fusagasugá, Colombia.

***In vitro* establishment of *Prosthechea* sp. protocorms under different concentrations of naphthalene acetic acid.**

ABSTRACT

Prosthechea sp. is a wild orchid craved by the color and shape of its flowers that is disappearing from the environment because of deforestation and its removal from the population present in the rural area of the Fusagasugá municipality (Cundinamarca, Colombia). The effect of four concentrations (0; 1,5; 3 and 4 mg/l⁻¹) of Naphthalene acetic acid (NAA) was proved on the development of *Prosthechea* sp. protocorms. The bioassay was conducted under *in vitro* conditions for 42 weeks, in an asymbiotic relationship. The rooting media supplemented with 1,5 mg/l⁻¹ NAA had no effect on root formation, however the protocorms proliferation was presented by adventitious gemmation in 80%. The concentrations of 3 and 4 mg/l⁻¹ NAA had a development of seedlings in 70% and 65% respectively, introducing abundant thick roots and root hairs. It was observed the triple response in the treatments with the highest NAA concentrations because of the ethylene synthesis, affecting the root geotropism. This research will serve as basis for future multiplication and conservation projects, contributing to the preservation of the wild flora and genetic resources with great ecological and economic potential such as orchids.

Key words: micropropagation, asexual reproduction, auxins.

Editor: Hernández Fernández, J.

Citation: Gil, A., Contreras, D & Gutiérrez, L. (2016). Establecimiento *in vitro* de protocormos de *Prosthechea* sp. bajo diferentes concentraciones de ácido naftalenacético. *Revista Mutis* 6(1), 6-15, doi: <http://dx.doi.org/10.21789/22561498.1108>

Received: January 29, 2016; **Accepted:** April 11, 2016; **Published on line:** May 31, 2016.

Copyright: ©2016 Gil, A., Contreras, D & Gutiérrez, L. This is an open-access article, which permits unrestricted use, distributions and reproduction in any me=diu, provided the original author and source are credited.

Competing Interests: The authors have no conflict of interest.

RESUMEN

Prosthechea sp. es una orquídea silvestre apetecida por el color y forma de sus flores, que está desapareciendo paulatinamente en el municipio de Fusagasugá (Cundinamarca, Colombia) a causa de la deforestación y extracción por parte de la población presente en la zona rural. Se probó el efecto de cuatro concentraciones (0; 1,5; 3 y 4 mg/l-1) de ácido naftalenacético (ANA) sobre el desarrollo de protocormos de *Prosthechea* sp. El cultivo se llevó a



cabo bajo condiciones in vitro durante 42 semanas, de manera asimbiótica. El medio de enraizamiento suplementado con 1,5 mg/l-1 de ANA tuvo un efecto nulo sobre la formación de raíces, sin embargo, se presentó proliferación de protocormos por gemación adventicia en un 80 %. Las concentraciones de 3 y 4 mg/l-1 de ANA obtuvieron desarrollos de plántulas en 70 y 65 % respectivamente, al presentar abundantes raíces gruesas y pelos radicales. Se observó la respuesta triple en los tratamientos con mayor concentración de ANA debido a la síntesis de etileno, afectando el geotropismo de la raíz. Esta investigación servirá como base para futuros proyectos de multiplicación y conservación, contribuyendo con la preservación de la flora silvestre y los recursos genéticos con gran potencial ecológico y económico como lo son las orquídeas.

Palabras clave: micropropagación, reproducción asexual, auxinas.

INTRODUCCIÓN

En el libro rojo de especies endémicas amenazadas de Colombia, dedicado únicamente a la familia Orchidaceae, se catalogan tres géneros con seis especies en peligro crítico (CR) y siete géneros con 64 especies en peligro (EN), además de incluir 18 géneros en diferentes categorías de riesgo (Salazar-Holguín *et al.*, 2010). Muchas de estas especies son endémicas y se encuentran amenazadas por la deforestación y el deterioro del hábitat, la recolección excesiva y el aumento de la frontera agrícola, factores que contribuyen a la desaparición de estas orquídeas de su medio natural (Calderón, 2007).

Dentro de las medidas propuestas para la conservación de las orquídeas están los programas de propagación artificial de especies en peligro de extinción (Arditti & Ernst, 1993). En condiciones naturales, las semillas dependen obligadamente del establecimiento de una simbiosis con un hongo específico para que pueda ser llevado a cabo el proceso de germinación, de esta compleja interacción depende el éxito en las primeras etapas de desarrollo, que podría tardar varios años, lo que la hace un medio limitado de propagación (Izco *et al.*, 2004).

Las semillas de las orquídeas tienen una estructura muy simple que consiste de un embrión reducido a unas pocas células y rodeado de una testa usualmente transparente y carente de endospermo (Arditti & Abdul, 2000). Las semillas de las orquídeas son diminutas, extremadamente livianas y producidas en gran número. El número de semillas por fruto puede variar desde 20 hasta 4'000.000 (Ruiz *et al.*, 2008).

La alta producción de semillas ha sido descrita como una característica común de aquellas plantas que tienen requerimientos muy específicos en la germinación, tales como micotrofia (Roy *et al.*, 2011). En condiciones naturales las semillas requieren necesariamente la presencia e infección de un hongo simbiote que actúa a manera de "endospermo" exógeno y le proporciona la fuente de carbohidratos y nutrientes necesarios para el proceso de germinación (Otero & Bayman, 2009). Esta asociación micorrízica es típica de las orquídeas, donde el flujo de carbono va del hongo a la planta y no al revés (Barba *et al.*, 2001).

Durante la germinación el embrión aumenta su volumen para llenar el espacio interior de la testa hasta romperla y emerger (fase 1). A continuación se forma una estructura tuberizada (o masas de células indiferenciadas) llamada protocormo, con apariencia esférica ovoide y de color verde (fase 2). Siempre posee micorriza sobre la cual, eventualmente, se desarrollarán los primordios caulinares y radicales (fases 3 y 4) (Ávila-Díaz *et al.*, 2009).

El protocormo es una estructura organógena particular que procede del embrión, compuesta generalmente de una yema terminal y una corona de rizoides (Sai-prasad & Polisetty, 2003). El cuerpo consiste de largas células parenquimáticas que acumulan sustancias de almacenamiento (Chugh *et al.*, 2009). Las raíces, siempre adventicias, se forman más tardíamente en la base de los nudos de los tallos con hojas. El protocormo está recubierto de una epidermis que puede llegar a producir otros protocormos por gemación adventicia a partir de los tejidos superficiales (Margará, 1988).

El protocormo puede continuar creciendo durante semanas, meses o incluso años dependiendo de la especie, hasta alcanzar la edad apropiada para producir raíces y hojas; el abastecimiento por parte del hongo de los azúcares y nutrientes necesarios cesa en el momento en el que la planta joven tiene la

capacidad de producirlos por sí misma (McKendrick, 2000). Esto indica que el protocormo tiene la función de actuar como un órgano de almacenamiento de nutrientes que más adelante permite la aparición de los brotes foliares y radicales (Pedroza-Manrique & Alonso, 2009).

La emergencia de los protocormos en la ontogénesis de las orquídeas puede ser considerado como un paso necesario en la transición de la reproducción sexual a la asexual, presente de manera exclusiva en este grupo de plantas (Mahendran & Narmatha, 2012). Debido a esta facilidad, los protocormos se han utilizado como explantes en trabajos de embriogénesis somática y organogénesis directa e indirecta, cuyas técnicas son aplicadas ampliamente en la micropropagación vegetativa (Tuong *et al.*, 2004; Zhao *et al.*, 2008).

En 1824 se observó por primera vez la asociación entre la semilla y el hongo simbiote. Solo hasta 1899 se establecieron los requerimientos de la micorriza para la germinación de las semillas de orquídeas. Experimentos realizados por Knudson en la germinación de *Cattleya shoroederae* Rchb.f. x *Cattleya gigas* Rchb.f. (1918) y *Cattleya labiata* Lindl. x *Cattleya aurea* Lindl. (1919), permitieron confirmar que estas semillas pueden germinar sin el hongo si se usan cierto tipo de azúcares simples y nutrientes en el medio de cultivo (Wing Yam & Arditti, 2009).

Los métodos de cultivos *in vitro* se presentan como una alternativa para suplir las condiciones necesarias para el desarrollo de las semillas de orquídea, ya sea facilitando la simbiosis o en medios asimbióticos donde se desplaza el papel del hongo simbiote (Chang & Chang, 1998). Mediante diversas técnicas y medios de cultivo se logra estimular el proceso germinativo y también acortar el tiempo de desarrollo de las plántulas, por lo que es necesario crear protocolos de propagación *in vitro* con la expectativa de ser aplicados en programas de multiplicación masiva de especies en peligro de extinción, y contribuir sustancialmente también a proyectos de conservación y posteriormente a planes de reintroducción al medio natural (Rodríguez *et al.*, 2009).

El uso específico de ácido naftalenacético en las etapas de germinación y desarrollo de las semillas de orquídea en medio *in vitro*, permite aumentar la tasa de germinación y reducir el tiempo de desarrollo de los protocormos, cualidades buscadas para un eficiente

método de propagación a gran escala (Pedroza-Manrique & Micán-Gutiérrez, 2006). Por ejemplo, con *Odontoglossum gloriosum* Rchb.f. fue posible obtener cerca de 330.000 plántulas en 40 semanas, mientras que con *Comporettia falcata* Poepp. & Endl. se obtuvieron 160.000 plántulas en 21 semanas, en ambos casos a partir de una sola cápsula (Pedroza-Manrique *et al.*, 2005).

El cultivo de orquídeas en el municipio de Fusagasugá es raramente dado u ocasionalmente está presente en colecciones privadas, sin embargo se utilizan métodos vegetativos de propagación que a veces resultan ser limitados e ineficientes (Aubry, 2003). El objetivo de esta investigación fue establecer el desarrollo de protocormos de la orquídea *Prosthechea* sp. presente en la zona rural del municipio de Fusagasugá, bajo condiciones *in vitro* mediante la utilización de cuatro concentraciones de ácido naftalenacético, con el fin de ser usados como base para futuros proyectos de multiplicación y conservación que servirán como referente para otros trabajos en este género, contribuyendo con la preservación de la flora silvestre y los recursos genéticos con gran potencial ecológico y económico. En este caso, *Prosthechea* sp. es una especie útil por su uso en cruzamientos como patrones para híbridos intergenéricos (Arditti, 2008).

MATERIALES Y MÉTODOS

Material vegetal

Las cápsulas de *Prosthechea* sp. se recolectaron de plantas silvestres en la vereda "La Aguadita" del municipio de Fusagasugá (Cundinamarca), por la carretera que conduce al parque "San Rafael", en el punto 4°23'32"N y 74°18'48"W, a una altitud de 1.909 msnm, temperatura media de 17 °C, humedad relativa media de 85 % y precipitación anual de 1.250 mm.

El tiempo de maduración de las cápsulas era desconocido, y se estableció su estado de madurez teniendo en cuenta el color de los tejidos (coloración amarillenta). Estas se colocaron en bolsas de papel debidamente marcadas y fueron trasladadas en nevera de icopor hacia el laboratorio para su posterior siembra, realizada 48 horas después.

La fase del cultivo *in vitro* se realizó en el laboratorio de propagación vegetal de la estación experimental agroforestal "Chilacas", ubicada en la carretera

Zipaquirá-Pacho, kilómetro 30, vereda “La Cabrera”, municipio de Pacho (Cundinamarca), ubicada a una altura de 2.050 msnm, temperatura media de 17,5 °C y humedad relativa del 75 %. Las instalaciones contaban con áreas especializadas y condiciones de asepsia.

Desinfección y siembra del material vegetal

En el laboratorio, las cápsulas recolectadas fueron lavadas superficialmente con abundante agua y jabón. Luego se desinfectaron durante 10 minutos con una solución de hipoclorito de sodio al 5 %. A continuación se enjuagaron dos veces con agua esterilizada y luego se sumergieron en alcohol al 70 % por 1 minuto. Posteriormente, se llevaron a la cámara de flujo laminar, donde se dejaron escurrir sobre servilletas estériles y finalmente fueron flameadas con el mechero de Bunsen. Las semillas extraídas asépticamente fueron esparcidas sobre la superficie del medio de cultivo, en frascos de vidrio de 250 ml de capacidad, que contenía cada uno 25 ml del medio de cultivo, de acuerdo al tratamiento.

Diseño experimental

El ensayo se arregló en un diseño completamente al azar, con cuatro tratamientos y 20 repeticiones, donde cada frasco de vidrio correspondió a la unidad experimental. Todos los medios fueron expuestos a 16 horas de fotoperíodo con luz blanca (lámpara fluorescente) y 8 de oscuridad, en cuarto de incubación a una temperatura de 25 °C. El tiempo total del experimento fue de 42 semanas.

El experimento se dividió en dos fases: Germinación de semilla y establecimiento de protocormos, y diferenciación y enraizamiento de protocormos.

Germinación de semilla y establecimiento de protocormos.

El medio de cultivo para la iniciación o germinación a base de sales Murashige y Skoog (MS) (1962), en concentración de 4,43 g/l⁻¹, adicionado con fécula de maíz tal como se realizó con *Masdevallia coccinea* Linden ex Lindl. y *Maxillaria nutans* Lindl., donde se agregaron 10 g/l⁻¹ y sin ningún regulador de crecimiento, de acuerdo con Pedroza-Manrique *et al.* (2010). Adicionalmente se utilizaron 4 g/l⁻¹ de agar, 30 g/l⁻¹ de sacarosa y myo-inositol en concentración de 0,1 g/l⁻¹. El pH del medio se ajustó a 5,8.

Diferenciación y enraizamiento de protocormos

Se tomaron como explantes los protocormos provenientes del medio de germinación y se subcultivaron en otro medio de cultivo, con cuatro niveles distintos de ácido naftalenacético (ANA) con el propósito de estimular el crecimiento y desarrollo radical. Este medio consistió en sales MS enriquecido con agua de coco, banano y manzana, 30 g/l⁻¹ de sacarosa y 4 g/l⁻¹ de agar. Los tratamientos comprendieron cuatro concentraciones diferentes de ANA (0; 1,5; 3 y 4 mg/l⁻¹), para determinar su efecto sobre la formación de hojas y raíces. El medio se ajustó a un pH de 5,8 y se complementó con 2 g/l⁻¹ de carbón activado como antioxidante, para prevenir pérdidas por exudación de fenoles.

La respuesta de los protocormos en el medio de enraizamiento se evaluó cualitativamente a través de una escala con cuatro estados de desarrollo (tabla 1). A cada estado se relacionó un valor numérico para su posterior análisis estadístico. Esta evaluación se tomó de manera visual.

Tabla 1. Variable “respuesta” de protocormos de *Prosthechea* sp. a concentraciones de 0; 1,5; 3 y 4 mg/l⁻¹ de ANA.

Valor numérico	Respuesta
0	Muerte
1	Regeneración de protocormos
2	Primera raíz
3	Plántula (presencia de múltiples hojas primarias y raíces)

Análisis estadístico

Se realizó análisis de contraste para observar las diferencias entre los tratamientos a través de la prueba de chi-cuadrado (χ^2), para un grado de significancia (α) de 0,05 (Milton, 2001). El análisis de variables categóricas se realizó a través del procedimiento CATMOD (Debnath, 2007; Debnath, 2008) del paquete estadístico SAS®, versión 9.0.

RESULTADOS

Germinación de semilla y establecimiento de protocormos

El tiempo de incubación de las semillas de *Prosthechea* sp. para la fase de germinación y establecimiento de protocormos fue de 21 semanas (figura 1). Casos similares ocurrieron con semillas de *Masdevallia coccinea* Linden ex Lindl. y *Maxillaria nutans* Lindl.,

donde el tiempo de germinación se llevó a cabo en 24 semanas (Pedroza-Manrique *et al.*, 2010), en *Odontoglossum gloriosum* Rchb.f. tomó 31 semanas (Pedroza-Manrique & Micán-Gutiérrez, 2006) y en *Epidendrum elongatum* Jacq., cerca de 30 semanas (Pedroza-Manrique & Alonso, 2009). Sin embargo, se han reportado tiempos de germinación de 9 semanas en *Cymbidium elegans* Lindl., según Pant & Pradhan (2010).



Figura 1. Protocormos de *Prosthechea* sp. desarrollados *in vitro* bajo diferentes concentraciones de ANA.

1. Diferenciación y enraizamiento de protocormos

Esta fase duró 21 semanas, período que permitió observar diferentes respuestas de diferenciación y en-

raizamiento de los protocormos de *Prosthechea* sp. entre los tratamientos evaluados, de acuerdo con el análisis de frecuencias (tabla 2) con las cuatro concentraciones de ANA en el medio de cultivo.

Tabla 2. Análisis de frecuencias de acuerdo a la respuesta de protocormos según la concentración de ANA en la orquídea *Prosthechea* sp.

Tratamiento (mg/l ⁻¹ ANA)	Muerte (%)	Regeneración protocormos (%)	Primera raíz (%)	Plántulas (%)
0	90	0	0	0
1,5	20	80	0	0
3	0	15	15	70
4	0	20	15	65

Los resultados mostraron que en el medio de cultivo sin la adición de ANA (0 mg/l⁻¹) se obtuvo el mayor porcentaje de muerte de protocormos (90 %), sin regeneración de alguno de ellos ni presencia de raíces ni plántulas.

El medio de cultivo adicionado con 1,5 mg/l⁻¹ de ANA presentó muerte de protocormos en un 20 %, pero obtuvo el mayor porcentaje en la regeneración de estos, en un 80 %. El crecimiento de los protocormos se caracterizó por la proliferación de nuevos

protocormos formando agregados sobre la superficie del medio, donde no hubo formación de estructuras radicales. La adición de pequeñas cantidades de auxina estimuló la regeneración secundaria de protocormos en *Prosthechea* sp. sin la formación de estructuras radicales, lo cual sugiere que el medio con $1,5 \text{ mg/l}^{-1}$ de ANA promovió inicialmente la formación de callo en esta especie.

La regeneración secundaria de protocormos también se presentó en los tratamientos con 3 y 4 mg/l^{-1} de

ANA pero en porcentajes más bajos, con 15 y 20 % respectivamente. Los protocormos desarrollados en los medios con 3 y 4 mg/l^{-1} de ANA se desarrollaron en plántulas con la formación de múltiples raíces, presentes en un 70 y 65 % respectivamente. En estos tratamientos el crecimiento radical obtuvo un aumento pronunciado en diámetro, tornándose grueso y cubierto por vellosidades (figura 2).



Figura 2. Plántulas de *Prosthechea* sp. desarrolladas a partir de protocormos bajo diferentes concentraciones de ANA.

El desarrollo radical fue superior al desarrollo foliar, con múltiple enraizamiento y longitud variable. En las plántulas obtenidas en los tratamientos con 3 y 4 mg/l^{-1} de ANA se observó la respuesta triple, correspondiente a la interacción etileno-auxina, donde se obtuvo el cambio de dirección en el alargamiento de las raíces. Sobre las raíces aéreas se formó el velamen, tejido característico de las raíces de orquídeas.

En el análisis de contraste chi-cuadrado no se presentaron diferencias entre los tratamientos de 3 y 4 mg/l^{-1} de ANA, al contrario del tratamiento con $1,5 \text{ mg/l}^{-1}$ de ANA que sí presentó diferencias estadísticas con respecto a ellos (tabla 3). Como no hubo regeneración de protocormos para el tratamiento sin ANA (0 mg/l^{-1}), este no se tuvo en cuenta para dicho análisis de contraste.

Tabla 3. Análisis de contraste chi-cuadrado (χ^2) con un grado de significancia (α) de 0,05 para concentraciones de ANA sobre desarrollo de protocormos de *Prosthechea* sp.

Contraste	DF	Chi-cuadrado	Pr > ChiSq
$1,5 \text{ mg/l}^{-1}$ vs. 3 mg/l^{-1}	3	51,16	<0,0001
$1,5 \text{ mg/l}^{-1}$ vs. 4 mg/l^{-1}	3	41,58	<0,0001
3 mg/l^{-1} vs. 4 mg/l^{-1}	3	0,15	0,9858

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Germinación de semilla y establecimiento de protocormos

De acuerdo con los resultados obtenidos en este estudio para *Prosthechea* sp., estos indican que los tiempos para germinación y establecimiento de protocormos son variables y característicos de cada especie de orquídea. Lo más relevante en cada caso es la obtención de protocormos con forma de pequeñas esferas de 2,5 mm de diámetro aproximadamente. Tanto en *Oncidium stramineum* Lindl. como en *Brassia verrucosa* Bateman ex Lindl., se formaron protocormos de entre 2 y 3 mm de diámetro (Flores-Escobar *et al.*, 2008; Flores-Escobar *et al.*, 2011).

Diferenciación y enraizamiento de protocormos

Dentro del ciclo natural de desarrollo, el embrión de las orquídeas pasa al estado de protocormo y luego se desarrolla directamente a plántula (Flores-Escobar *et al.*, 2008; Jhonson *et al.*, 2007; Salazar & Cancino, 2012; Yamazaki & Kazumitsu, 2006). Se ha observado la sobreproducción de protocormos en muchos explantes de orquídeas cultivadas *in vitro*, mediante la adición de pequeñas cantidades de ANA, como en *Laelia speciosa* Kunth. con 0,5 mg/l⁻¹, en *Cymbidium elegans* Lindl. con 0,5 mg/l⁻¹ y en *Melissa officinalis* Lindl. con 0,09 mg/l⁻¹, el cual fue capaz de mejorar la producción de brotes foliares, aunque no promovió rizogénesis (Ávila-Díaz *et al.*, 2009; Da Silva *et al.*, 2006; Pant & Pradhan, 2010).

Este comportamiento se debe a que el protocormo en condiciones naturales, es el órgano de almacenamiento compuesto por grandes células parenquimatosas que acumulan sustancias por largos períodos de tiempo hasta que las condiciones ambientales sean las adecuadas para la emergencia de las primeras hojas y raíces (Vinogradova & Andronova, 2002).

Resultados similares de regeneración secundaria de protocormos se encontraron en *Laelia speciosa* Kunth. con 1 mg/l⁻¹ de ANA, en *Dendrobium candidum* Wall ex Lindl. con 0,2 mg/l⁻¹ de ANA y en *Cymbidium* sp. con 0,1 mg/l⁻¹ de ANA (Ávila-Díaz *et al.*, 2009; Zhao *et al.*, 2008).

El ANA en concentraciones adecuadas puede favorecer la formación de raíces adventicias, tal como se encontró en *Coelogyne stricta* (D. Don) Schltr., donde pseudobulbos cultivados bajo 1 y 2 mg/l⁻¹ de ANA probaron ser los más efectivos en la generación del número de raíces por plántula (Basker & Bai, 2006). El etileno, sintetizado como consecuencia de elevadas cantidades de auxina en el medio, también participa en la diferenciación radical y está implicado en la inducción de raíces laterales y adventicias (Taiz & Zeiger, 2006).

Las auxinas de todos los tipos estimulan la producción de etileno en muchos tipos de células vegetales, en especial cuando se agregan cantidades elevadas de auxinas (Salisbury & Ross, 1994). La respuesta triple tiene implicaciones mecánicas, porque en condiciones naturales la acumulación de etileno en tejidos radiculares ayuda a perforar y guiar el crecimiento en suelos compactos (Montaldi, 1995). Sin embargo, se ha encontrado también que en bajas dosis el gas puede estimular la elongación de la raíz (Azcón-Bieto & Talón, 2000). Además las auxinas favorecen el crecimiento vertical o apical, por lo que estas raíces pudieron haber respondido al alargamiento por la presencia del ANA en el medio. Caso similar se observó en *Phaius tankervilleae* Rchb.f. donde la mayor extensión de las raíces se dio en presencia de 0,1 mg/l⁻¹ de ANA (Sultana *et al.*, 2012).

La falta de uniformidad en la respuesta del explante al medio se debe a varios factores como diferencias genéticas, competencia de nutrientes y microclimas al interior del vaso de cultivo (Vinogradova & Andronova, 2002).

El velamen desarrollado sobre las raíces consiste en una cobertura esponjosa de células muertas de color blanco, cuya función es la absorción hídrica, reduciendo la pérdida de agua y también está implicado en la protección mecánica de las raíces (Zotz & Winkler, 2013); es característico de las plantas con hábitos epífitos como las orquídeas y su presencia en medios *in vitro* se ha considerado un efecto secundario por la acción combinada del etileno y la auxina, tal como se obtuvo en esta investigación. Observaciones similares se registraron en *Cymbidium iridoides* D. Don. donde se presentaron raíces gruesas y con pelos radicales, en un medio con 1 mg/l⁻¹ de ácido indolacético (AIA) (Pant & Swar, 2011).

CONCLUSIONES

- La adición de ANA en el medio de cultivo *in vitro* para generación de protocormos y establecimiento de plántulas de *Prosthechea* sp. obtuvo resultados diferenciales en esta investigación, por lo que se hace necesario realizar estudios exhaustivos para implementar su utilización en la micropropagación de esta especie de orquídea.
- A partir de los resultados obtenidos en esta investigación se podrán realizar otros estudios del efecto de diferentes concentraciones de ANA sobre la obtención de protocormos y desarrollo de plántulas, con el objetivo de iniciar propagaciones masivas de *Prosthechea* sp. con fines de conservación de esta orquídea, inicialmente para la zona de influencia de Fusagasugá (Cundinamarca).

AGRADECIMIENTOS

A la empresa GEOAMBIENTE-SAS por permitir la utilización de sus instalaciones para el desarrollo del experimento y al I.A. Luis Eduardo Vanegas por su colaboración en la realización de los cultivos *in vitro* en la fase experimental de esta investigación.

Al M.Sc. César Alfonso Ariza por su colaboración con los métodos estadísticos para el desarrollo de esta investigación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arditti, J. & Ernst, R. (1993). *Micropropagation of orchids*. New York: John Wiley and Sons. 640 p.
- Arditti, J. & Abdul, A. (2000). Numerical and physical properties of orchid seeds and their biological implications: Tansley review N° 110. *New Phytologist* 145, 367-421.
- Arditti, J. (2008). *Micropropagation of orchids*. 2 ed. Oxford, U.K.: Wiley-Blackwell. 1560 p.
- Aubry, Y. (2003). *Odontoglossum crispum*: An almost vanished species with a great legacy. *Newsletter of the central New York orchid society*, 4(7), 8-11.
- Ávila-Díaz, I., Oyama, K., Gómez-Alonso, L. & Salgado-Garciglia, R. (2009). *In vitro* propagation of the endangered orchid *Laelia speciosa*. *Plant Cell Tissue and Organ Culture*, 99, 335-343.
- Azcón-Bieto, J. & Talón, M. (2000). *Fundamentos de Fisiología Vegetal*. Barcelona: McGraw-Hill Interamericana/Edicions Universitat. 704 p.
- Barba, A., Luna, B. & Romero, J. (2001). *Micropropagación de plantas*. México D. F.: Trillas. 107 p.
- Basker, S. & Bai, N. (2006). Micropropagation of *Coleogyne stricta* (D. Don) Schltr. via pseudobulb segment culture. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 6(1), 31-35.
- Calderón, E. (ed). (2007). *Libro rojo de plantas de Colombia: Orquídeas*. Serie libros rojos de especies amenazadas de Colombia. Instituto Alexander von Humboldt – Ministerio del Medio Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Colombia. Vol. 6, Primera parte. 828 p.
- Chang, C. & Chang, W. (1998). Plant regeneration from callus culture of *Cymbidium ensiflorum* var. *misericors*. *Plant Cell Reports*, 17, 251-255.
- Chugh, S., Guha, S. & Rao, I. (2009). Micropropagation of orchids: a review on the potential of different explants. *Scientia Horticulturae*, 122, 507-520.
- Da Silva, S., Salgueiro, C., Aparecida, M., Da Silva, R. & Sato, A. (2006). *In vitro* propagation of *Melissa officinalis* L. and production of essential oil. *Plant Cell Culture & Micropropagation*, 2(2), 53-60.
- Debnath, S. C. (2007). Influence of indole-3-butyric acid and propagation method on growth and development of *in vitro*-and *ex vitro*-derived low-bush blueberry plants. *Plant Growth Regulation*, 51(3), 245-253.
- Debnath, S. C. (2008). Zeatin-induced one-step *in vitro* cloning affects the vegetative growth of cranberry (*Vaccinium macrocarpon* Ait.) micropropagules over stem cuttings. *Plant Cell Tissue and Organ Culture*, 93, 231-240.
- Flores-Escobar, G., Legaria-Solano, J., Gil-Vásquez, I. & Colinas-León, M. (2008). Propagación *in vitro* de *Oncidium stramineum* Lindl. una orquídea amenazada y endémica de México. *Revista Chapingo serie horticultura*, 14(3), 347-353.

- Flores-Escobar, G., Gil-Vásquez, I., Colinas-León, M. & Mata-Rosas, M. (2011). Propagación *in vitro* de la orquídea *Brassia verrucosa* Bateman ex. Lindl. *Revista Chapingo serie horticultura*, 17(1), 5-8.
- Izco, J., Bruges, M., Costa, M., Devesa, J., Fernández, F., Gallardo, T., Limona, X., Prada, C., Talavera, S. & Valdés, B. (2004). *Botánica*. 2ed. Madrid: McGraw-Hill Interamericana. 906 p.
- Johnson, T., Stewart, S., Dutra, D., Kane, M. & Richardson, L. (2007). Asymbiotic and symbiotic seed germination of *Eulophia alta* (Orchidaceae) - preliminary evidence for the symbiotic culture advantage. *Plant Cell Tissue and Organ Culture*, 90(3), 313-323.
- Mahendran, G. & Narmatha, B. (2012). Direct somatic embryogenesis and plant regeneration from seed derived protocorms of *Cymbidium bicolor* Lindl. *Scientia Horticulturae*, 135, 40-44.
- Margara, J. (1988). *Multiplicación vegetativa y cultivo in vitro*. Meristemas y organogénesis. Madrid: Ediciones Multiprensa. 17 p.
- McKendrick, S. (2000). *Manual para la germinación in vitro de orquídeas*. Scotland, U.K.: Ceiba Foundation for Tropical Conservation. (pp. 4-9).
- Milton, J. S. (2001). *Estadística para Biología y Ciencias de la Salud*. Madrid: McGraw-Hill/Interamericana de España. pp. 247-254.
- Montaldi, E. (1995). *Principios de Fisiología Vegetal*. La Plata: Ediciones DUR. 298 p.
- Murashige, T. & Skoog, F. (1962). A revised medium for rapid growth and bioassays with tobacco tissue cultures. *Physiologia Plantarum*, 15(3), 473-497.
- Otero, J. & Bayman, P. (2009). Germinación simbiótica y asimbiótica en semillas de orquídeas epífitas. *Acta Agronómica*, 58(4), 270-276.
- Pant, B. & Pradhan, S. (2010). Micropropagation of *Cymbidium elegans* Lindl. through protocorm and shoot tip culture. *Plant Tissue Culture and Biotechnology*. Conference, December 3-5, Bangladesh. pp. 123-130.
- Pant, B. & Swar, S. (2011). Micropropagation of *Cymbidium iridioides*. *Nepal Journal of Science and Technology*, 12, 91-96.
- Pedroza-Manrique, J., Fernández-Lizarazo, C. & Suarez-Silva, A. (2005). Evaluation of the effect of three growth regulators in the germination of *Comparettia falcata* seeds under *in vitro* conditions. *In Vitro Cellular and Developmental Biology-Plant*, 41(6), 838-843.
- Pedroza-Manrique, J. & Micán-Gutiérrez, Y. (2006). Asymbiotic germination of *Odontoglossum gloriosum* Rchb.f. (Orchidaceae) under *in vitro* conditions. *In Vitro Cellular and Developmental Biology-Plant*, 42(6), 543-547.
- Pedroza-Manrique, J. & Alonso, J. (2009). Efecto del carbón activado, ácido indolacético (AIA) y bencil amino purina (BAP) en el desarrollo de protocormos de *Epidendrum elongatum* Jacq. bajo condiciones *in vitro*. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 11(1), 17-32.
- Pedroza-Manrique, J., Serrato-Muñoz, L. & Castaño-Robayo, M. (2010). Efecto del carbón activado y ácido indolacético en el desarrollo de protocormos de *Masdevallia coccinea* Linden ex Lindl. y *Maxillaria nutans* Lindl. *in vitro*. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 12(2), 86-102.
- Rodríguez, J., Gómez, A., Pasqual, M., Rodríguez, F. & Aparecida, F. (2009). Concentrações de sais do meio Knudson C e de ácido giberélico no crescimento *in vitro* de plântulas de orquídea. *Ciencia Rural*, 39(3), 772-777.
- Roy, A., Patel, R., Sajeev, S. & Deka, B. (2011). Asymbiotic seed germination, mass propagation and seedling development of *Vanda coerulea* Griff Ex. Lindl. (Blue Vanda): an *in vitro* protocol for an endangered orchid. *Scientia Horticulturae*, 128, 325-331.
- Ruiz, B., Laguna, C., Iglesias, A., Damon, A., Marín, H., Azpíroz, R. & Moreno, M. (2008). Germinación *in vitro* de semillas de *Encyelia adenocaula* (La Llave & Lex.) Schltr (Orchidaceae). *Phyton-International Journal of Experimental Botany*, 77, 203-215.

- Saiprasad, G. & Polisetty, R. (2003). Propagation of three orchid genera using encapsulated protocorm-like bodies. *In Vitro Cellular and Developmental Biology-Plant*, 39, 42-48.
- Salazar-Holguín, F., Benavides-Molineros, J., Trespalacios-González, O. & Pinzón, L. (2010). *Informe sobre el Estado de los Recursos Naturales Renovables y del Ambiente*. Instituto de investigación de recursos biológicos "Alexander von Humboldt". Bogotá D. C.
- Salazar, S. & Cancino, G. (2012). Evaluación del efecto de dos suplementos orgánicos en la germinación *in vitro* de orquídeas nativas de la provincia de Pamplona, Colombia. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 14(1), 53-59.
- Salisbury, F. & Ross, C. (1994). *Fisiología Vegetal*. México D. F.: Grupo Editorial Iberoamericana S. A. 759 p.
- Sultana, N., Jahan, T., Baraj, T., Akhter, M. & Ara, N. (2012). Tissue culture propagation of tropical orchid (*Pathus tankervilleae*) plant. *Journal of Innovation & Development Strategy (JIDS)*, 6(1), 81-85.
- Taiz, L. & Zeiger, E. (2006). *Plant Physiology*. 4th ed. Sunderland, MA: Sinauer Associates Publishers.
- Tuong, L., Takamura, T. & Tanaka, M. (2004). Callus formation and plant regeneration from callus through somatic embryo structures in *Cymbidium* orchid. *Plant Science*, 166, 1443-1449.
- Vinogradova, T. & Andronova, E. (2002). Development of orchid seed and seedlings. En *Orchid biology: reviews and perspectives*, VIII. Springer Science. 599 p.
- Wing, T. & Arditti, J. (2009). History of orchid propagation: a mirror of the history of biotechnology. Review Article. *Plant Biotechnology Reports Impact Factor*, 3, 1-56.
- Yamazaki, J. & Kazumitsu, M. (2006). In vitro asymbiotic germination of immature seed and formation of protocorm by *Cephalanthera falcata* (Orchidaceae). *Annals of Botany*, 98(6), 1197-1206.
- Zhao, P., Wu, F., Feng, F. & Wang, W. (2008). Protocorm-like body (PLB) formation and plant regeneration from the callus culture of *Dendrobium candidum* Wall ex Lindl. *In Vitro Cellular and Developmental Biology-Plant*, 44, 178-185.
- Zotz, G. & Winkler, U. (2013). Aerial roots of epiphytic orchids: the velamen radicum and its role in water and nutrient uptake. *Oecologia*, 171(3), 733-741.

Modelación espacial de la calidad del agua en el río Tapartó, municipio de Andes, Antioquia, Colombia

Julián Andrés Ruiz Toro¹, Fabio de Jesús Vélez Macías,¹ Orlando Caicedo Quintero¹, Néstor Jaime Aguirre Ramírez¹

¹Universidad de Antioquia, Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental, Grupo GeoLimna, calle 67 N° 53-108 Medellín, Colombia. *Autor de correspondencia: jart182@hotmail.com

Spatial modelling of the water quality on the Tapartó river, Andes municipality, Antioquia, Colombia

ABSTRACT

In order to assess the environmental conditions of the Tapartó river, its water quality was analyzed from results of measuring hydraulic and physicochemical variables, and the diversity indexes of Shannon-Weaver (1949), dominance of Simpson (1949) and equity of Pielou (1966) and biotic diversity as BMWP/Col, using aquatic macro invertebrates, which were captured through quantitative and qualitative surveys. Samples were taken in three different stations of Tapartó River in February, May and August, 2014. The results show a varying in the space-time dimensions where the outstanding variables were: nitrates, total alkalinity, COD and aquatic macro invertebrates density. The integration of spatial information of physicochemical parameters with aquatic macro invertebrates, allow us to conclude that the Tapartó river quality is between good to slightly contaminate.

Keywords: aquatic macro-invertebrates, indexes, physicochemical, spatial model, human activities and quality.

Editor: Hernández Fernández, J.

Citation: Ruiz, J., Veléz, F., Caicedo, O & Aguirre, N. (2016). Modelación espacial de la calidad del agua en el río Tapartó, municipio de Andes, Antioquia, Colombia. *Revista Mutis* 6(1) 16-27, doi: <http://dx.doi.org/10.21789/22561498.1109>

Received: January 25, 2016. **Accepted:** April 7, 2016. **Published on line:** May 31, 2016.

Copyright: ©2016 Ruiz, J., Veléz, F., Caicedo, O & Aguirre, N. This is an open-access article, which permits unrestricted use, distributions and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Competing Interests: The authors have no conflict of interest.

RESUMEN

Con el propósito de evaluar las condiciones ambientales del río Tapartó, se analizó su calidad de agua a partir de resultados obtenidos de la medición de variables hidráulicas, fisicoquímicas, y de los índices de diversidad de Shannon-Weaver (1949), dominancia de Simpson (1949) y equidad de Pielou (1966), y biótico como el BMWP/Col, empleando macroinvertebrados acuáticos, obtenidos a través de muestreos cuantitativos y cualitativos. Para tal efecto, se tomaron muestras en tres estaciones diferentes del río en los meses de febrero, mayo y agosto de 2014. Los resultados presentaron una variación en las dimensiones espacio-temporales, donde las variables



que más sobresalieron en relación con este aspecto fueron: nitratos, alcalinidad total, DQO y densidad de los macroinvertebrados acuáticos. Al integrar la información resultante del análisis fisicoquímico y de los macroinvertebrados acuáticos en el modelo espacial, se concluye que en el río Tapartó presenta una calidad de agua entre el rango de buena a ligeramente contaminada.

Palabras claves: macroinvertebrados acuáticos, índices, fisicoquímicos, modelo espacial, actividades antrópicas y calidad.

INTRODUCCIÓN

La tierra se enfrenta en este comienzo del siglo XXI con un creciente deterioro del agua, enmarcada en una crisis de gestión causada por un inadecuado uso de este recurso, en donde las poblaciones más pobres son las más afectadas, tolerando las molestias de las enfermedades relacionadas con la misma, viviendo en entornos degradados y a menudo peligrosos para la salud (Unesco, 2003). Por lo tanto, Un diagnóstico de la calidad del agua es una manera de contribuir a la elaboración de planes de gestión mediante la realización de programas y proyectos encaminados a lograr soluciones a corto plazo. Es así como, una investigación con énfasis en calidad ambiental del agua requiere del estudio y análisis integral de variables físicas, químicas y bióticas.

Por otro lado, los macroinvertebrados acuáticos son unos de los organismos acuáticos más empleados para evaluar el grado de saprobiedad de las aguas corrientes (Caicedo, 2004; Montoya, 2010; Milán, 2011). Estos organismos poseen un ciclo de vida más prolongado en comparación con otros organismos acuáticos inferiores y una forma de vida sedentaria, aspectos que se integran como una respuesta a las variaciones espaciales y temporales de las condiciones ambientales del agua (Rosenberg & Resh, 1993). En el estudio e interpretación de la estructura de macroinvertebrados acuáticos se aplican índices comunitarios como una medida de evaluación de las condiciones ambientales. Entre estos, se tienen los índices de diversidad y sus componentes como el de diversidad de Shannon-Weaver (1949), dominancia de Simpson (1949) y equidad de Pielou (1966). El índice de diversidad Shannon-Weaver (1949),

establece tres componentes de las comunidades bióticas tales como riqueza, abundancia y equidad, que expresan en forma algebraica las relaciones numéricas entre taxa. En general, a una mayor diversidad hay una mejor calidad del agua y viceversa (Domínguez & Fernández, 2009; Castellano 2010; Aguirre & Caicedo 2013). Así mismo, los índices de similitud se emplean cuando se pretenden determinar las variaciones en la calidad del agua a partir de la comparación de comunidades entre diferentes sitios de muestreo (Aguirre & Caicedo 2013).

Por su parte, el índice biótico es aquel que establece la calidad biológica enunciada en forma de un valor numérico que representa las características de los taxa presentes en una muestra (Prat *et al.*, 2008). El índice biótico BMWP (The Biological Monitoring Working Party) para Colombia se ha consolidado como una expresión para el análisis de la calidad del agua cuando se conocen las familias de macroinvertebrados acuáticos. En este índice los puntajes más altos se le asignan a las familias más susceptibles a la contaminación, en tanto los más bajos se le asignan a aquellas más tolerantes (Roldán, 2003).

En esta investigación se evaluó la calidad del agua del río Tapartó ubicado en el municipio de Andes, Antioquia, Colombia, con base en los resultados derivados de la medición de algunas variables físicas, químicas y bióticas, utilizando muestreos cuantitativos, cualitativos y el análisis de la comunidad de macroinvertebrados acuáticos capturada en tres sitios diferentes del río. Los análisis fueron representados en un modelo espacial, con el propósito de conocer los cambios de la calidad del agua respecto al tiempo y a las actividades antrópicas que predominan en las proximidades de esta corriente, que además de alguna manera inciden sobre las características del agua del río Tapartó.

El río Tapartó nace a 4000 msnm y desemboca a los 1200 msnm en el río San Juan. Tiene una temperatura media de entre 18 y 24 °C, con un promedio anual de lluvias de entre 1000 y 2000 mm, ocupando una franja altitudinal de entre 1000 y 2000 msnm (ilustración 1). En la parte alta correspondiente a los Farallones del Citará la precipitación promedio es de 3000 mm y una temperatura media de entre 12 y 18 °C ocupando una franja altitudinal de entre 2000 y 4000 msnm. Por su ubicación estratégica, la cuenca del río es considerada como un eje económico de la subregión y con un alto

potencial para el desarrollo turístico. Es de destacar que el río Tapartó tiene un alto grado de riesgo por inundaciones, avenidas torrenciales y deslizamientos

debido a las altas pendientes (Plan de Desarrollo Municipal de Andes, 2011).

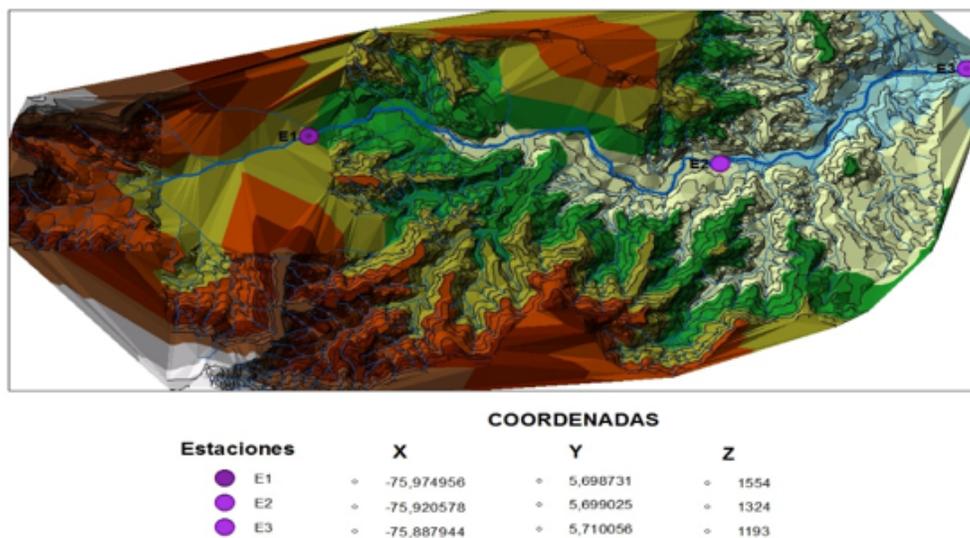


Ilustración 1. Ubicación geográfica de las estaciones de muestreo en la cuenca del río Tapartó.

Para el desarrollo de este proyecto se planteó la pregunta de investigación: ¿Cómo es el estado actual de la calidad del agua en el río Tapartó y su relación con los usos del suelo de la cuenca? Para ello la hipótesis fue: es factible realizar un análisis de la calidad del agua del río Tapartó a través del muestreo, análisis e interpretación de variables fisicoquímicas y de los macroinvertebrados acuáticos, e índices aplicados al grupo de estos organismos. Este análisis de la calidad del agua refleja entonces el grado de intervención antrópica en la cuenca y la generación de contaminantes que alteran la calidad del agua de esta corriente.

METODOLOGÍA

Zona de estudio

Para la determinación de la calidad del agua en el río Tapartó se definieron tres sitios de muestreo en tres meses (15 febrero, 12 mayo y 5 agosto de 2014). La Estación 1 (E1) se ubicó aguas arriba del corregimiento Tapartó entre las coordenadas 05°41'56.49" de latitud norte y 75°58'29.84" de longitud oeste, a 1554 msnm. Por su parte, la Estación 2 (E2) se estableció aproximadamente a cinco kilómetros aguas abajo del

corregimiento entre las coordenadas 05°41'55.43" de latitud norte y 75°55'14.08" de longitud oeste, a 1324 msnm, y la Estación 3 (E3) se localizó cerca de la desembocadura del río Tapartó sobre el río San Juan, entre las coordenadas 05°42'36.2" de latitud norte y 75°53'16.6" de longitud oeste, a 1193 msnm.

Fase de campo

– Determinación de variables hidráulicas

La velocidad en el cauce se midió por medio de dovelas. Este procedimiento consistió en dividir un determinado número de secciones transversales en franjas verticales sucesivas; consecutivamente se procedió a registrar la velocidad usando un correntómetro a 0,2, 0,6 y 0,8 m de profundidad tomando el promedio entre las tres profundidades.

– Determinación de variables fisicoquímicas y bióticas

La obtención de las muestras fisicoquímicas se hicieron de acuerdo con las recomendaciones establecidas en el Standard Methods (2005) (Camargo & Cruz, 1999). Así, en el sitio se midieron: temperatura ambiente, temperatura del agua, oxígeno disuelto, porcentaje

de saturación de oxígeno, conductividad eléctrica, pH y turbiedad. Todas las mediciones se efectuaron con réplicas para reducir el error experimental. También, se tomaron muestras de agua en recipientes plásticos de 500 ml, para la medición de alcalinidad total, dureza total, dureza cálcica, dureza magnésica, DQO, nitrógeno total, nitritos, nitratos, nitrógeno amoniacal, fósforo total y ortofosfatos.

Los macroinvertebrados acuáticos fueron recolectados a contracorriente por medio de la red Surber con réplica en cada sitio de muestreo. Esta colecta permitió un análisis cuantitativo en tanto a la riqueza de taxa y abundancia. Además, se realizó una colecta cualitativa alrededor del sitio de muestreo por medio de una recolección manual (Aguirre, 2013). Los organismos colectados se depositaron en recipientes plásticos de 50 ml de capacidad y fueron fijados con alcohol al 70 %. Los recipientes estaban debidamente rotulados indicando la fecha, el tipo de muestra y reactivo.

Fase de laboratorio

El análisis de las muestras fisicoquímicas se realizó por vía fotométrica, empleando *kits de spectroquant* en el laboratorio de Ciencias de la Tierra de la Universidad de Antioquia (Seccional Andes).

Para la determinación de los macroinvertebrados acuáticos se emplearon un estereomicroscopio marca Karl Zeiss y estudios como los de Mc Cafferty, 1981; Roldán, 1988; Merrit & Cummins, 1996; Fernández & Domínguez, 2001; Roldán, 2003; Posada & Roldán, 2003; y Domínguez & Fernández, 2009.

Análisis de datos y modelación espacial

Se aplicó un análisis de componentes de varianza (ACV) para determinar el posible efecto del tiempo y el espacio sobre la variabilidad de cada variable fisicoquímica e índices. Se efectuaron análisis de varianza de una vía mediante la prueba de Kruskal-Wallis, y poder así comparar las medianas cuando un factor incidía sobre una variable en más del 30 % en el ACV (Guerra *et al.*, 2011).

Para cumplir con el objetivo de espacializar la información se recurrió al software ArcGis map, en el cual se utilizó como pertinente la cartografía suministrada por la Corporación Autónoma Regional del Norte de Antioquia – Corantioquia, consistente en un mapa

base del IGAC en escala 1:25000, y mapas temáticos de diversa índole. Sobre dicha cartografía en formato vector se añadió la información obtenida en campo debidamente georreferenciada. Cada capa que se generó fue provista de una tabla de atributos con toda la información que arrojaron los análisis de campo y de laboratorio.

RESULTADOS Y ANÁLISIS

Variables hidráulicas

La distribución de la velocidad media de la corriente (ilustración 2) muestra una variación durante las diferentes campañas donde el rango de velocidades osciló entre 0,7 y 1,4 m/s. Los valores más altos se encontraron en el mes de febrero de 2014 en E2 con una velocidad media de 1,3 m/s, y en el mes de mayo de 2014 en E1 y E3 con unas velocidades medias de 1,2 y 1,4 m/s, respectivamente. Debido a dificultades de acceso al sitio de muestreo no fue posible la medición de la velocidad media en E3 en febrero y en E2 en mayo y agosto.

Autores como Ward (1976), Gore (1978) y Brittain & Saltveit (1989), citados por Caicedo *et al.* (2004), suponen que las variaciones de la velocidad media pueden afectar a las comunidades de macroinvertebrados acuáticos respecto a su composición, diversidad y densidad.

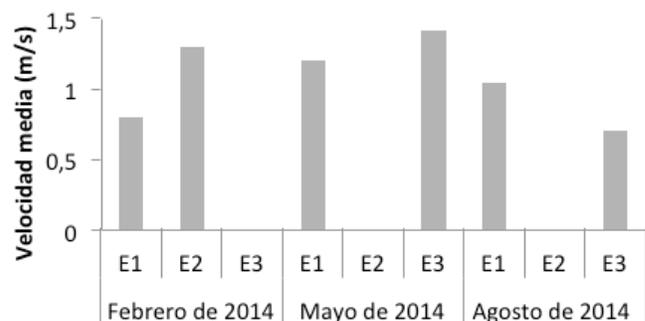


Ilustración 2. Distribución de la velocidad media (m/s) en el río Tapartó.

Variables fisicoquímicas

La alcalinidad total mostró el valor máximo de 20 mg/l CaCO_3 en la E2 del mes de mayo de 2014 y en la E3 en agosto de 2014 y un mínimo de 10 mg/l CaCO_3 en E1 y E2 de los meses de febrero y agosto de 2014

(ilustración 3). Respecto a los resultados obtenidos de alcalinidad total en el río Tapartó, estos presentaron en su mayoría valores inferiores a lo aceptable para la vida acuática (20 mg/l CaCO_3). Sin embargo, la presencia de macroinvertebrados acuáticos y los valores de pH en las diferentes épocas de muestreo infiere que el sistema hídrico se encuentra en equilibrio.

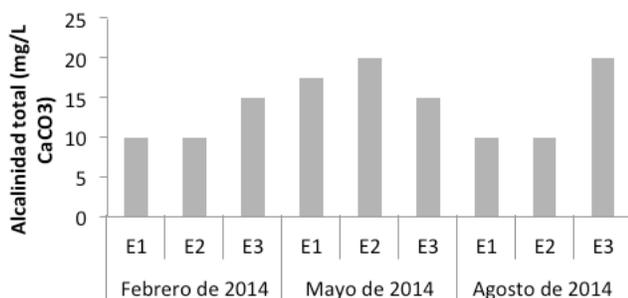


Ilustración 3. Variación espacio-temporal de la alcalinidad total en el río Tapartó.

Los mayores valores encontrados de nitratos (ilustración 4) se presentaron en el muestreo de mayo de 2014 con 4 y 5 mg/l NO_3^- , en contraste, febrero y agosto de 2014 presentaron valores por debajo de 2 mg/l NO_3^- ; siendo estos niveles normales en ríos de alta montaña debido a que son aguas que corren por lechos pobres en nutrientes (Roldán, 1992). Así mismo, esta variable no representa cambios importantes en el espacio-temporal, debido a su baja variabilidad. Por su parte, los valores encontrados en el mes de mayo se pueden relacionar con los usos del suelo en la cuenca del río Tapartó, los cuales en este mes se encontraban en siembra de café, proceso donde utilizan fertilizantes y pesticidas que pueden estar constituidos por nitrógeno y que por escorrentía llegan al río.

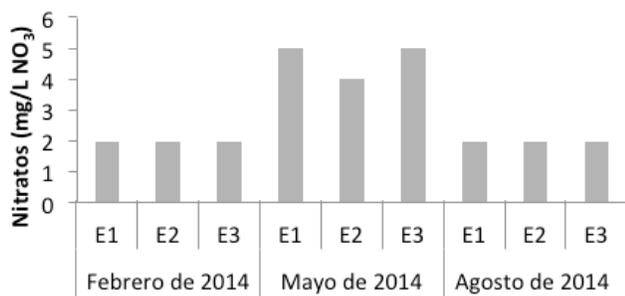


Ilustración 4. Variación espacio-temporal de nitratos en el río Tapartó.

En la ilustración 5 se observa que los valores de la demanda química de oxígeno (DQO), está dentro del rango de 22,5 mg/l DQO en la E1 en agosto de 2014 y 7 mg/l DQO en la E1 en febrero y en la E3 en mayo de 2014. Este rango indica que son aguas superficiales de buena calidad con bajo contenido de materia orgánica (MO) biodegradable y no biodegradable. Sin embargo, los valores más altos de DQO encontrados en el muestreo de agosto pueden estar relacionados con la recolección de café, proceso mediante el cual se vierte al río MO proveniente de esta actividad.

De acuerdo, con la información obtenida de la estación pluviométrica del río San Juan (IDEAM 2014), la relación fue inversamente proporcional ($r=-0.26665$), es decir, a medida que la precipitación aumenta la carga de DQO disminuye como consecuencia de la dilución que ejercen las lluvias sobre la corriente. Esta situación fue muy marcada en el mes de agosto del año 2014 donde se evidencia que a menor precipitación se incrementó la carga de DQO. Pese a lo anterior, la relación entre estas dos variables fue baja dado que la variabilidad de la DQO estaría explicada un 15,2 % por la precipitación. Es factible que haya otros factores que estén incidiendo sobre el fenómeno de contaminación reflejado en la variable DQO, como por ejemplo las faenas cafeteras que producen lixiviados que incrementarían los valores DQO en la corriente.

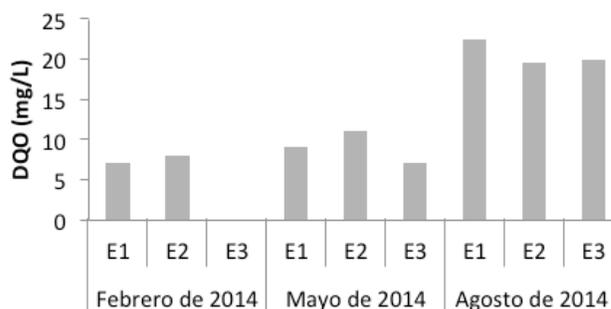


Ilustración 5. Variación espacio-temporal de la demanda química de oxígeno (DQO) en el río Tapartó.

El espectro de absorción del agua medido en las tres estaciones del río Tapartó indicó que la concentración de MO disuelta disminuye aguas abajo del cauce (figura 5). Esto se evidenció claramente en la mayor absorbancia del agua de las E1 y E2 comparada con la E3 entre el rango 200-700 nm. Posiblemente, esto se deba a la dilución por la entrada al río de otros afluentes. Algunos estudios sugieren que la

absorbancia a longitudes de onda en este intervalo corresponde a la presencia de enlaces dobles C=C y compuestos aromáticos típicos de sustancias húmicas (Peña & Palacio, 2008), dado que las sustancias húmicas son conocidas por su biopersistencia (Camargo & Cruz, 1999). De este modo, la evidencia sugiere que la concentración de MO aguas abajo del río Tapartó disminuyó probablemente debido a la dilución en la E3 (Caudal E1 = 11,19 m³/s y el caudal E3 = 12,52 m³/s), es decir, el caudal se incrementó desde la E1 hasta la E3 en 10,63 %. Por otro lado, la distancia lineal entre E1 y E3 es de aproximadamente 19 km, recorrido en el cual la corriente tuvo un incremento de 1,33 m³/s.

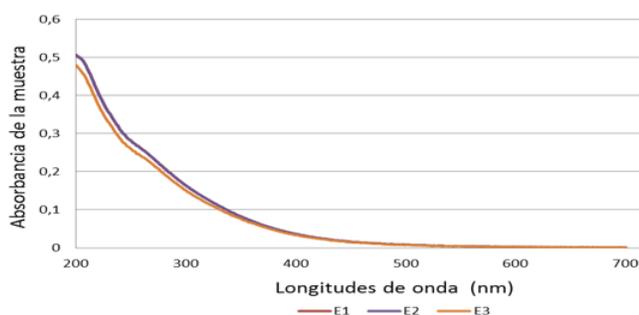


Ilustración 6. Espectro de absorción para sustancias húmicas a diferentes longitudes de onda.

Por último, las variables fisicoquímicas tales como nitrato, N-amoniaco, nitrógeno total, fósforo total y ortofosfato estuvieron por debajo de los límites de detección del método utilizado. Asimismo, temperatura ambiente, temperatura del agua, oxígeno disuelto, % saturación, pH, conductividad eléctrica, dureza total y turbidez estuvieron en los rangos normales.

Macroinvertebrados acuáticos

En la tabla 1 se resaltan los taxa que más predominaron en las tres estaciones. Estos fueron: *Thraulodes*, *Baetodes*, *Leptohyphes*, *Smicridea*, Baetidae y Chironomidae, donde los tres primeros son indicadores de aguas de buena calidad con ligera contaminación, mientras que *Smicridea* se relaciona con buenas condiciones ambientales (Roldán, 1996; Muñoz & Ospina, 1999; Roldán, 2003; Caicedo *et al.*, 2004; Pérez & Segnini, 2005; Liévano & Ospina, 2007).

Tabla 1. Distribución espacial de la comunidad de macroinvertebrados acuáticos capturada en las tres estaciones de muestreo.

Orden	Familia	Género	Estaciones		
			E1	E2	E3
Ephemeroptera	Leptophlebiidae	<i>Thraulodes</i>	X	X	X
		<i>Camelobaetidius</i>		X	X
	Baetidae	<i>Baetodes</i>	X	X	X
		Sin determinar	X	X	X
		<i>Leptohyphes</i>	X	X	X
Odonato	Libellulidae	<i>Brechmorhoga</i>	X	X	
Neuróptera	Corydalidae	<i>Corydalus</i>	X	X	
Coleóptera	Elmidae	<i>Stenelmis</i>		X	X
	Hydrophilidae	Sin determinar	X		
	Elmidae (a)	Sin determinar			X
Lepidóptera	Pyralidae	Sin determinar		X	
Trichóptera	Odontoceridae	<i>Marilia</i>	X		
	Hydropsychidae	<i>Smicridea</i>	X	X	X
Hemiptera	Naucoridae	<i>Limnocois</i>	X		
Plecóptera	Perlidae	<i>Anacroneuria</i>	X		
		<i>Simulium</i>		X	X
	Díptera	Biopharoceridae	<i>Limnicola</i>	X	
Gastropoda	Physidae	<i>Physa</i>		X	
		Sin determinar	X	X	X
Acarí (Acarina)	Hydrachnidae	Sin determinar			X
Total			11	13	14

La composición espacial indica que en las tres estaciones de muestreo se identificaron en total 20 morfotipos (tabla 1), de los cuales 11 se registraron en la E1, 13 en la E2 y 14 en la E3. Por su parte, en la figura 6 se observa que en el mes de agosto de 2014 se presentó el mayor número de individuos recolectados, donde en E3 se obtuvieron 170 organismos, en E2 un total de 137 y 39 en E1. Estos resultados indican que no se presentaron diferencias significativas entre estaciones en relación con la riqueza taxonómica, pero sí en lo que respecta con el número de individuos, en donde en estos últimos se observa en E2 y E3 una distribución temporal muy similar entre taxa. Es de señalar que en los tres diferentes muestreos realizados en febrero, mayo y agosto no se presentaron dificultades para la recolección de la muestra.

Los mayores aportes de organismos corresponden al díptero Chironomidae y al efemeróptero *Camelobaetidium* (Baetidae) en E2 y E3 en el mes de agosto. Aunque no se dispone de datos de caudal para E2 y E3, las observaciones de campo permiten inducir un crecimiento en el caudal en el mes de agosto, favoreciendo una mayor área de inundación permitiendo una mayor recolección de macroinvertebrados acuáticos (ilustración 7).

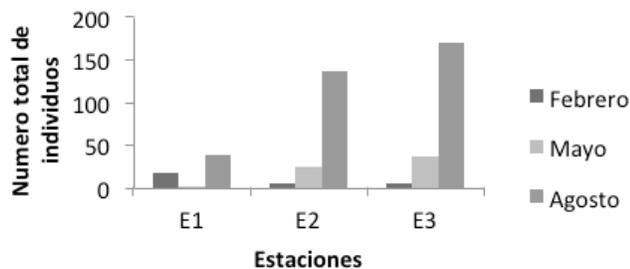


Ilustración 7. Número de individuos encontrados en las diferentes estaciones y fechas de muestreo.

La tendencia temporal registrada en la abundancia también se presenta con la riqueza (ilustración 8), donde en el mes de agosto las estaciones E2 y E3 tuvieron la mayor cantidad de taxa, once, y ocho en la estación E1. En mayo se registra una tendencia similar al muestreo de agosto, pero con un número menor de morfotipos.

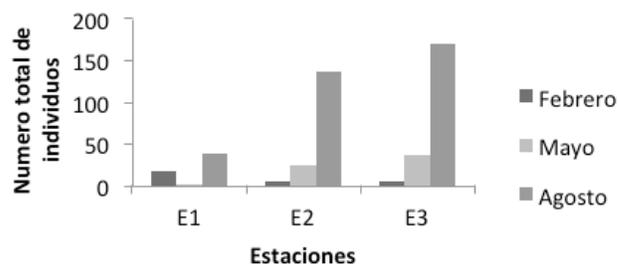


Ilustración 8. Taxa encontrados en las diferentes estaciones y fechas de muestreo.

Mediante el análisis de agrupamiento (ilustración 9), se obtiene un porcentaje de similitud de 81,1 % en el primer grupo representado por las estaciones E2 y E3. Ambos sitios se caracterizan por presentar la mayor abundancia de macroinvertebrados acuáticos. El segundo grupo constituido por la estación E1 registró un porcentaje de similitud del 36,2 %. Estos resultados coinciden con la evaluación de la calidad determinada desde las características de la comunidad de los macroinvertebrados acuáticos, las cuales indican que en E1 se presentan mejores condiciones ambientales que en E2 y E3.

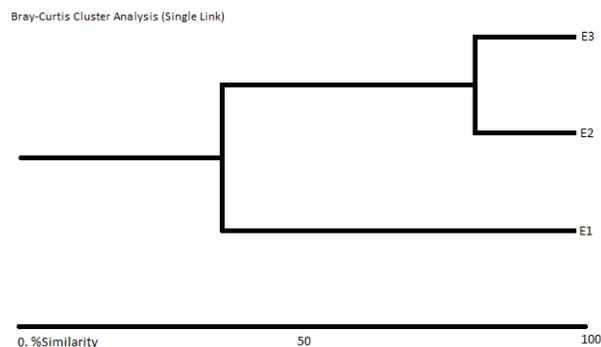


Ilustración 9. Dendrograma de similitud con presencia o ausencia de taxa de macroinvertebrados acuáticos encontradas por estación en el río Tapartó.

Índices de diversidad y sus componentes

El índice de diversidad de Shannon-Weaver (tabla 2), presentó valores bajos (menores a 1 en todos los casos). Según Aguirre & Caicedo (2013) estos resultados indican contaminación orgánica, sin embargo, la composición de la muestra de la comunidad de macroinvertebrados acuáticos refleja aguas de buena calidad a ligeramente contaminadas en las estaciones E2 y E3. Este resultado puede deberse a que en ambas estaciones se recolectó una muestra pequeña.

Tabla 2. Índices de diversidad, dominancia y equidad calculados en los meses de febrero, mayo y agosto de 2014.

Estaciones y fecha de muestreo		Diversidad Shannon-Weaver	Dominancia Simpson	Equidad de Pielou
Febrero de 2014	E1	0.28	0.61	0.59
	E2	0.44	0.26	0.92
	E3	0.21	0.60	0.72
Mayo de 2014	E1	-	-	-
	E2	0.67	0.23	0.79
	E3	0.71	0.24	0.79
Agosto de 2014	E1	0.54	0.30	0.90
	E2	0.51	0.38	0.56
	E3	0.62	0.32	0.59

Los valores del índice de dominancia de Simpson no mostraron una gran diferencia entre estaciones de muestreo en especial en mayo y agosto (tabla 2). Por su parte, el índice de equidad de Pielou registró niveles superiores a 0.50 en todos los casos, lo cual indica que la distribución de los individuos dentro de cada uno de los morfotipos coincide con una uniformidad de media a alta.

Los resultados del índice de Jaccard (tabla 3) infieren una baja similaridad de taxa entre estaciones. En los meses de mayo y agosto en E2 y E3 se registró la mayor similaridad entre sí con 0.50 y 0.58, respectivamente. Resultados que coinciden con la abundancia y riqueza espacial encontrada en ambos sitios en la zona de estudio.

Tabla 3. Índice de similaridad Jaccard registrado en los meses de muestreo en el río Tapartó.

Estaciones y fecha de muestreo	Jaccard	
Febrero de 2014	E1-E2	0.333
	E1-E3	0.000
	E2-E3	0.000
Mayo de 2014	E1-E2	0.143
	E1-E3	0.125
	E2-E3	0.500
Agosto de 2014	E1-E2	0.333
	E1-E3	0.364
	E2-E3	0.583

Índice biológico BMWP /Col

El índice BMWP/Col representado en la ilustración 10, mostró que los mayores valores se encontraron entre 45 y 55 en E1 y E3 en el mes de agosto, resultado que indica aguas contaminadas o de calidad dudosa. En contraste, en febrero se encontraron los valores más bajos, incluidos dentro de un rango de 22 a 38 puntos, significando ambientes muy contaminados o de

calidad crítica. No obstante, una consideración similar a la expresada en relación con la calidad del agua para los resultados obtenidos con el índice de diversidad de Shannon, también se puede aplicar para los resultados del índice biótico BMWP/Col (Roldán, 2003).

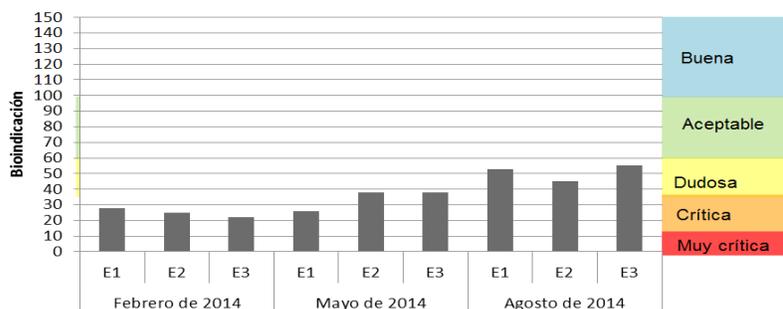


Ilustración 10. Índice biótico BMWP/Col.

Análisis estadísticos

Durante el proceso se examinó la ocurrencia de cada factor en cada una de las variables analizadas donde las más representativas fueron la conductividad eléctrica, DQO, nitrógeno total, nitratos, oxígeno disuelto, temperatura ambiente, turbiedad y pH, que presen-

taron cambios importantes espacio-temporal (ilustración 11), mientras que variables como la temperatura del agua, alcalinidad, nitrito, N-amoniaco, fósforo total, ortofosfato y dureza total no presentaron cambios importantes en la dinámica espacio-temporal.

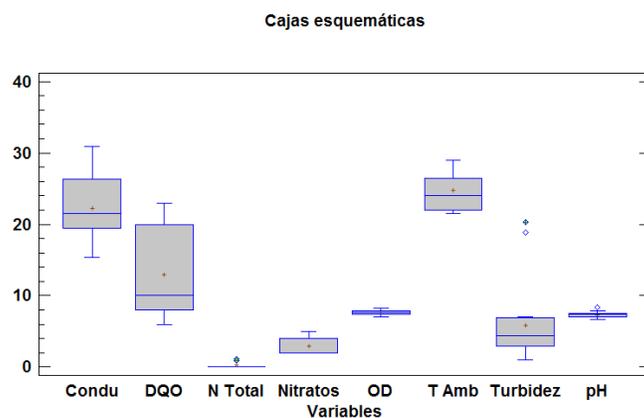


Ilustración 11. Cajas esquemáticas de variables fisicoquímicas.

Análisis Espacial

En el análisis del modelo espacial de la calidad del agua (ilustración 12), se observa cómo la calidad va variando respecto a la actividad agrícola que se encuentra en toda la red de drenaje aguas abajo, donde el río empieza a cambiar sus valores en las variables fisicoquímicas y en la composición de los macroinvertebrados acuáticos correspondiente a las diferentes campañas de muestreo. Lo expresado anteriormente, puede estar muy relacionado con la siembra, reco-

lección y precipitación que acontece en los diferentes meses, ocasionando un aumento de MO, agroquímicos y pesticidas, los cuales llegan al cauce principal ya sea por escorrentía superficial o por descargas puntuales. De acuerdo con lo anterior, se puede estimar que en la zona de estudio la calidad del agua se ve afectada por los procesos de caficultura que se realizan en la trayectoria del drenaje principal, produciendo un leve aumento en la contaminación aguas abajo en las diferentes estaciones.

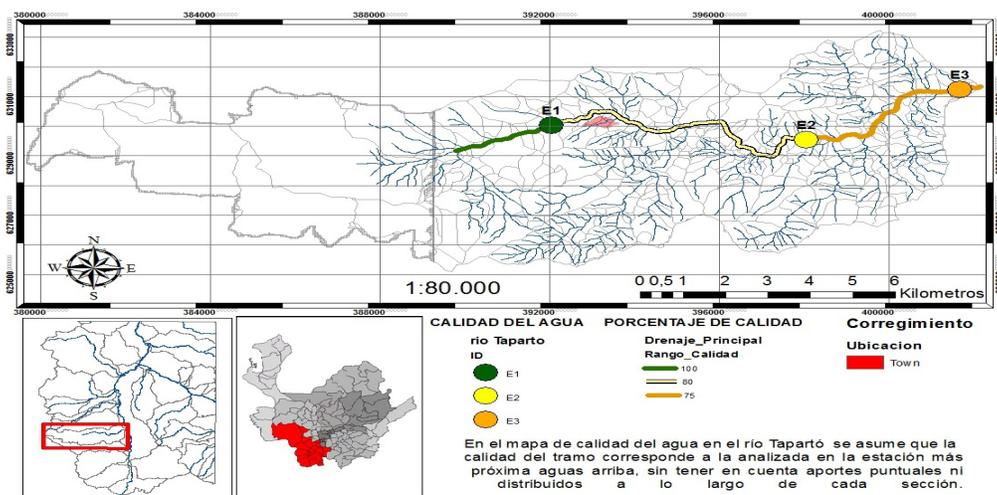


Ilustración 12. Mapa de calidad del agua en la cuenca del río Tapartó.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos de la mayoría de las variables fisicoquímicas como es el caso de pH, oxígeno disuelto, DQO, conductividad eléctrica, temperatura ambiente, temperatura del agua, nitrato, nitrógeno total, turbidez y porcentaje de saturación, estuvieron dentro del rango establecido para aguas naturales.

El río Tapartó es propenso a una contaminación rápida. Esta percepción está respaldada en una baja alcalinidad la cual se encuentra por debajo de una condición aceptable para las aguas naturales, situación que puede estar muy asociada con el aporte de las sustancias húmicas que acidifican este río y lo vuelven vulnerable. De acuerdo con los resultados de sustancias húmicas, las estaciones E1 y E2 no pierden su identidad de MO disuelta.

Considerando la composición de la comunidad de macroinvertebrados acuáticos, se concluye que la mejor calidad biológica del agua se encontró en la E1. Las tres estaciones ubicadas en el río Tapartó se asocian con una calidad biológica del agua de buena a ligeramente contaminada. Sin embargo, en las estaciones E2 y E3 se evidencia un ligero incremento en la contaminación con referencia a la E1. La distribución espacio-temporal de los macroinvertebrados acuáticos sigue la misma tendencia de la calidad del agua en sus diferentes campañas de muestreo.

De acuerdo con los valores del índice biótico BMWP/Col obtenidos durante las tres campañas de muestreo, las estaciones ubicadas sobre el río Tapartó se

relacionan con ambientes contaminados. No obstante, estos resultados están más condicionados con el tamaño de la muestra que con la caracterización ambiental espacial que se presenta en el tramo de estudio del río Tapartó.

Según el modelo espacial las zonas de mayores aportes de contaminación están ubicadas desde la E1 a la E3. Esto se debe a las actividades antrópicas que se desarrollan en la cuenca principalmente la caficultura donde hay procesos de siembra y recolección, que aportan MO al río.

De acuerdo con el modelo de calidad del agua, los valores hidráulicos, fisicoquímicos, el dendrograma y el índice de similaridad de Jaccard (este último tiene que ver con los macroinvertebrados acuáticos), se concluye que el río Tapartó presenta cambios en la calidad del agua que están vinculados con los diferentes procesos de aprovechamiento del café que se dan a través del año.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio se realizó gracias al apoyo del Comité Central de Investigación (CODI) de la Universidad de Antioquia, a los grupos de investigación GeoLimna y GDECON, a la Escuela Ambiental de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia, al Laboratorio de Hidrobiología Sanitaria y al Laboratorio de Ciencias de la Tierra de la Seccional Suroeste de la Universidad de Antioquia en Andes, Antioquia. Así mismo, a los estudiantes de pregrado de los programas de Ingeniería

Sanitaria y Ambiental Karol Solórzano y César Olmos y a la estudiante de Ingeniería Agropecuaria Jenny Mesa, quienes nos acompañaron durante todos los momentos de muestreo. Finalmente a Corantioquia quien facilitó la base cartográfica digital con la que se hicieron los análisis y modelación espacial.

REFERENCIAS

- Aguirre, N. & Caicedo, O. (2013). *Métodos de campo y de laboratorio para hidrobiología sanitaria*. Reimpresos Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia.
- Aguirre, N. (2013). *Hidrobiología Sanitaria*. Ude@, Escuela Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia, 202 pp. ISBN 978-958-8790-55-8.
- American Public Health Association. (2005). American Water Works Association and Water Environment Federation, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 21st edition. (Método Estándar para el Examen de Agua y Agua Residual, décimo octava edición). American public Health Association, Washington, D. C., EE. UU. ISBN: 0875530478.
- Caicedo, O., Jaime, P. & Néstor, A. (2004). Macroinvertebrados acuáticos. pp. 84-98. En: Aguirre, N, Palacio, J., Wills, T. (Eds), *Caracterización de los principales aspectos fisicobióticos de la microcuenca de la quebrada La Vega, municipio de San Roque, Antioquia*. Imprenta Universidad de Antioquia, Medellín. ISBN 958-33-7192-0. 2004.
- Camargo, M. & Cruz, L. (1999). Sustancias Húmicas en Aguas para Abastecimiento. *Revista Ingeniería e Investigación*, 44, 63-72
- Castellano, H. (2010). *Aplicación de índices de calidad del agua en sistemas epicontinentales colombianos y recomendaciones para su uso*. Universidad Industrial de Santander.
- Domínguez, E. & Fernández, H. (Ed). (2009). *Macroinvertebrados bentónicos sudamericanos. Sistemática y biológica*. Fundación Miguel Lillo. Argentina. 654 p.
- Executive Summary of the UN World Water Development Report. (2003). *Water for people, water for life*. First published by the United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO).
- Fernández, H. R. & Domínguez, E. (eds). (2001.) *Macroinvertebrados bentónicos sudamericanos: una guía práctica*. Tucumán (Argentina): EUDET. Universidad Nacional de Tucumán. Serie Investigaciones de la U.N.T. Subserie: Ciencias Exactas y Naturales. Vol. 1, p. 282.
- IDEAM. (2014). Datos pluviométricos de la corriente del río San Juan. Tomado de: <http://www.ideam.gov.co/>.
- Liévano, A. & Ospina, R. (2007). *Guía ilustrada de los macroinvertebrados acuáticos del río Bahamón*. Primera edición. Universidad El Bosque & Instituto Alexander von Humboldt. Bogotá D. C., Colombia.
- Mc Cafferty, W. P. (1981). *Aquatic Entomology*. Jones and Bartlett Publisher. Boston. U.S.A.
- Merrit, R. & Cummins, K. (1996). *An Introduction to the Aquatic Insects of North America*. Kendal/Hunt Publishing. Third edition.
- Milán, W., Caicedo, O., & Aguirre, N. (2011). Quebrada La Popala: un análisis de calidad del agua desde algunas variables fisicoquímicas, microbiológicas y los macroinvertebrados acuáticos. Colombia. *Revista Gestión y Ambiente*, 14(1), 85-94.
- Montoya, Y., Aguirre, N., Caicedo, O., & Palacio, J. (2010). Dinámica multianual de los macroinvertebrados acuáticos bentónicos en la quebrada Vegas de la Clara. *Revista Investigación, Biodiversidad y Desarrollo*, 29(2), 201-210.
- Muñoz, F. & Ospina, R. (1999). Guía para la identificación genérica de los Ephemeroptera de la Sabana de Bogotá, Colombia. Ninfas y algunos géneros de adultos. *Actualidades Biológicas* 21(70), 47-60.
- Peña, D. & Palacio, J. (2008). Comportamiento del carbono orgánico en la ciénaga de Ayapel, Colombia. GAIA. Medellín, Colombia. 110 p.

- Pérez, B. & Segnini, S. (2005). Variación espacial de la composición y diversidad de géneros de Ephemeroptera (Insecta) en un río tropical altiandino. *Revista ENTOMOTROPICA*, 20(1), 49-57.
- Pielou, E. C. (1996). *Ecological Diversity*. Wiley New York, 165 p.
- Plan de Desarrollo Municipal. (2008-2011). Municipio de Andes (Antioquia, Colombia), 35 p.
- Posada, J. A. & Roldán, G. (2003). Clave ilustrada y diversidad de las larvas tricóptera en el nor-occidente de Colombia. *Caldasia* 25(1), 169-192.
- Roldán, G. (1988). *Guía para el estudio de los macroinvertebrados acuáticos del departamento de Antioquia*. Universidad de Antioquia. FEN-Colciencias. Editorial Presencia, Bogotá.
- Roldán, G. (1992). *Fundamentos de Limnología Neotropical*. Editorial Universidad de Antioquia, Medellín. 529 p.
- Roldán, P. (1996). *Guía para el estudio de los macroinvertebrados acuáticos del departamento de Antioquia*. FEN-Colombia, Colciencias - Universidad de Antioquia, Medellín. 217 p.
- Roldán, G. (2003). *Bioindicación de la calidad del agua en Colombia (Uso del método BMWP/Col)*. Universidad de Antioquia. 170 p.
- Rosenberg, D. M. & Resh, V.H. (1993). *Freshwater bio-monitoring and benthic macroinvertebrates*. New York: Chapman & Hall 1993. 488 p.
- Shannon-Weaver, C. E. (1949). *The mathematical theory of communication*. The University of Illinois Press.
- Simpson, E. H. (1949). Measurement of diversity. *Nature* 163(4148), 688.

Alimentos funcionales, alfalfa y fitoestrógenos

Alejandro De Jesús Cortés-Sánchez,¹ José Rubén León-Sánchez,²
Francisco Javier Jiménez-González,² Mayra Díaz-Ramírez,³
Adriana Villanueva-Carvajal,⁴ Cynthia A. Guzmán-Medina⁵

¹Secretaría de Salud. Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios. Departamento de Microbiología, Tlalpan, Ciudad de México, México. *Autor de correspondencia: alecortes_1@hotmail.com

²Facultad de Medicina UAEMex, Av. Paseo Tollocan esq. Jesús Carranza N° 134 502, residencial Colón y Col. Cipres. C.P. 50120 Toluca de Lerdo, Estado de México, México.

³Departamento de Alimentos. División de Ciencias Biológicas y de la Salud. Universidad Autónoma Metropolitana (UAM), Unidad Lerma. Estado de México, México.

⁴Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma del Estado de México, Campus Universitario "El Cerrillo" A.P. 435, Toluca, Estado de México C.P. 50200, México.

⁵Secretaría de Salud. Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios. Control Analítico, Tlalpan, Ciudad de México, México.

Functionals foods, alfalfa and phytoestrogens

ABSTRACT

Functional food development has been increased during the last years due to the population interest in foods that have not only a nutritional function but a health benefit as well reducing the risk of suffering several diseases. Alfalfa has been intended as cattle feed, although several investigations have reported that alfalfa contains bioactive compounds –phytochemicals- proteins with an estrogenic effect, and antimicrobial and antioxidant compounds, being classified as a functional food with protection against cancer, diabetes and cardiovascular and other diseases. The aim of the present study is to offer a general information outline, through a bibliographic review, of functional foods' status, focusing on alfalfa and its phytochemicals (phytoestrogens), compounds that give it its functional food character and its adverse effects shown in the reproductive system of experimental animals as well. Such dichotomy between adverse and beneficial effects is the sign that shows that it is needed more information and more studies to be done in order to establish the effect of phytoestrogens in the development and reproductive function in animals, its agonistic and antagonistic effect and risk-benefit balance in its consumption.

Editor: Hernández Fernández, J.

Citation: Cortés, A., León, J., Jiménez, F., Díaz, M., Villanueva, A & Guzmán, C. (2016). Alimentos funcionales, alfalfa y fitoestrógenos. *Revista Mutis* 6(1), 28-40, doi: <http://dx.doi.org/10.21789/22561498.1110>

Received: February 23, 2016; **Accepted:** March 31, 2016; **Published on line:** May 31, 2016.

Copyright: ©2016 Cortés, A., León, J., Jiménez, F., Díaz, M., Villanueva, A & Guzmán, C. This is an open-access article, which permits unrestricted use, distributions and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Competing Interests: The authors have no conflict of interest.

Keywords: foods, bioactive, phytochemicals, coumestrol, phytoestrogens.

RESUMEN

El desarrollo de alimentos funcionales en los últimos años ha ido en aumento debido principalmente, al interés de la población por alimentos que no solo cumplan con la función nutricional sino también por que tengan un efecto benéfico en salud reduciendo así el riesgo a padecer diversas enfermedades. La alfalfa ha sido generalmente un alimento destinado para la ali-



mentación del ganado, sin embargo, en diversas investigaciones alrededor del mundo se ha reportado que contiene compuestos bioactivos –fitoquímicos– y proteínas con efecto estrogénico, antimicrobiano y antioxidante, así como también protector contra enfermedades cardiovasculares, cáncer y diabetes, entre otras, clasificándola potencialmente como un alimento funcional. El presente documento tiene como objetivo dar un bosquejo general informativo a través de la búsqueda y revisión bibliográfica acerca de los alimentos funcionales y en especial de la alfalfa y constituyentes fitoquímicos (fitoestrógenos) que la ubican dentro de este grupo de alimentos; así como los hallazgos que se han reportado como efectos adversos en animales experimentales específicamente en el aparato reproductivo debido al consumo de este tipo de fitocompuestos. Esta dicotomía entre los efectos adversos y benéficos no es más que la señalización de que aún falta mucha más información y estudios que realizar respecto al resultado que pueden tener los fitoestrógenos en el desarrollo y función reproductiva de animales, el agonismo y antagonismo de su efecto así como la concordancia en el riesgo-beneficio de su consumo.

Palabras clave: alimentos, bioactivo, fitoquímicos, coumestrol, fitoestrógenos.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad la elaboración, autosuficiencia y disponibilidad de alimentos se destaca por ser un tema de gran importancia, ya que una nutrición adecuada, requiere de seguir una dieta que sea suficiente y equilibrada que incluya los nutrientes básicos que recomiendan los expertos (Martínez y Villezca, 2015).

El acelerado estilo de vida actual ha generado cambios en la alimentación a nivel mundial. Los nuevos y algunas veces poco saludables hábitos alimenticios de la población junto con factores como el sedentarismo y estrés, favorecen el incremento de enfermedades como diabetes, obesidad, hipertensión arterial y cáncer, entre otras, generándose así un problema de salud pública alrededor del mundo. Por otra parte, en países en desarrollo las desigualdades económicas hacen que gran parte de la población no acceda a los alimentos de calidad o en cantidad suficiente, ocasionando episodios de desnutrición y retraso en el desarrollo físico (Rubiano, 2006).

Otro punto importante en el ámbito de los alimentos es la inocuidad, que de acuerdo a la Organización Mundial de la Salud (OMS), es la nulidad para generar efectos o daños nocivos a la salud humana por parte de los alimentos al ser consumidos. Para tal fin se incluyen políticas y estrategias que engloban en sí toda la cadena alimenticia desde su manufactura hasta su consumo. Así, la inocuidad debe ser el común denominador; es decir, desde los productores primarios, sean del campo o del mar, hasta que el alimento llega a la mesa del consumidor, donde se requiere observar prácticas en cada etapa del proceso que aseguren la inocuidad de los alimentos (OMS, octubre, 2009; Badui, 2015).

Como consecuencia de la falta de inocuidad en los alimentos, se presentan las llamadas enfermedades transmitidas por alimentos (ETA), las cuales tienen impacto social y económico por los gastos médicos y hospitalarios involucrados, por el ausentismo laboral y bajo rendimiento en el trabajo que afecta la productividad de las empresas, y por el potencial daño permanente como secuela de la enfermedad y por muerte las cuales se estiman en 200 millones de personas al año en el mundo. Desde hace ya varios años la inocuidad se ha considerado un tema relevante para los consumidores y en consecuencia, para la industria alimentaria mundial; para lo cual cada país cuenta con requerimientos oficiales dirigidos a la industria de alimentos a fin de garantizar la inocuidad alimentaria. Para asegurar la inocuidad, la industria alimentaria alrededor del mundo dispone de diversos sistemas internacionalmente reconocidos, como son: Safe Quality Food (SQF), International Food Standard (IFS), British Retail Consortium (BRC), Food Safety System Certification (FSSC), American Institute of Baking (AIB) y Grocery Manufacturers Association (GMA-safe). Todos reconocidos por el Global Food Safety Initiative (GFSI) y fundados en buena parte en la implementación del Hazard Analysis and Critical Control Points (HACCP), que a su vez tiene base en el cumplimiento de las buenas prácticas de manufactura o requisitos y los procedimientos operativos de estandarización de saneamiento. En México de manera general, las preocupaciones del público consumidor sobre la inocuidad están relacionadas con la presencia de plaguicidas y de aditivos alimentarios (especialmente conservadores y colorantes), mientras que las autoridades sanitarias presentan un énfasis y cuidado por contaminaciones

con agentes microbiológicos y químicos. Así, para realizar acciones que conduzcan a la inocuidad en toda la cadena alimentaria se requiere de muchos controles y normatividades por diferentes organismos, tales como la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Social, Pesca y Alimentación (SAGARPA), Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria (SENASICA), Dirección General de Inocuidad Agroalimentaria, Avícola y Pesquera (DGIAAP), Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios (COFEPRIS) y Procuraduría Federal del Consumidor (PROFECO); donde cada entidad solicita determinados requerimientos que la cadena alimentaria debe cumplir (Badui, 2015).

Por otra parte, a nivel internacional además del tema de la inocuidad alimentaria, el interés desde hace ya varios años se ha ido inclinando a la relación entre alimentación y salud, y los objetivos sanitarios a los que se dirigen los alimentos funcionales están enfocados a diferentes enfermedades de considerable valor social y económico buscando así soluciones a los problemas de desnutrición, falta de desarrollo físico, aumento en la incidencia de enfermedades crónicas no transmisibles (ECNT) como diabetes, hipertensión arterial, obesidad, sobrepeso, síndrome metabólico e hipercolesterolemia, osteoporosis, cáncer (estrés oxidativo), y el crecimiento y desarrollo en etapas periconcepcional, fetal, perinatal, adolescencia, embarazo, así como a los efectos de la nutrición sobre las funciones cognitivas, inmunitarias, capacidad de trabajo, crecimiento y composición corporal y rendimiento deportivo. Estudios científicos y desarrollos tecnológicos pretenden fomentar el consumo de alimentos que además de una nutrición básica aporten beneficios adicionales para la salud y bienestar de la población, teniendo en cuenta sus características genéticas, ambientales, sociales y culturales. De tal manera, que en el futuro los alimentos puedan no solo permitir un crecimiento y desarrollo óptimo desde la gestación y en todas las etapas de la vida, sino que también puedan potenciar las capacidades físicas y mentales del individuo, y disminuir el riesgo a padecer enfermedades. Además, la población general está cada vez más consciente de su autocuidado y busca en el mercado productos que contribuyan a su salud y bienestar (Araya y Lutz, 2003; Rubiano, 2006; Olagüero *et al.*, 2007; Ortega *et al.*, 2010).

En diversos países se han desarrollado estrategias que están encaminadas a reducir el riesgo de desarrollar enfermedades crónicas no transmisibles (ECNT) de la población, a través de promover en la dieta el consumo de alimentos, que contengan, por ejemplo, fuentes de fibra dietética como legumbres, cereales integrales, vegetales y frutas; pues estas están asociadas estrechamente con la dieta alimenticia (Alvídrez *et al.*, 2002; Bolet y Socarrás, 2010).

El estudio de la relación entre alimentación y salud, tiende a ser una acción más preventiva que correctiva de déficits nutricionales, esto porque hay investigaciones que asocian el consumo de alimentos vegetales (frutas, verduras, cereales y leguminosas) con efectos protectores contra enfermedades crónicas degenerativas, el cáncer y enfermedades cardiovasculares. Dicha correspondencia se encuentra sustentada a su vez por estudios epidemiológicos *in vivo*, *in vitro* y clínicos que muestran la relación inversa entre la presencia de estas enfermedades y el consumo de vegetales en la dieta (Araya y Lutz, 2003; Chasquibol *et al.*, 2003).

En la presente revisión se aborda de manera general e informativa el tema de los alimentos funcionales, las razones por las que han ido adquiriendo relevancia en los últimos años en el área de salud y ciencia de los alimentos tanto para la sociedad como para la investigación, así como los compuestos químicos presentes y su modo de acción, principalmente los provenientes de las leguminosas. Dentro de este contexto se aborda el caso de la alfalfa ya que debido a su naturaleza, composición y efectos biológicos, hoy en día se le categoriza potencialmente como un alimento funcional. Así mismo, también se aborda el probable efecto antagonista reportado por diversos investigadores de los fitoquímicos –fitoestrogenos– que contienen la alfalfa y otros vegetales, en animales.

Alimentos funcionales

En los países industrializados el concepto de nutrición ha ido cambiando, desde el significado básico del aporte de nutrientes necesarios para que un organismo desarrolle sus funciones, hasta la concepción actual que considera a los alimentos como promotores de la salud (Lorente y Serra, 2001).

Los alimentos funcionales se definen como los productos alimenticios de origen animal o vegetal, consumidos en la dieta diaria, que además de aportar nutrientes poseen componentes bioactivos que ejercen efectos fisiológicos o psicológicos más allá de su valor nutricional que resultan benéficos para la salud, reduciendo el riesgo de contraer alguna enfermedad (Lorente y Serra, 2001; Araya y Lutz, 2003; Serrano *et al.*, 2006).

Los alimentos funcionales tienen su origen en el interés creciente de la población por la relación entre la alimentación y la salud, el envejecimiento progresivo, aumento de enfermedades atópicas, preocupación por reducir costos sanitarios, relevancia del etiquetado nutricional, prevención de enfermedades y desarrollo tecnológico. Además, factores como el estilo de vida, hábitos alimentarios, edad, sexo, estado físico y de salud generan distintos grupos poblacionales y estos demandan diferentes necesidades de alimento, por lo que la diversificación de los alimentos funcionales puede aplicarse en función de cubrir las necesidades de los distintos grupos. Cabe señalar que el efecto de un alimento funcional será significativo o nulo en función de la dieta o los hábitos alimenticios de la población a quien se dirige. Algunos grupos que pueden potencialmente beneficiarse de los alimentos funcionales son: a) Grupos con necesidades especiales tales como mujeres embarazadas, posmenopáusicas, en etapa fértil, niños en crecimiento, fumadores y personas de la tercera edad. b) Personas con dietas inapropiadas o poco saludables, mujeres con dietas restrictivas para perder peso, deportistas de alto rendimiento. c) Personas bajo tratamientos farmacológicos que interfieren en la absorción de nutrientes, consumo frecuente de laxantes, personas con padecimientos en el aparato gastrointestinal (enfermedad de Crohn, intolerancia a la lactosa, síndrome de intestino corto) d) Vegetarianos. Se debe eliminar la idea de que estos alimentos cambiarán por arte de magia los errores dietéticos tanto en exceso como por defecto, fortaleciendo la necesidad de llevar una dieta equilibrada y variada así como la práctica regular de actividad física (Varela, 2010).

El fomento de la salud es un tema de gran consideración para todos los individuos y profesionales sanitarios, que a su vez favorece la investigación y desarrollo en el campo de los alimentos funcionales los

cuales se han llegado a clasificar en base al beneficio en la salud al que se asocian o patologías que pueden prevenir o controlar (Ortega *et al.*, 2010). Así, algunos alimentos y en específico los de origen vegetal, son altamente apreciados por su potencial terapéutico atribuido a su contenido de algunos componentes provenientes del metabolismo secundario de las plantas y conocidos como fitoquímicos bioactivos (polifenoles, fenoles, isoprenoides, ácidos grasos esenciales, terpenos, organosulfurados, β -glucanos) (Serrano *et al.*, 2006; Pérez y Ávalos, 2009). Se han descrito 11 categorías de ingredientes con actividad fisiológica presentes en gran variedad de alimentos, las cuales son: fibras alimentarias, oligosacáridos, alcoholes derivados de azúcares, ácidos grasos poliinsaturados, péptidos y proteínas, glucósidos, isoprenoides, vitaminas, alcoholes, fenoles, colinas (lecitina), bacterias del ácido láctico, y minerales, entre otros (Cortés *et al.*, 2005).

Los alimentos son considerados un gran complejo químico y biológico, resultante de las interacciones de sus constituyentes naturales y operaciones industriales-culinarias que se emplean para su consumo, dando lugar a su vez a cambios profundos en las propiedades fisicoquímicas del alimento, determinando en buena parte la biodisponibilidad de sus componentes y su función en el metabolismo intermedio. Lo anterior, ha representado una oportunidad para la industria alimentaria, de generar nuevas líneas de productos, con valor agregado y de afinidad con los consumidores (Araya y Lutz, 2003; Cortés *et al.*, 2005).

Se han desarrollado diversos procedimientos para producir alimentos funcionales que consisten en:

1. Incrementar la concentración de un componente natural del alimento para alcanzar una concentración que se espera que induzca los efectos deseados, por ejemplo, la fortificación con micronutrientes para lograr una ingesta mayor que las recomendaciones dietéticas, compatible con los valores sugeridos para disminución de riesgos de enfermedades.
2. Agregar un componente que no está normalmente presente en la mayor parte de los alimentos.
3. Reemplazar un componente del alimento, generalmente un macronutriente cuya ingesta

sea excesiva y que muestre efectos nocivos, por ejemplo el reemplazo de grasa por fibra dietética, componente beneficioso para la salud. Hay que mencionar que el advenimiento de la ingeniería genética, así como técnicas en cultivo y cría, incorporación a granel e ingeniería de matrices por impregnación a vacío (IV) descrito a través de la acción del mecanismo hidrodinámico (HDM) transporte de materia en un sistema sólido poroso-líquido, han dado más opciones para la fabricación de alimentos funcionales (Araya y Lutz, 2003; Cortés *et al.*, 2005).

Así mismo, hay que considerar que existen fases en el desarrollo de alimentos funcionales como son: la selección y definición de compuestos fisiológicamente activos, el desarrollo de técnicas para identificar y valorar la actividad de dichos ingredientes en materia prima y producto terminado, el estudio de propiedades físicas, químicas y biológicas del alimento,

el análisis de los procesos de absorción y de metabolización del ingrediente con actividad fisiológica por el organismo, el estudio mediante procedimientos acelerados de la estabilidad del constituyente activo en la fórmula final en distintas condiciones, la valoración de efectos beneficiosos en un modelo animal preparándose para los ensayos clínicos, los estudios de toxicidad aguda y crónica en modelos animales, y el establecimiento de dosis mínimas, máximas y experimentación clínica siguiendo protocolos científicos adecuados en adultos, niños sanos, así como en enfermos y personas mayores (si en ellos tuviera indicación el principio activo)(Cortés *et al.*, 2005).

Existen diversos alimentos funcionales los cuales incluyen una gran variedad de ingredientes alimenticios clasificados por su función, en probióticos, prebióticos, simbióticos, proteínas o péptidos, lípidos, minerales, vitaminas, fenoles o polifenoles y compuestos azufrados (tabla 1).

Tabla 1. Ingredientes funcionales o componentes bioactivos presentes en los alimentos, definición y beneficios a la salud.

Ingrediente funcional	Definición o característica	Ejemplos	Beneficios a la salud
Probiótico	Microorganismos vivos específicamente bacterias, que administrados en dosis adecuadas, no causan efectos patológicos y confieren beneficios en salud al hospedero.	<i>B. bifidum</i> <i>Saccharomyces boulardii</i> <i>L. acidophilus</i> <i>L. casei</i> <i>Propionibacterium freudenreichii</i>	Reducción de intolerancia a la lactosa, diarreas infecciosas, estimulación de sistema inmunológico
Prebiótico	Ingredientes resistentes a la digestión intestinal con capacidad fermentable que favorecen el crecimiento de bacterias y dinamismo colónico con efectos benéficos para el organismo huésped.	Galacto-oligosacáridos, ácido lactobiónico, inulina y fructooligosacáridos (FOS), lignina, celulosa, pectinas, β -glucano	Regulación y salud intestinal Reducción de riesgos hacia estreñimiento, diarreas infecciosas, osteoporosis aterosclerosis y enfermedad cardiovascular obesidad, diabetes mellitus tipo 2, hipocolesterolemico e hipolipemiente
Simbiótico	Mezcla de uno o más probióticos con uno o varios compuestos prebióticos.	<i>Lactobacillus casei</i> Sancor CRL 431+ <i>Lactobacillus acidophilus</i> Sancor CRL 730 (johnsonii) + Fructanos naturales (Inulina-FOS). <i>Bifidobacterium animalis</i> DN 173010 + Prebiótico FOS (inulina).	Favorecer el desarrollo/actividad de los probióticos para potenciar sus propiedades saludables, generando un efecto sinérgico. Esto implica que un producto solo puede ser denominado simbiótico si demuestra favorecer un efecto beneficioso mayor al de la suma de los generados, separadamente, por sus integrantes.

Proteínas o péptidos	Compuestos poliméricos formados por aminoácidos unidos a través de enlaces peptídicos.	Casokinas, α 1-caseína, b-caseína, K-caseína, lactokinas, lactoferrinas.	Inmunomoduladores, antimicrobianos, y antihipertensivos.
Lípidos	Moléculas generalmente hidrofóbicas constituidas por cadenas alifáticas saturadas o insaturadas, lineales o aromáticas. Además de contener carbono, hidrogeno, oxígeno, fosforo, azufre y nitrógeno, entre otros.	Acido butírico, ácido linoleico, ácido linoleico conjugado, fosfolípidos, ácido eicosapentaenoico, (20:5n-3) y el DHA docosahexaenoico, (22:6n-3), terpenos, esteroides, isoprenoides mixtos, esteroles.	Reducción de riesgo de enfermedades cardiovasculares, hipocolesterolemico, antiinflamatorio, antitromboticos.
Minerales	Elemento químico inorgánico de composición definida.	Ca, Fe, Mg, Se.	Prevención y control de osteoporosis, anemia ferropénica, protector frente a enfermedades cardiovasculares y degenerativas.
Vitaminas	Sustancias orgánicas, algunas esenciales para la nutrición y mantenimiento de funciones metabólicas en la célula.	A, D, E, K, y C.	Antioxidantes, prevención y control de osteoporosis, disminución del riesgo enfermedad cardiovascular, mejora de la salud cutánea y retraso del envejecimiento de la piel.
Fenoles o Polifenoles	Conjunto heterogéneo de moléculas con la similitud de compartir en su estructura uno varios grupos bencénicos sustituidos por funciones hidroxílicas.	Curcumina, ácido cafeico, ferúlico, y clorogénico, flavonas, flava nonas, catequinas, antocianinas, isoflavonas, coumestanos y lignanos.	Reducen el riesgo de enfermedades cardiovasculares, neoplasias, antioxidantes, antimicrobianos, estrogenicos.
Compuestos azufrados	Compuestos organosulfurados solubles e insolubles en agua, algunos además contienen nitrógeno.	S-alilcisteína, S-alilmercaptocisteína, sulfuro de dialilo, disulfuro de dialilo, trisulfuro de dialilo.	Antioxidante, reducción de LDL sanguíneos, anti-inflamatorio, antiatrogénico, antitrombótico relacionado a su capacidad de inhibir la síntesis de prostanoides.

Los alimentos funcionales son un mercado en aumento que mueve al año alrededor del mundo aproximadamente 100.000 millones de euros (Murcia, 2013). Estadísticas de países desarrollados registran un creciente y acelerado consumo de productos alimenticios que ofrezcan beneficios para la salud, siendo esto por tanto un indicador del interés que existe por mejorar la nutrición y la salud de la población (Madrigal y Sangronis, 2007). Tan solo en los Estados Unidos se estima por este tipo de alimentos una facturación cercana a los 40.000 millones de euros, y en países como Japón y miembros de la Unión Europea se encuentran cada vez mejor posicionados, además se ha pronosticado una mayor expansión en los próximos años en países con potencial industrial como: China, India, Australia, Malasia o Corea del Sur, esto debido al aumento en incidencia de enfermedades cardiovasculares, además de problemas intestinales y alergias, que han popularizado el consumo de alimentos funcionales alrededor del mundo y que los consumidores los consideren, cada vez más a la hora de realizar las compras (Murcia, 2013). Aunado a lo anterior también continúa en incremento en el número de estudios científicos con el fin de demostrar los beneficios

de los alimentos funcionales en la prevención de diversas enfermedades como las cardiovasculares y el cáncer (Madrigal y Sangronis, 2007).

El éxito de la industria alimentaria depende de la capacidad de adaptación e innovación de productos de calidad que satisfagan las expectativas y respondan a las necesidades sociales de los consumidores. La importancia de la innovación, transferencia y evolución, debe extenderse a la comunicación, búsqueda de información, de gobiernos, sociedades, y alianzas. Además, para conseguir una política de innovación, la empresa puede optar por el desarrollo interno de tecnología o bien por su transferencia. Los países líderes en investigación y desarrollo y por ende con los avances más importantes en el desarrollo de alimentos funcionales son los Estados Unidos, Japón, Alemania, Reino Unido y Francia (Cortés *et al.*, 2005).

Los alimentos funcionales de origen vegetal representan una potencial fuente de componentes bioactivos (presentan actividad biológica en las células así como en los mecanismos fisiológicos con efectos benéficos para la salud) denominados fitoquímicos, siendo una amplia variedad de vegetales altamente apreciados

por su potencial terapéutico atribuido al contenido de estos compuestos, los cuales son de sumo interés en la industria farmacéutica para el desarrollo de fármacos. Dentro de los fitoquímicos bioactivos en los alimentos están los fitoestrógenos, un grupo de compuestos no esteroideos que comprenden: isoflavonas (daidzeína, genisteína, biochanina A, gliciteína), coumestanos (coumestrol), lignanos (enterodiol y enterolactona) y flavonoides (naringenina), siendo las fuentes más abundantes las legumbres, frutas y leguminosas como trébol, alfalfa, soya, cascarilla de semilla de linaza y centeno (tabla 2) (Garrido *et al.*, 2003; García y López, 2004; Serrano *et al.*, 2006; Lenis *et al.*, 2010; Cendales y Silva, 2011).

Los fitoestrógenos como las isoflavonas se encuentran en una variedad de vegetales, en forma de glicósidos (compuestos formados por la unión de uno o más carbohidratos con moléculas de diferente naturaleza química). Así, fitoquímicos como la genisteína, daidzeína y gliciteína en su forma glicosilada al ser ingeridas son hidrolizadas a agliconas (carbohidratos u oligosacaridos que forma parte del glicósido), su forma activa por bacterias en el intestino delgado. Las agliconas son absorbidas por la mucosa intestinal y transportadas por la vena porta hasta el hígado, donde por acción de las enzimas glucoroniltransferasas y sulfotransferasas, forman conjugados de glucorónidos y sulfatos, siendo la primera la principal vía de biotransformación; posteriormente son excretados por la bilis y la orina. Sin embargo, estudios acerca de la biodisponibilidad de las isoflavonas mencionan que esta es mayor cuando se ingieren como β -glicósidos que como agliconas. Por lo tanto, las etapas de biotransformación son de gran importancia en la acción de las isoflavonas (Garrido *et al.*, 2003; Bonilla, 2004).

Tabla 2. Concentración de fitoestrógenos presente en diferentes alimentos en base húmeda.

Alimento	$\mu\text{g}/100\text{ g}$
Leche de soya	2957.2
Frijol de soya	103920
Tofu	27150.1
Lentejas	36.5
Alfalfa brote	441.4
Ajo	603.6
Brócoli	94.1
Arándanos	17.5
Semilla de girasol	216.0

Se ha tratado de dilucidar el modo de acción de los fitoestrógenos en las plantas productoras, indicando que al parecer su función es protegerlas contra la fauna nociva, la radiación ultravioleta, actuando como captadoras de radicales libres potencialmente agresivos por su acción oxidante. Además, estos compuestos antioxidantes vegetales se han asociado con la regulación del crecimiento vegetal así como con la resistencia a determinadas infecciones bacterianas, víricas y micóticas (Lenis *et al.*, 2010).

Entre las propiedades farmacológicas de los fitoestrógenos con aplicación en animales se encuentra su actividad estrogénica (el típico estrógeno es el 17β -estradiol, que tiene funciones en la reproducción de vertebrados y es producido por ovarios, glándulas suprarrenales y placenta) (figura 1), la cual ha sido aplicada en terapias de reemplazo hormonal para el alivio de los síntomas asociados a la menopausia y osteoporosis en mujeres en etapa del climaterio (García y López, 2004; Serrano *et al.*, 2006; Ortiz, 2010). Además, el consumo de fitoestrógenos en la dieta ha sido relacionado con efectos benéficos contra cáncer de próstata, obesidad, diabetes, inflamación, artritis, infarto miocárdico, neurodegeneración y cáncer de mama (García y López, 2004; Serrano *et al.*, 2006).

Estos fitoquímicos de naturaleza fenólica son considerados protectores contra enfermedades cardiovasculares, al modificar el perfil lipídico, inhibiendo la oxidación, lipoproteínas de baja densidad (LDL) y triglicéridos favoreciendo el aumento de lipoproteínas de alta densidad (HDL) previniendo la aterosclerosis. Estos compuestos además estimulan la actividad de la óxido nítrico sintetasa endotelial y producen la vasodilatación por la vía del óxido nítrico inhibiendo la formación de radicales libres, peróxido de hidrógeno y aniones superóxido teniendo por lo tanto actividad antioxidante y antitrombótica al inhibir la agregación plaquetaria (Cendales y Silva, 2011).

Respecto de los fitoquímicos aislados de leguminosas, se ha reportado que imitan la actividad del 17β -estradiol, pero sus efectos no son idénticos dado que pueden presentar actividad antiestrogénica. Este efecto se puede deber a que poseen grupos hidroxilos que consiguen alinearse en una posición estereoquímica similar a la del 17β -estradiol y competir por el sitio activo del receptor de estrógeno endógeno en mamíferos (figura 1). De esta manera el balance entre la actividad estrogénica está determinado por la proporción

del fitoestrógeno y estrógenos endógenos. Los compuestos estrogénicos de mayor importancia en las leguminosas son las isoflavonas y coumestanos; siendo

la estrogénicidad de coumestanos 1/1 000 y de isoflavonas 1/10 000 aproximadamente, en relación con la actividad del 17β -estradiol (García y López, 2004).

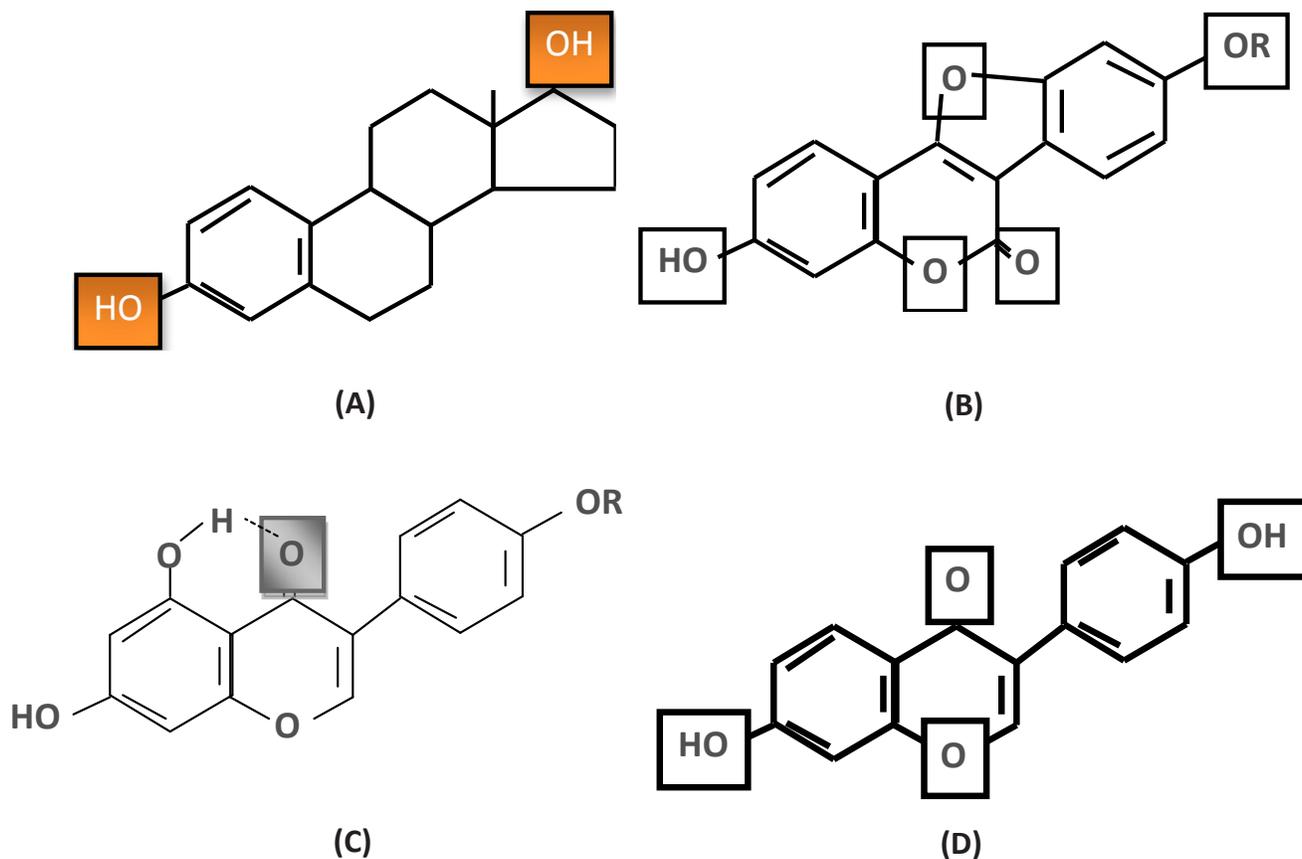


Figura 1. Estrógeno (estradiol) presente en mamíferos y los diferentes fitoestrógenos presentes en diversas fuentes vegetales. (A) 17β -estradiol. (B) Coumestrol R=H; 7-hidroxi-12-metoxicoumestano o 4'-O-metilcoumestrol R=CH₃; (C) Genisteína R=H; (D) Daidzeína.

Alfalfa

La alfalfa (*Medicago sativa* L.) es una leguminosa que se siembra principalmente como monocultivo y que está asociada con gramíneas debido a que a finales de otoño e invierno no crece por condiciones ambientales desfavorables. La alfalfa es cultivada en todo el mundo con propósitos alimenticios para el ganado y tiene el valor nutricional más alto de los cultivos forrajeros (SAGARPA, 2009; Esparza *et al.*, 2009). En el caso de países como México, para el 2008 este cultivo tuvo una producción mayor a los 29 millones de toneladas, teniendo los estados de Hidalgo, Chihuahua y Guanajuato las mayores

producciones con aproximadamente 5, 4 y 4 millones de toneladas respectivamente. La alfalfa es comercializada tradicionalmente en pacas, verde o natural y henificada y es utilizada principalmente en el alimento del ganado lechero, aunque también es utilizado como alimento para ganado de carne, caballos, ovejas y cabras, entre otros animales, debido a su alto contenido de proteína dado que este cultivo puede fijar nitrógeno del suelo, debido a la simbiosis con la bacteria *Meliloti sinorhizobium* y por poseer un alto contenido de fibra digestible, la alfalfa también puede ser consumida por el ser humano en presentación de brotes, principalmente en ensaladas (tabla 3) (SAGARPA, 2009).

Además de sus propiedades nutritivas, se han reportado propiedades antifúngicas, tónicas, diuréticas, antiinflamatorias, laxantes, hepatoprotectoras, digestivas y destoxicantes. Sus propiedades antimicrobianas han sido atribuidas al contenido de saponinas, aunque en un estudio del perfil fitoquímico y cuantificación de sus propiedades antimicrobianas de extractos en metanol y éter de petróleo de hojas de alfalfa, se encontró la presencia de lípidos, carotenoides, triterpenos, esteroides libres, alcaloides y carbohidratos mientras que en extractos metanólicos se han encontrado taninos, glicósidos y sustancias resinosas los cuales le confieren el potencial antimicrobiano contra patógenos humanos como *Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa* y *Staphylococcus aureus*. (Chavan *et al.*, 2015). Por otra parte, otros estudios del perfil fitoquímico de extractos acuosos y etanol provenientes de diversas partes de la alfalfa han reportado en su composición flavonoides, glicósidos, alcaloides, saponinas y taninos, así mismo dichos extractos han mostrado actividad antimicrobiana contra microorganismos patógenos como *S. aureus*, *E. coli*, *P. aerogenes*, *Salmonella typhimurium*, *Enterococcus*, *B. cereus*, *K. pneumoniae*, y *C. albicans*. Cabe señalar que los mecanismos del efecto antimicrobiano de algunos componentes de dichos extractos, como sucede con los taninos, se deben a sus propiedades astringentes que generan la formación de complejos con enzimas y sustratos, acción sobre membranas celulares de microorganismos, y la formación de complejos con iones metálicos. Por lo anterior, se ha sugerido su uso alternativo a compuestos sintéticos antimicrobianos; sin embargo, todavía es necesario enfatizar y realizar más estudios respecto al uso terapéutico de la alfalfa (Chavan *et al.*, 2015; Rehab, 2015).

Tabla 3. Composición de la paca verde natural o henificada de alfalfa.

Verde o natural (%)		Heno (%)	
Agua	77.99	Agua	8.50
Proteína bruta	3.50	Proteína bruta	16.01
Carbohidratos	8.43	Carbohidratos	40.55
Fibra	6.88	Fibra	24.26
Grasa	0.73	Grasa	2.73
Cenizas	2.47	Cenizas	7.95

La proteína de hoja de alfalfa ha sido reconocida por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) como fuente potencial de proteína de excelente calidad para el consumo humano debido a su abundancia y valor nutritivo, siendo fuente potencial para la producción de alimentos funcionales de alta valía. Algunas propiedades fisicoquímicas y funcionales de las proteínas solubles de las hojas de alfalfa son: su temperatura de desnaturalización, capacidad de emulsificación, formación de espuma, y solubilidad, entre otras. Sin embargo, a pesar de su alto valor nutritivo, la aplicación de proteína de hoja de alfalfa en los alimentos está limitada debido a su baja solubilidad y propiedades sensoriales negativas en color, sabor y textura, siendo la hidrólisis enzimática una alternativa para eliminar estos inconvenientes. Por otra parte, los aislados hidrolizados de proteína de hoja de alfalfa han demostrado que presentan actividad antioxidante al cuantificarse esta capacidad a través de métodos *in vitro*. Los reportes de la capacidad antioxidante incluyen el atrapamiento del radical 1,1-difenil-2-picrilhidrazil (DPPH) con 75 % a 1,6 mg/ml, actividad captadora del radical hidroxil en 80 % a 1,2 mg/ml, actividad captadora del anión superóxido con 66,96 % a 0,9 mg/ml y actividad quelante de iones metálicos con un 65,15 % sobre el ion férrico a una concentración de 0,50 mg/ml. Estos estudios indicarían la posibilidad de que la proteína de hoja de alfalfa tiene una potencial capacidad de reemplazo de enzimas como la superóxido dismutasa y otras enzimas antioxidantes así como nuevas aplicaciones en el desarrollo de productos alimenticios (Zhengjun *et al.*, 2008).

La alfalfa es fuente de pequeñas cantidades de fitoestrógenos, 1-2 mg kg/MS (materia seca) como el coumestrol (figura 1) en plantas sanas. Sin embargo, cuando es afectada por enfermedades foliares ocasionadas por insectos u hongos como *Pseudopeziza medicaginis* genera diversos coumestanos estrogénicos, como el coumestrol, satinol y el 4'-metoxi coumestrol dando lugar a concentraciones que superan los 100 mg kg/MS, lo cual es mayor a la concentración mínima de 20-50 mg kg/MS considerada biológicamente activa (Muñoz *et al.*, 2002; García y Lopez, 2004; Lenis *et al.*, 2010; Pérez-Rivero *et al.*, 2007) factores como la humedad y edad de la planta, disminuyen las concentraciones de coumestrol; mientras que la cantidad de fertilizante o temperatura la aumentan. El coumestrol en la alfalfa es alrededor de 30X más efectivo que

la genisteína en ratones y se ha reportado que causa problemas relacionados con los estrógenos (endógenos) en los animales; además de que al parecer presenta un efecto acumulativo (García y López, 2004).

Los diferentes fitoestrógenos tales como la genisteína, coumestrol, y lignanos presentes en leguminosas y otros vegetales pueden actuar como agonistas o antagonistas de hormonas esteroidales esto, dependiendo de la dosis que se maneje. Esta acción aparentemente contrapuesta es debida a su capacidad para unirse a los receptores estrogénicos alfa (ER α) del útero, glándula mamaria, sistema cardiovascular y hueso, y con mayor afinidad a receptores estrogénicos beta (ER β) presentes en próstata, ovarios, testículos, tracto urinario, tejido linfático así como con el hipotálamo; Observándose la tendencia de que a medida que se incrementa la dosis de isoflavonas como genisteína y coumestrol, se generan efectos negativos como la inducción de folículos hemorrágicos, abortos, síndrome estrogénico, y supresión de picos de hormona luteinizante (LH) en hembras, mientras que en machos se altera el desarrollo testicular y decrece la cuenta de espermatozoides (Pérez-Rivero *et al.*, 2007). Algunos otros estudios relacionados con la ingesta de fitoestrógenos y sus efectos negativos en animales experimentales mencionan que al ingerir alfalfa en concentraciones de coumestrol de 20-50 mg kg/MS han dado lugar a manifestaciones estrogénicas negativas afectando específicamente el aparato reproductor del ganado lechero, en oviducto, útero, vagina y cérvix, así como un desequilibrio hormonal por la acción antigonaotrópica (inhibe la producción de FSH y LH) (Muñoz *et al.*, 2002; Lenis *et al.*, 2010); mientras que en los machos bovinos se ha observado que la ingestión de pasturas que contienen coumestrol, ocasiona metaplasia glandular y epitelial en próstata y glándulas bulbouretrales, además de un mayor número de espermatozoides inmaduros con disminución significativa en la movilidad (Lenis *et al.*, 2010).

CONCLUSIONES

Los alimentos funcionales están considerados actualmente como una tendencia encaminada a la alimentación saludable debido a los malos hábitos alimentarios derivados del modo de vida contemporáneo. Así mismo, la tendencia a su consumo sigue abarcando

cada vez más a diversos países alrededor del mundo incluidos los de América Latina, contribuyendo así a la integración social y cuidado de la salud con respecto de la alimentación. Actualmente son variadas las líneas de investigación y desarrollo en el área, las cuales pueden dar valor agregado a las materias primas las cuales son abundantes en países latinoamericanos (Illanes, 2015). Los alimentos de origen vegetal muestran una variedad de compuestos biológicamente activos que les confieren un beneficio adicional al consumidor más allá del nutricional; un ejemplo de ello son las leguminosas las cuales contienen fitoestrógenos, compuestos con actividad estrogénica y a la que deben su nombre, por lo que les ha llevado a ser considerados para su aplicación en terapias de reemplazo hormonal en síntomas asociados a la menopausia y osteoporosis en mujeres en el climaterio. Además, su consumo ha sido relacionado con efectos benéficos contra diferentes enfermedades como algunos tipos de cáncer, obesidad, diabetes, y enfermedades cardiovasculares, entre otras.

Por otra parte, estudios realizados por diversos investigadores en animales han reportado como resultado efectos adversos debido al consumo de este tipo de compuestos específicamente en el aparato reproductivo. Los fitoestrógenos pueden actuar como agonistas o antagonistas de hormonas esteroidales, aunque este efecto está relacionado con la dosis que se maneje. Si bien se encuentran documentados los efectos que tienen estos fitoquímicos en animales experimentales los cuales pueden dar lugar a daños económicos debido a los cambios reproductivos, esto demuestra que aún falta mucha más información y estudios que realizar respecto al resultado que tienen los fitoestrógenos en el desarrollo y función reproductiva de los animales, el agonismo y antagonismo de su efecto así como la concordancia en el riesgo-beneficio de su consumo.

REFERENCIAS

- Abreu, A. (2012). Prebióticos, probióticos y simbióticos. *Revista de Gastroenterología de México*, 77, 26-28.
- Alvírez, A., González, B. E. & Jiménez, Z. (2002). Tendencias en la producción de alimentos: alimentos funcionales. *RESPYN*, 3(3).

- Araya, H. & Lutz, M. (2003). Alimentos funcionales y saludables. *Revista chilena de nutrición*, 30(1), 8-14.
- Ávalos, A. & Pérez, E. (2009). Metabolismo secundario de plantas. *REDUCA*, 2(3), 119-145.
- Badui, S. (2015). Inocuidad en la industria alimentaria. *Industria Alimentaria*, 37(3), 14-26.
- Bedascarrasbure, E., Maldonado, L., Álvarez, A. & Rodríguez, E. (2004). Contenido de fenoles y flavonoides del propoleos argentino. *Acta Farmacéutica Bonaerense*, 23(3), 369-372.
- Bolet, M. & Socarrás, M. (2010). Alimentación adecuada para mejorar la salud y evitar enfermedades crónicas. *Revista Cubana de Medicina General Integral*, 26(2), 321-329.
- Bonilla, C. (2004). Isoflavonas en ginecología, terapia no convencional. *Revista Colombiana de Obstetricia y Ginecología*, 55(3), 209-217.
- Carrasco, C. A., & Guerra, M. (2010). Lactosuero como fuente de péptidos bioactivos. *Anales Venezolanos de Nutrición* (23)1, 42-49.
- Cendales, L. V. R., & Silva, H. J. D. (2011). Phytoestrogens: an alternative to hormone replacement therapy. *Duazary Revista Facultad de Ciencias de la Salud*. Suplemento 2011. Diciembre pp. 84-89. http://www.researchgate.net/profile/Carmen_Rosario_Bocanegra_Amaya/publication/235725645_Article_VPH/links/0fcfd512e89f3e70bd000000.pdf#page=84
- Chasquibol, N., Lengua, L., Delmás, I., Rivera, D., Bazán, D., Aguirre, R. & Bravo, M. (2003). Alimentos funcionales o fitoquímicos, clasificación e importancia. *Revista Peruana de Química e Ingeniería Química*, 5(2), 9-20.
- Chavan, S. S., Jadhav, R. S., Khemnar, K. S. & Tambe, V. B. (2015). Evaluation of Antibacterial Activity and Phytochemical Screening of Medicago sativa Leaves. *International Journal of Current Research and Academic Review*, 3(5), 308-313.
- Cortés, M., Chiralt, A. & Puente, L. (2005). Alimentos funcionales: una historia con mucho presente y futuro. *Vitae*, 12, 5-14.
- Cortés, M., García, A., & Suárez, H. (2007). Fortification of edible mushrooms (*Pleurotus ostreatus*) with calcium, selenium and vitamin C. *Vitae, Revista de la Facultad de Química Farmacéutica*, 14(1), 16-24.
- Domínguez, K.N., Cruz, A. E., González, H., Gómez, L. C., García, M. & Rodríguez, G. M. (2014). El efecto antihipertensivo de las leches fermentadas. *Revista Argentina de Microbiología*, 46(1), 58-65.
- Esparza, J., Garay, A., Pérez, J., Haro, J., Gallardo, F., Hernández, P., González, S. & Carrillo, A. (2009). Análisis de crecimiento estacional de una pradera asociada alfalfa-pasto ovido. *Técnica pecuaria en México*, 47(2), 173-188.
- García, D. & López O. (2004). Los fitoestrógenos: ¿mito o amenaza para la alimentación animal en el trópico? *Pastos y Forrajes*, 27(4), 303-316.
- Garrido, A., De la Maza, C. & Valladares, L. (2003). Fitoestrógenos dietarios y sus potenciales beneficios en la salud del adulto humano. *Revista médica de Chile*, 13(11), 1321-1328.
- Hernández, E. & Verdalet, I. (2003). Revisión: alimentos e ingredientes funcionales derivados de la leche. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, 53(4), 333-347.
- Illanes, A. (2015). Alimentos funcionales y biotecnología. *Revista Colombiana de Biotecnología*, 17(1), 5-8.
- Jiménez, F. (2013). Emulsiones múltiples: compuestos bioactivos y alimentos funcionales. *Nutrición Hospitalaria*, 28(5), 1413-1421.
- Lenis, Y., Gutiérrez, T. & Tarazona, A. (2010). Efectos de los fitoestrógenos en la reproducción animal. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 63(2), 5555-5565.
- Lorente, B. F. & Serra, D. J. (2001). Alimentos funcionales: probióticos. *Acta Pediatr Espan*, 59(3), 150-5.
- Lutz, M. (2009). III. Alimentos funcionales en la prevención de enfermedades crónicas no transmisibles. Aspectos nutricionales y saludables de los productos de panificación, 38. http://www.agro.unc.edu.ar/~uninvestigacion/cyted/files/2009_

Aspectos nutricionales y saludables de los productos de panificación.pdf#page=37

- Madrigal, L. & Sangronis, E. (2007). La inulina y derivados como ingredientes claves en alimentos funcionales. *Archivos Latinoamericanos de Nutrición*, 57(4), 387-396.
- Martínez, I. & Villezca, P. (2005). La alimentación en México, un estudio a partir de la encuesta nacional de ingresos y gastos de los hogares y de las hojas de balance alimenticio de la FAO. *Ciencia UANL*, 8(2), 196-208. http://eprints.uanl.mx/1659/1/art_de_la_fao.pdf Base de datos
- Maydata, B. (2002). Chocolate, polifenoles y protección a la salud. *Acta Farm. Bonaerense*, 21(2), 149-52.
- Melo-Ruiz, V. & Cuamatzi-Tapia, O. (2006). *Bioquímica de los procesos metabólicos*. Reverte. pp. 364.
- Muñoz, R., Murillo, A., Pérez, J. & Córdova, A. (2002). Parámetros reproductivos en vacas holstein alimentadas con alfalfa alta en cumestrol. *Archivos de Zootecnia*, 51(195), 373-376.
- Mohamed R, El-Desoukey. A. (2015). Phytochemical and Antimicrobial Activity of *Medicago sativa* (Alfalfa) as Source of Animal Food Against Some Animal Pathogens. *Global Veterinaria*, 14(1), 136-141.
- Murcia, J.L. (2013). Alimentos funcionales. Un mercado al alza que mueve en el mundo cerca de 100.000 millones de euros anuales. Distribución y Consumo 49, 5. http://www.mercasa.es/files/multimedios/1387540447_Alimentos_funcionales_48-50.pdf.
- Olagnero, G., Abad, A., Bendersky, S., Genevois, C., Granzella, L. & Montonati, M. (2007). Alimentos funcionales: fibra, prebióticos, probióticos y simbióticos. *Diaeta*, 25(121), 20-33.
- OMS. (Octubre, 2009). 10 datos sobre la inocuidad de los alimentos. Disponible en: http://www.who.int/features/factfiles/food_safety/es/, accesado el 21 de febrero de 2016.
- Ortega Anta, R.M., Jiménez Ortega A. I., & Tur Mari J.A. (2010). Alimentos funcionales y salud. In: *Alimentos funcionales y salud en etapas infantil y juvenil*. J. Aranceta & A. Gil (coord). Editorial Médica Panamericana. pp. 203.
- Ortiz Nievas, V.T. (2010). Cuidando La salud con los fitoestrógenos. *Revista UNIMAR*, 28, 19-21.
- Pérez-Rivero, J. J., Aguilar-Setién, A., Martínez-Maya, J. J., Pérez-Martínez, M., & Serrano, H. (2007). Los fitoestrógenos y el efecto de su consumo en diferentes órganos y sistemas de animales domésticos. *Agricultura Técnica*, 67(3), 325-331.
- Pérez-Urria Carril, E., & Ávalos García, A. (2009). Metabolismo secundario de plantas. *Reduca*, 2(3), 119-145.
- Ramos, L. y Díaz H. (2011). Fitoestrogenos: una alternativa en terapia de reemplazo hormonal. *Duazary Revista Facultad de Ciencias de la Salud*, 8(spl) 84-89.
- Rodríguez, M., Monereo, S. & Begoña, B. (2003). Alimentos funcionales y nutrición óptima: ¿Cerca o lejos? *Revista Española de Salud Pública*, 77(3), 317-331.
- Rubiano, L. (2006). Alimentos funcionales, una nueva alternativa de alimentación. *Orinoquia*, 10(1): 16-23.
- SAGARPA/ProMercado. (2009) Diseño de Estrategias de Mercado, Logísticas y de Adecuación de Productos para la Integración de la Alfalfa Mexicana en el Comercio Global de Forrajes. Disponible en : http://www.sagarpa.gob.mx/agronegocios/Documents/Estudios_promercado/ALFALFA.pdf, accedido el 02 de octubre de 2008
- Sastre, A. (2003). Fibra y prebióticos: conceptos y perspectivas. *Gastroenterol Hepatol*, 26, 6-12.
- Serrano, M.E.D., López, M.L., & Espuñes, T.D.R.S. (2006). Componentes bioactivos de alimentos funcionales de origen vegetal. *Revista Mexicana de Ciencias Farmacéuticas*, 37(4), 58-68.
- Shemesh, M., Lindner, H. & Ayalon, N. (1972). Affinity of rabbit uterine oestradiol receptor for phyto-oestrogens and its use in a competitive protein-binding radioassay for plasma coumestrol. *Journal of Reproduction and Fertility*, 29, 1-9.

- Suárez, J. (2013). Microbiota autóctona, probióticos y prebióticos. *Nutrición Hospitalaria* 28, 38-41.
- Thompson, L., Boucher, B., Liu, Z., Cotterchio, M. y Kreiger, N. (2006). Phytoestrogen content of foods consumed in Canada, including isoflavones, lignans, and coumestrol. *Nutrition and Cancer*, 54(2), 184-201.
- Tomás-Barberán F. A. (2003). Los polifenoles de los alimentos y la salud. *Alim. Nutri. Salud*, 10(2), 41-53.
- Toxqui, L., De Piero, A., Courtois, V., Bastida, S., Sánchez, F. & Vaquero, M. (2010). Deficiencia y sobrecarga de hierro; implicaciones en el estado oxidativo y la salud cardiovascular. *Nutrición Hospitalaria*, 25(3), 350-365.
- Toyama, G. (2010). Prebióticos, probióticos y simbióticos en la dietoterapia de los pacientes quemados. *DIAETA*, 28, 7-14.
- Varela Moreiras, G. (2010). Alimentos funcionales. In: *Alimentos funcionales y salud en etapas infantil y juvenil*. J. Aranceta y A. Gil (coord). Editorial Médica Panamericana. pp. 203.
- Zhengjun, X., Junrong, H., Xueming, X. & Zhengyu, J. (2008). Antioxidant activity of peptides isolated from alfalfa leaf protein hydrolysate. *Food Chemistry* 111, 370-376.

Mezclas gasolina-etanol en motores de combustión interna en Colombia

Juan Mantilla^{1*}, Carlos Galeano¹, Alejandro Muñoz²

¹ Grupo de Modelado y Métodos Numéricos en Ingeniería, Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica, Universidad Nacional de Colombia, Cra. 30 N° 45-03 Edificio 453, oficina 401, Bogotá D. C. Colombia. *Autor para correspondencia: jmmantillag@unal.edu.co

² Grupo de Investigación en Energía y Eficiencia, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Central. Calle 21 N° 4-40, Bogotá D. C. Colombia.

Gasoline-ethanol blends in internal combustion engines in Colombia

ABSTRACT

In this work the change on the performance and emissions from spark ignited engines when gasoline is replaced by a mixture of gasoline and ethanol is analyzed. Initially, the difference between the physical and chemical properties of the fuel and its possible effects on the engine is investigated. Afterwards the documented effect of changing fuel performance and engine emissions is examined. To accomplish these objectives a deep literature review of these issues was performed to propose new questions according to the Colombian environment. The results of all the considered subjects indicate that fuel switching would be an effective policy if various modifications are made to the fuel and engines. The concerns raised, together with the results of the analysis carried out, can also be used as input to continue the development of research and innovation aimed at exploiting the potential of ethanol as fuel.

Key words: gasoline-ethanol blends, engines, combustion, performance, emissions.

Editor: Hernández Fernández, J.

Citation: Mantilla, J., Galeano, C. & Muñoz, A. (2016). Mezclas gasolina-etanol en motores de combustión interna en Colombia. *Revista Mutis* 6(1), 41-53, doi: <http://dx.doi.org/10.21789/22561498.1111>

Received: September 10, 2015. **Accepted:** March 31, 2016. **Published online:** May 31, 2016.

Copyright: ©2016 Mantilla, J., Galeano, C & Muñoz, A. This is an open-access article, which permits unrestricted use, distributions and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Competing Interests: The authors have no conflict of interest.

RESUMEN

En este trabajo se analiza el cambio sobre el desempeño y las emisiones de los motores encendidos por chispa cuando la gasolina es reemplazada por una mezcla de gasolina y etanol. Inicialmente se investiga la diferencia en las propiedades fisicoquímicas del combustible, y sus posibles efectos sobre el motor. Posteriormente se examina el efecto documentado del cambio de combustible en el desempeño y las emisiones del motor. Para llevar a cabo estos objetivos se realizó una revisión bibliográfica profunda de estos temas que sirve para proponer nuevas preguntas de acuerdo con el entorno colombiano. Los resultados de todos los puntos considerados indican que para que el cambio de combustible se convierta en una política efectiva, diferentes modificaciones deben



realizarse al combustible y a los motores. Las inquietudes planteadas, junto con los resultados del análisis llevado a cabo, pueden utilizarse además como insumo para continuar con el desarrollo de trabajos de investigación e innovación tendientes a aprovechar el potencial del etanol como combustible.

Palabras clave: mezclas gasolina-etanol, motores, combustión, desempeño, emisiones.

INTRODUCCIÓN

En Colombia desde el año 2001 con la Ley 693 se estableció el uso de etanol mezclado con gasolina, el cual fue posteriormente reglamentado en los años 2003, 2005 y 2007. Desde el año 2006 se ha venido utilizando una mezcla de gasolina con etanol producido a partir de caña de azúcar. La implementación ha sido progresiva a lo largo del país, garantizando a la fecha una mezcla de 92 % v/v de gasolina y un 8 % v/v de etanol en todo el territorio nacional, excluyendo algunos departamentos fronterizos. Como resultado de esta política, en diferentes publicaciones se analizan ciertos factores que van desde la seguridad energética, el desarrollo rural hasta el impacto ambiental. Muchas discusiones han surgido alrededor de estos temas, principalmente a nivel internacional, desde diferentes perspectivas. Una de las más sonadas trata del cambio en las condiciones de operación de los motores, temática en la cual se enfoca el presente trabajo.

Específicamente en la ciudad de Bogotá ocurre algo con respecto al parque automotor particular, el cual corresponde al 92 % de los vehículos matriculados en la ciudad. La proporción de vehículos antiguos, modelos de año inferior a 2003, constituye cerca del 42,9 %, mientras que el 23,23 % a modelos entre 2003 y 2007, y el restante a modelos de año posterior a 2008. Esta proporción se ha mantenido a pesar que el número de vehículos particulares ha crecido 146 % en el período 2002 a 2011, de los cuales cerca del 57 % corresponde a automóviles (Alcaldía de Bogotá, 2011). Esta situación presenta un escenario interesante para analizar desde el punto de vista de los variados tipos de motores y su relación con el combustible que utilizan actualmente, y con el combustible que se propone deban utilizar en un futuro según el decreto número 4892 del Ministerio de Minas y Energía. En este decreto se incentiva, a partir del

primero de enero de 2013, a utilizar mezclas de gasolina y etanol en proporciones mayores al 10 % v/v de este último. Recientes estudios realizados por la Universidad Tecnológica de Pereira utilizando combustible E20 en cuatro vehículos de diferente configuración de tren motriz, concluyeron que el cambio de combustible no genera ningún efecto adverso a los mismos (Universidad Tecnológica de Pereira *et al.*, s.f.).

Teniendo en cuenta lo anterior, se plantea en este trabajo una discusión técnica, basada en la revisión profunda de estudios variados, desde el punto de vista de las propiedades fisicoquímicas de las mezclas gasolina-etanol y su efecto sobre algunos parámetros de operación y emisiones de los motores.

PROPIEDADES FÍSICOQUÍMICAS DE MEZCLAS GASOLINA-ETANOL

Número de octano

Para esta propiedad existe acuerdo total en que aumenta, entre 1 y 1,5 % por cada 10 % v/v de aumento en el contenido de etanol en la mezcla, tanto el número de octano de investigación (RON de sus siglas en inglés) como el número de octano de motor (MON de sus siglas en inglés) con respecto a la gasolina (tabla 1). Esto ocurre debido a que el etanol tiene mayores valores que la gasolina para estos dos indicadores; luego, al realizar la mezcla, se incrementa un poco el valor en el número de octano, el cual se calcula como el promedio aritmético de RON y MON.

Tabla 1. Cambio de propiedades fisicoquímicas, emisiones y parámetros de operación de las mezclas gasolina-etanol con respecto a gasolina pura de acuerdo con la bibliografía consultada.

Parámetro	Aumento (>) o disminución (<)	Referencias
Número de octano	> 1 a 1,5 %	Torres, Behrentz, Fuels, Shapiro, Horta, Environment Australia, Orbital Engine, Niven, Faiz & Weaver, Yücesu & Topgül, He.
Calor de vaporización	> 15 - 18 %	MacLean & Lave, Hsieh, Hansen, Yüksel & Yüksel, Shapiro, Horta, Environment Australia, Orbital Engine, Yücesu & Topgül.
Temperatura de autoencendido	> Hasta un 60 %	Fuels, Horta, Environment Australia, Orbital Engine, Yücesu & Topgül, He, Hammel-Smith, DOE, Freudenberger, D'Avila, Ragazzi & Nelson, Crary, Haskew & Liberty, Durbin, Patzek, Wright, Harley & Kean.
Densidad	> Dependiendo de la mezcla	Fuels, Horta, Environment Australia, Orbital Engine, Yücesu & Topgül, He, Hammel-Smith, DOE, D'Avila, Ragazzi & Nelson, Crary, Haskew & Liberty, Durbin, Patzek, RFA, Wright, Harley & Kean.
Poder calorífico inferior	Disminuye dependiendo de la mezcla	Fuels, Horta, Environment Australia, Orbital Engine, Yücesu & Topgül, He, Hammel-Smith, DOE, Freudenberger, D'Avila, Ragazzi & Nelson, Crary, Haskew & Liberty, Durbin, Patzek, RFA, Wright, Harley & Kean, Kortum.
Solubilidad en agua	100 %	Fuels, Horta, Environment Australia, Orbital Engine, Yücesu & Topgül, He, Hammel-Smith, DOE, Freudenberger, D'Avila, Ragazzi & Nelson, Crary, Haskew & Liberty, Durbin, Patzek, RFA, Wright, Harley & Kean, Kortum.
Monóxido de carbono	< 10 y 40 %	Acevedo, Al-Hasan, Li, Wu, Li, Al-Baghdadi, Yüksel & Yüksel, Ocampo, Behrentz, Fuels, Horta, Environment Australia, Niven, Faiz & Weaver, Yücesu & Topgül, He, Hammel-Smith, Vitale, Ragazzi & Nelson, Crary, Durbin, Patzek, Apace Research Ltd, Karman, Knepper, Mayote, Masum, Whitten & Reyes, Schifter, Calvert.
Hidrocarburos totales sin quemar	< 5 - 20 %	American Coalition for Ethanol, Liska, Skidmore, Viju & Kerr, Alcaldía de Bogotá, Universidad Tecnológica de Pereira.
Aldehídos	> 5 - 200 %	He, Hsieh, Pouloupoulos, Yüksel & Yüksel, Ocampo, Behrentz, Fuels, Horta, Environment Australia, Niven, Faiz & Weaver, He, Vitale, Durbin, Patzek, Apace Research Ltd, Guerrieri, Karman, Leong.
Etanol sin quemar	> Depende de la mezcla	He, Pouloupoulos, Niven, Faiz & Weaver, Yücesu & Topgül, He, Vitale, Zervas.
Consumo de combustible	> 1 - 6 %	MacLean & Lave, Acevedo, Al-Hasan, Wu, Li, Hansen, Behrentz, Fuels, Shapiro, Environment Australia, Orbital Engine, Niven, Yücesu & Topgül, He, DOE, Ragazzi & Nelson, Durbin, Patzek, Kortum, Apace Research, American Coalition for Ethanol, Coelho.
Potencia	Igual	Acevedo, Al-Hasan, Li, Asfar & Hamed, Hsieh, Wu, Li, Hansen, Al-Baghdadi, Yüksel & Yüksel.

Algunos autores reportan el aumento en el número de octano como algo que es sobresaliente de las mezclas gasolina-etanol, sin embargo la pregunta que debe hacerse aquí es: ¿cuál es el efecto real del aumento en el número de octano para motores que no se modifican y que utilizan mezclas gasolina-etanol? La respuesta es que no se obtiene ningún efecto. El aumento en el número de octano y su capacidad antidetonante asociada se hacen evidentes en la medida en que se pueda modificar el motor disminuyendo el volumen de la cámara de combustión, alcanzando así una relación de compresión óptima para la nueva mezcla. Esto en teoría puede permitir una salida de potencia igual a la que se obtiene con gasolina pura y un consumo de combustible similar. Otro aspecto importante para discutir tiene que ver con la relación directa que tiene esta propiedad con la temperatura máxima del proceso de combustión. Al aumentar la capacidad de autoencendido del combustible, implícitamente se dice que la temperatura necesaria para que el combustible inicie su proceso de oxidación debe ser mayor, debido principalmente a que el calor de vaporización de la mezcla también es mayor, como se explica más adelante. Todo esto indica que el punto desde el cual se inicia la combustión tiene un valor de temperatura mayor, y si disminuye la emisión de CO debido a una mejor combustión, la temperatura máxima del proceso de combustión necesariamente debe ser más alta.

Calor de vaporización

Al igual que con el número de octano, todos los trabajos consultados coinciden en que el calor de vaporización de la mezcla es mayor entre 15 y 18 % (tabla 1). Lo anterior significa que la energía necesaria para pasar un kilogramo de mezcla gasolina-etanol a fase de vapor es mayor que la requerida para pasar un kilogramo de gasolina pura a fase de vapor. Si se tiene en cuenta que un combustible solo se puede quemar cuando está en fase gaseosa y mezclado con el oxidante, dos cosas pueden suceder: la primera tiene que ver con que se necesita un tiempo mayor de la mezcla dentro de la cámara de combustión para que se queme una cantidad de combustible similar a la que se quema con gasolina pura. Esto significa cambios en la distribución o en el tiempo de salto de la chispa. Sin embargo, si la velocidad de llama es mayor para las mezclas, lo cual es cierto y puede tener una relación directa con el calor de vaporización, se

compensa en algo el tiempo perdido por la vaporización del combustible. Como segundo punto, el simple hecho de tener un calor de vaporización mayor significa que la temperatura de autoencendido debe ser mayor, con lo que se puede suponer que la temperatura máxima del proceso de combustión es mayor. Si bien el párrafo anterior plantea dos situaciones importantes es necesario preguntarse: ¿la velocidad de llama es siempre mayor para todas las condiciones de operación del motor?, si no es así, ¿cuál es la razón?, ¿cuál es la relación entre la velocidad de llama con el calor de vaporización?, ¿las emisiones resultantes tienen alguna relación con la velocidad de llama?, ¿queda más combustible sin quemar?, ¿la mayor velocidad de llama está relacionada con un mejor proceso de combustión (menos emisiones y mayor salida de potencia)? Las respuestas a estas preguntas se deben obtener de pruebas experimentales en motores que utilizan mezclas de gasolina-etanol con el fin de encontrar las relaciones propuestas.

Presión de vapor Reid (RVP)

Es una medida de la volatilidad que tiene un combustible. Esto quiere decir que a mayor RVP mayor es la capacidad del combustible para evaporarse dentro de una cantidad de aire determinada. Los datos consultados en las referencias coinciden en que para E10 la RVP es mayor en 14 % que para gasolina. El valor de la diferencia depende en gran medida de la calidad de la gasolina base para la mezcla. A medida que se ajustan las curvas de destilación y se disminuye el butano en la gasolina, se pueden obtener valores similares de RVP para la mezcla. Varios autores reportan que aún sin hacerse el “ajuste” en la calidad de la gasolina y a medida que aumenta el etanol en la mezcla, el valor de RVP se hace similar al de la gasolina pura. Se puede hacer igual para composiciones entre 17 % v/v y 30 % v/v. A partir de estos puntos y al aumentar la cantidad de etanol el valor de RVP disminuye con respecto a la gasolina. A simple vista parece contradictorio el comportamiento de las propiedades descritas anteriormente, calor de vaporización y RVP. Sin embargo, se puede explicar de la siguiente forma: el combustible mezclado necesita mayor cantidad de energía para evaporarse por lo que el fenómeno de difusión está dominado por esta propiedad cuando la mezcla se inyecta en una corriente de aire. Luego el combustible le quita energía disponible al aire, vaporizándose más fácilmente que la gasolina y disminuyendo de forma

considerable la temperatura del aire, aumentando su densidad. A esto se refiere la volatilidad también. La mayor volatilidad tiene tres efectos considerables: el primero es que mejora el arranque en frío de los motores, permitiendo de esta forma que las emisiones disminuyan durante este proceso; el segundo efecto aparece cuando se vaporiza más combustible del necesario, por una temperatura del sistema de alimentación de combustible muy alta, formando “burbujas” de vapor que bloquean el paso de combustible hacia el motor; y el tercer efecto tiene que ver con el potencial para el aumento de emisiones evaporativas desde el cánister o desde los mismos conductos que llevan el combustible al motor, este aspecto se analiza más adelante. Siguiendo con lo planteado en el punto anterior, parece ilógico que para el calor de vaporización se mencione la posibilidad de necesitar más tiempo en la cámara de combustión para permitir que todo el combustible se evapore y a la vez se indique que el combustible mezclado se evapora más fácilmente. En realidad la contradicción no existe. Si se continúa con el ejemplo anterior se puede deducir que al llegar la mezcla al cilindro, si no se dispone de energía suficiente para mantener la mezcla en estado de vapor, lo cual sucede, va a volver rápidamente a un estado líquido. Se demuestra que lo mencionado para el calor de vaporización no es tan incoherente, ya que puede ser posible que la energía necesaria incluso sea mucho mayor de la que se cree debido a que una mayor cantidad de combustible se convierte en gotas de líquido de más tamaño, afectando seriamente la vaporización del combustible para su posterior encendido. En este punto tiene aplicación una pregunta realizada previamente: ¿tiene alguna relación el calor de vaporización con las emisiones producidas en el motor?, ¿cómo se puede verificar esto? Las respuestas no son sencillas, pero una relación *a priori* se puede deducir al verificar la cantidad de combustible sin quemar que sale del ducto de escape. Si esta cantidad es mayor que para el funcionamiento con gasolina, se tiene un indicio claro de que falta tiempo para completar la combustión o que el proceso es afectado por otro fenómeno físico.

Temperatura de autoencendido

Esta temperatura es mayor en 60 % para el etanol puro con respecto a la gasolina (tabla 1). Es bastante difícil encontrar este dato para mezclas gasolina-etanol. Lo anterior simplemente hace suponer que como la temperatura de autoencendido de uno de los com-

ponentes de la mezcla es mayor, entonces la temperatura de autoencendido de la mezcla va a ser ligeramente más alta. La suposición hecha no es ilógica si se piensa nuevamente desde el punto de vista de la energía necesaria para vaporizar el combustible. A mayor cantidad de energía mayor va a ser la temperatura al final del proceso de cambio de estado líquido a vapor, conocido como punto de evaporación, lo cual se corrobora en las referencias consultadas. Entonces, si después de la evaporación de la mezcla esta tiene una temperatura mayor, se puede inferir que la temperatura de autoencendido sea mayor porque el nivel de excitación de las moléculas en el estado inicial (evaporación) es también mayor. El efecto que tiene una mayor temperatura de autoencendido, consiste en que el nivel energético desde donde comienza el proceso de combustión es más alto. Por ello se puede esperar, si no existen problemas con la combustión (mezcla, extinción de llama, etc.), una temperatura máxima del proceso mayor con respecto al funcionamiento con gasolina.

Densidad

La densidad de las mezclas gasolina-etanol aumenta con respecto a la gasolina pura (tabla 1). El efecto principal que tiene el aumento de la densidad es que la corriente de aire “arrastra” una mayor cantidad de combustible cuando pasa por el carburador debido a que en este la cabeza de presión estática es mayor. El mismo efecto ocurre en los sistemas de inyección, donde para una misma diferencia de presión entre el inyector y la cámara de combustión, se introduce una mayor cantidad de combustible. Es importante señalar acá que esta es una de las razones, pero no la única, por la cual el consumo de combustible aumenta cuando se utilizan mezclas en motores no modificados. Una pregunta para contestar con respecto a esta propiedad es: ¿cómo se puede compensar el efecto de la mayor densidad? La respuesta puede ser simplemente empobreciendo la mezcla, esto es, disminuyendo la cantidad de combustible que entra al motor con la corriente de aire. Lo anterior es fácilmente realizable en un motor con sistema de alimentación con carburador, pero muy difícil en un motor con control electrónico. Ahora bien, si esto se realiza se debe tener en cuenta que la potencia de salida puede disminuir.

Poder Calorífico Inferior (LHV)

Esta propiedad disminuye para las mezclas gasolina-etanol entre 2 y 4 %, con mayor tendencia en el intervalo de 3 a 3,4 %. La propiedad LHV es importante porque presenta una medida indirecta del potencial máximo que tiene el combustible de entregar energía cuando los productos de la reacción son los estequiométricos y el agua se encuentra en estado de vapor. Sin embargo, lo que se reporta en la bibliografía consultada es que no debe ser visto esto como la única propiedad que puede reflejar la potencia de salida. Lo anterior se explica con la siguiente situación: si el LHV disminuye en 3 %, el consumo de combustible aumenta en 1,5 % y la potencia se mantiene constante (Acevedo *et al.*, 2008). Debe existir alguna mejora adicional en el proceso de admisión y combustión que se esté compensando por ese LHV perdido. Las razones para afirmarlo se han mencionado anteriormente. La primera tiene que ver con el aumento en la densidad del aire gracias a la mayor volatilidad de la mezcla (mayor RVP). La segunda tiene que ver con la mayor temperatura de autoencendido (mayor calor de vaporización) que causa que la velocidad de llama sea mayor quemando de mejor forma los reactantes.

Solubilidad en agua

El etanol es polar por naturaleza, por lo que tiene alta tendencia a ser higroscópico. Las referencias consultadas reportan solubilidad de etanol en agua y viceversa de 100 % (tabla 1). Debido a la alta solubilidad del etanol en agua, se puede presentar algo que se conoce como separación de fase de combustible líquido. La separación de fase puede ocurrir para las mezclas cuando reciben una cantidad de agua suficiente que causa que el agua, el etanol y la gasolina formen tres fases diferentes perfectamente identificables. Posteriormente a esta separación, es imposible recombinar la gasolina con el etanol (Rondón *et al.*, 2015). Los autores consultados difieren en la forma en que ven la separación de fases. Varios autores coinciden en que esta puede ocurrir en el tanque de almacenamiento de combustible, o en cualquier otra parte del sistema de alimentación o distribución, si se logra un efecto combinado entre la cantidad de agua absorbida y la temperatura de la mezcla. Los valores reportados se encuentran entre 0,15 y 0,5 % v/v para la cantidad máxima de agua permitida y entre 1,11 y 15,55 °C para la temperatura de la mezcla. Por otro lado las referencias Horta (2003) y Hammel-Smith *et*

al. (2002), mencionan que es imposible que la mezcla se separe dentro de los sistemas de alimentación debido a que los mismos poseen dispositivos especiales de recirculación de combustible y a que la cantidad de agua señalada nunca puede alcanzarse en el tanque. Como se observa, la separación de fases es un fenómeno aún poco entendido. Surgen alrededor de esto varias preguntas: ¿se pueden separar las fases por culpa de la baja presión en el ducto de admisión cuando la mezcla se encuentra viajando con el aire?; ¿se puede separar la mezcla en el tanque por el simple efecto de “respiración” del mismo?; ¿se puede separar la mezcla por culpa del proceso mismo de combustión debido a que las energías de activación para la gasolina y el etanol son diferentes? Las respuestas son complicadas y en la literatura consultada solo se encuentra que es muy difícil que la mezcla reciba agua del aire en una cantidad tal que se separe en el ducto de admisión. Sin embargo, no se han realizado pruebas simulando esta condición de baja presión. Las pruebas que se conocen son las que se hacen a la mezcla líquida cambiando su temperatura y la cantidad de agua, y esta condición difiere mucho de la condición en el ducto de admisión. La presión puede ser un factor fundamental ya que se alcanzan valores de relación de presión de entre 0,3 y 0,6. Respecto a la pregunta sobre la energía de activación, vale la pena destacar que está muy relacionada con la emisión de etanol sin quemar de la cual se habla más adelante. Lo que se supone en esta parte es que gracias al mayor calor de vaporización y al tiempo necesario para alcanzar el estado de vapor, se puede pensar que se alcanza un nivel de energía tal que la gasolina se quema en mayor proporción que el etanol, separando desde el inicio de la combustión la mezcla y dejando a una parte del etanol sin quemar.

EMISIONES

Monóxido de carbono (CO)

La mayoría de autores consultados, coinciden en que la emisión de CO disminuye en un porcentaje variable, dependiendo del combustible y del tipo de motor (tabla 1). Es así como, en general, para motores con sistema de control de flujo de combustible en lazo abierto es menor la emisión de CO que para motores modernos con control en lazo cerrado. La formación de CO está directamente ligada a la eficiencia de la combustión, es decir, a mayor o menor cantidad de

carbono procedente del combustible, se quemé completamente o no. Esta reducción se encuentra entre el 10 y el 40 %. Dentro de los puntos más importantes que se esbozan, se encuentra el hecho de que se produce esta disminución por efectos de dilución y presencia de oxígeno que aumenta la velocidad de la llama. También muestran algunos autores que a medida que la T90¹ de las mezclas aumenta, disminuyen las emisiones de CO debido a que se disminuye la volatilidad. Y se observa una reducción mayor en la emisión para vehículos que poseen motores con control de lazo abierto, porque el control en lazo cerrado aumenta mucho más el consumo de combustible enriqueciendo la mezcla y afectando directamente el proceso de combustión. Durbin *et al.* (2006), mencionan que la emisión de CO permanece igual cuando los niveles de etanol se encuentran entre 5,7 y 10 % v/v y la T50 entre 90,55 y 101,67 °C. También recalcan que la emisión puede aumentar si la concentración de etanol es la mencionada, pero la T50² está por encima de 112,78 °C. Lo que se observa en este punto es que la emisión de CO depende de la calidad del combustible, de la relación aire-combustible real (más o menos oxígeno) y del tipo de control de sistema de alimentación que posea el vehículo. Esto hace particularmente complicada la comparación de resultados obtenidos en diferentes países, donde las tecnologías de producción de combustibles y los motores son diferentes.

Hidrocarburos totales sin quemar (HC)

Al igual que la emisión de CO, todos los autores coinciden en que los HC disminuyen cuando se utilizan mezclas de gasolina-etanol. La disminución está entre el 5 y el 20 % (tabla 1). Se debe hacer una anotación en esta parte para mencionar que normalmente la disminución depende mucho del grupo de hidrocarburos que se está midiendo. Es así como la gran parte de los autores mencionados miden hidrocarburos pesados, normalmente compuestos orgánicos con más de 3 o 4 carbonos en fase gaseosa. Esto es algo para analizar ya que la emisión de otros hidrocarburos más livianos, y en algunos casos igual de peligrosos para el medio

- 1 T90: temperatura a la cual en el proceso de destilación realizado en la fabricación del combustible se ha evaporado el 90%
- 2 T50: temperatura a la cual en el proceso de destilación realizado en la fabricación del combustible se ha evaporado el 50%

ambiente y la salud humana, se están produciendo, pero no se miden porque no son regulados. Nuevamente Durbin *et al.* (2006) mencionan que la emisión de HC puede aumentar para niveles medios y altos de T90 entre 165,55 y 179,44 °C. Además aumenta si la T50 aumenta.

De la misma forma que para la emisión de CO, la emisión de HC parece depender de los mismos parámetros, teniendo siempre en cuenta que la disminución es relativa ya que se generan otros hidrocarburos más livianos que no se miden generalmente.

Óxidos de nitrógeno (NO_x)

Los óxidos de nitrógeno que se miden comprenden principalmente las especies NO, NO₂ y N₂O. Los efectos son variados, con tendencia a aumentar entre 1 y 18 %. La mayoría de la emisión de NO_x es producida como consecuencia de una disociación directa del nitrógeno atmosférico por la alta temperatura en la cámara de combustión, lo cual es predecible por el mayor calor de vaporización y temperatura de autoencendido de las mezclas gasolina-etanol. Existen dos mecanismos adicionales de formación de NO_x que son: desde el nitrógeno molecular en el combustible y desde reacciones de hidrocarburos intermedios con el nitrógeno. Otra situación que describe Fuels (2007), es que para valores de T50 iguales a los de la gasolina pura la emisión de NO_x permanece invariable hasta un contenido de etanol de 5,7 % v/v. Si el contenido de etanol aumenta a partir de este punto la emisión crece considerablemente. Por su parte se menciona que para niveles bajos de T50 (90,55 °C) a medida que aumenta el contenido de etanol en la mezcla aumentan los NO_x (Durbin *et al.*, 2006). Nuevamente se observa una influencia directa de la calidad del combustible sobre las emisiones. De la misma forma se menciona que las emisiones de NO_x para los diferentes estudios analizados presentan incrementos y decrementos marginales que no tienen relevancia (Karman, 2003). Otros estudios reportan disminuciones entre 1 y 13 % en la emisión de NO_x y se atribuye a uso de mezclas con etanol de entre 15 y 24 % v/v en motores sin modificar. La discusión para esta emisión se torna difícil. Sin embargo, en lo que coinciden muchos de estos autores con los estudios de Hsieh *et al.* (2002) y Pouloupoulos *et al.* (2001), es que para varios tipos de motores, si bien se observa una tendencia de los NO_x a aumentar, esto no es estadísticamente significativo. Lo anterior indica que la producción de NO_x

está ligada a las condiciones propias de operación del motor (carga y velocidad), el tipo de control del motor (lazo cerrado o abierto), la calidad del combustible y sobre todo a la concentración de etanol en la mezcla (Masum *et al.*, 2013; Mantilla *et al.*, 2015). Nuevamente la comparación de resultados con tecnologías de refinación y de motores de otros países resulta en un proceso casi imposible.

Aldehídos (formaldehído y acetaldehído)

Siempre que se utilizan mezclas de gasolina-etanol la formación de aldehídos puede aumentar entre 5 y 200 % según varios autores (tabla 1). La formación de una mayor concentración de aldehídos está ligada a la combustión incompleta de alcoholes y depende directamente de la concentración de etanol en la mezcla. Los aldehídos son una emisión no regulada que tiene efectos graves sobre la salud humana (Leikauf, 2002). Las preguntas para este punto se centran en: ¿qué tan buen registro de combustión incompleta es la concentración de aldehídos en el escape?; si aumentan con el mayor contenido de etanol, y se asume que la respuesta a la pregunta anterior es positiva, ¿por qué la emisión de CO disminuye a medida que aumenta el contenido de etanol en la mezcla? Las respuestas a estas preguntas no se conocen a partir de la literatura consultada. Se supone que efectivamente el mayor número de aldehídos en el escape representan la combustión incompleta del alcohol únicamente. Esto es clave debido a que de una forma u otra puede significar que en la cámara de combustión estaría ocurriendo separación de fases por el fenómeno descrito anteriormente. La gasolina pura se quema en gran proporción porque de alguna manera, se alcanza la temperatura de autoencendido del etanol (respuesta a la segunda pregunta de este párrafo), pero las evidencias de mayor concentración de aldehídos y de etanol sin quemar en el escape reflejan que la combustión del alcohol es incompleta y que no alcanza el tiempo disponible en la cámara de combustión para quemar el alcohol restante que se había separado.

Etanol sin quemar

En las referencias consultadas (tabla 1), se muestra que a medida que aumenta el contenido de etanol en la mezcla aumenta la emisión de este sin quemar. Esto no solamente es un indicio claro de que hay un problema durante el proceso de combustión, también es fuente de un problema ambiental de grandes propor-

ciones debido a que se libera al ambiente el hidrocarburo puro. Para explicar la aparición del etanol sin quemar en el escape, la mejor definición de lo que sucede la da Zervas *et al.* (2002): “El etanol sin quemar en el escape es precisamente eso, etanol sin quemar. No se puede formar a partir de los radicales libres que se crean durante el proceso de combustión. Solo se presenta cuando hay mezclas con alcoholes. La concentración en el escape depende de la relación aire-combustible actual, para mezclas ricas aumenta el etanol en el escape mientras que para mezclas pobres disminuye pero siempre es mayor que con gasolina pura”. Con esto se refuerza aún más lo explicado (y supuesto) en puntos anteriores. El etanol sin quemar no es un subproducto de la combustión, es el resultado de un combustible que entra a la cámara de combustión como una mezcla y sale separado de ella. Este hecho es el mayor indicio de que puede existir separación de mezcla en la cámara de combustión, ya que como lo revelan las referencias consultadas, no importa el tipo de sistema de alimentación que posea el motor, ni la carga. Únicamente importa que se estén quemando mezclas de combustibles que contienen alcohol. A esta discusión se suma el hecho de que nunca se queman completamente los combustibles que entran a un motor. Ante esto surge la pregunta: si la cantidad de etanol en el escape mantiene la misma proporción con la gasolina base sin quemar en el escape que tenía antes de la combustión, ¿se puede suponer que no hubo separación y que la mezcla fue completamente soluble?, ¿qué sucede cuando la situación descrita no se cumple?, ¿se puede afirmar que hay separación? Las respuestas a estas preguntas solo se pueden averiguar mediante experimentación en motores junto con análisis en cromatógrafo de los gases de escape. Lo más difícil del trabajo experimental propuesto consiste en saber cuáles componentes, de los muchos hidrocarburos que se detectan, provienen de la gasolina y cuáles no.

PARÁMETROS DE OPERACIÓN

Consumo de combustible

El consumo de combustible aumenta, según los autores consultados (tabla 1), en motores sin modificar que utilizan mezclas de gasolina y etanol. El porcentaje de aumento varía entre 1 y 6 % dependiendo principalmente del tipo de control que posea el motor (lazo cerrado o lazo abierto). El mayor consumo se registra

en motores con control en lazo cerrado debido a que el sensor de oxígeno en el escape detecta una mezcla pobre (mucho oxígeno en el escape) y ordena inyectar más combustible. El consumo de combustible aumenta proporcionalmente al incremento en la concentración de etanol en la mezcla. El aumento se produce por un efecto combinado provocado por la mayor densidad de la mezcla y por el aumento en la relación aire-combustible real por la más alta volatilidad del combustible (solo en motores con carburador). En la referencia Durbin *et al.* (2006) se asegura que el consumo de combustible puede disminuir entre 0,6 y 1,2 % si se aumentan T50 y T90 respectivamente. Además, Horta (2003) menciona que el aumento en el consumo de combustible es irrelevante si se tienen en cuenta los beneficios asociados con el uso de mezclas gasolina-etanol.

Potencia

De acuerdo con las referencias consultadas (ver tabla 1), la potencia permanece constante cuando se utilizan mezclas de gasolina-etanol. Teniendo presente que la mezcla tiene un LHV menor que el de la gasolina pura, se compensan las pérdidas de potencia con el mayor consumo de combustible sumado a la mayor temperatura del proceso de combustión que puede producir una presión más alta sobre el pistón. La eficiencia térmica que relaciona la potencia de salida con el producto de la masa de combustible por el LHV, se mantiene constante al igual que la potencia. El numerador permanece constante como se ha explicado en este punto. El denominador que es el producto del consumo de combustible (el cual aumenta) con el LHV (el cual disminuye) crea un efecto de compensación, ya que la proporción en que aumenta uno disminuye el otro. Algunos autores reportan aumento en la potencia de salida (Yücesu & Topgül, 2006; DOE *et al.*, 2013), sin embargo el consumo de combustible sobrepasa el 6 % mencionado previamente y se trata de motores diseñados para manejar mezclas de gasolina-etanol o motores modificados.

CONCLUSIÓN

En este trabajo se presentan diferentes resultados e inquietudes que prueban que existe una cantidad considerable de condiciones a cumplir para poder tener el efecto esperado desde el punto de vista de desempeño y emisiones de los motores de combus-

tión interna, cuando utilizan mezclas de gasolina con etanol. Es posible observar también que existen resultados contradictorios en muchos casos, los cuales incentivan a que la meta de mejorar desempeño y emisiones se puede ajustar al caso colombiano, realizando un trabajo conjunto de investigación e innovación que apunte a resolver algunas de las inquietudes planteadas y muchas otras que seguramente surgirán con el devenir propio de la investigación.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio fue financiado por el Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación de la República de Colombia – Colciencias (www.colciencias.gov.co) con proyecto N° 202010013830.

REFERENCIAS

- Acevedo, H. & Mantilla, J. (2008). Viabilidad ambiental del uso de biocombustibles para motores a gasolina y diésel en Colombia. *Boletín Observatorio Colombiano de Energía*, abril-junio, 3-14.
- Al-Baghdadi, M. A. (2001). The safe operation zone of the spark ignition engine working with dual renewable supplemented fuels (hydrogen+ethyl alcohol). *Renewable Energy*, 22, 579-583.
- Al-Baghdadi, M. A. (2000). Performance study of a four-stroke spark ignition engine working with both of hydrogen and ethyl alcohol as supplementary fuel. *Int. J. Hydrogen Energy*, 25, 1005-1009.
- Albino, D., Bertrand, K. & Bar-Yam, Y. (2012). Food for fuel: The price of ethanol. Disponible en: arXiv:1210.6080, accesado el 04 de octubre de 2014.
- Alcaldía de Bogotá. Movilidad en cifras (2011). Informe Alcaldía de Bogotá boletín cifras movilidad 2011. Disponible en: http://www.movilidadbogota.gov.co/hiwebx_archivos/audio_y_video/boletin%20cifras.pdf, accesado el 24 de septiembre de 2014.
- Al-Hasan, M. (2003). Effect of ethanol-unleaded gasoline blends on engine performance and exhaust emission. *Energy Conversion and Management*, 44, 1547-1561.

- American Coalition For Ethanol. (2005). Fuel economy study: comparing performance and costs of various ethanol blends and standard unleaded gasoline. Disponible en: http://www.growthenergy.org/images/reports/ACEFuelEconomyStudy_001.pdf, accesado en 04 de octubre de 2014.
- Apace Research Ltd. (1998). Intensive field trial of ethanol/petrol blend in vehicles. ERDC Project N° 2511. Disponible en: http://journeytoforever.org/biofuel_library/EthanolApace.PDF, accesado el 09 de diciembre de 2014.
- Asfar, K. & Hamed, H. (2004). Combustion of fuel blends. *Energy Conversion and Management*, 39(10), 1081-1093.
- Bayraktar, H. (2005). Experimental and theoretical investigation of using gasoline-ethanol blends in spark-ignition engines. *Renewable Energy*, 30, 1733-1747.
- Behrentz, E. (2006). *Beneficios ambientales asociados con el uso de combustibles alternativos*. XIII Conferencia Energética Colombiana. (Bogotá). Disponible en: <http://en.calameo.com/read/0014789784a92b65a18ee>, accesado el 09 de diciembre de 2014.
- Bresenham, D. & Reisel, J. (1999). The effect of high ethanol blends on emissions from small utility engines. (USA). *SAE Paper* 1999-01-3345.
- Calvert, J., Heywood, J., Sawyer, R. & Seinfeld, J. (1993). Achieving acceptable air quality: some reflections on controlling vehicle emissions. *Science, New series* 261(5117), 37-45.
- Coelho, S., Goldemberg, J., Lucon, O. & Guardabassi, P. (2005). Brazilian sugarcane ethanol: lessons learned. Disponible en: http://cenbio.iee.usp.br/download/publicacoes/STC_Ethanol_SEPT2005.pdf, accesado el 09 de diciembre de 2014.
- Crary, B. (2000). Effects of ethanol on emissions of gasoline LDVs. Toyota Technical Center. Disponible en: http://www.arb.ca.gov/fuels/gasoline/carfg3/toyota_prstn.pdf, accesado el 09 de diciembre de 2014.
- D'Avila, L. (2003). A qualidade do combustíveis no Brasil. Disponible en: http://www.tecnicodepetroleo.ufpr.br/apostilas/combustiveis/Aula-2_qualidade_de_combustiveis.ppt, accesado el 09 de diciembre de 2014.
- Davis, G. & Heil, E. (2000). The development and performance of a high blend ethanol fueled vehicle. *SAE Paper* 2000-01-1602.
- DOE, NREL & NEVC. (2013). Handbook for handling, storing, and dispensing E85. Department of Energy. Disponible en: http://www.afdc.energy.gov/uploads/publication/ethanol_handbook.pdf, accesado el 09 de diciembre de 2014.
- Durbin, T., Miller, J., Younglove, T., Huai, T. & Cocker, K. (2006). Effects of ethanol and volatility parameters on exhaust emissions. Final Report CRC Project N° E-67. C.R.C. Disponible en: <http://www.crcao.org/reports/recentstudies2006/E-67%20Final%20Report.pdf>, accesado el 09 de diciembre de 2014.
- Environment Australia. (2002). Setting the ethanol limits in petrol. Commonwealth of Australia. Disponible en: <http://www.environment.gov.au/archive/fuelquality/publications/ethanol-limit/pubs/ethanoljan02.pdf>, accesado el 09 de diciembre de 2014.
- Faiz, A. & Weaver, C. (1996). Air pollution from motor vehicles: Standards and technology for controlling emissions. The World Bank. Disponible en: <http://www.un.org/esa/gite/iandm/faizpaper.pdf>, accesado el 09 de diciembre de 2014.
- Freudenberger, R. (2009). A guide to small scale ethanol. Alcohol fuel. Industry low-sulfur test program. New Society Publishers, 256 p.
- Fuels. (2007). Backgrounder on low level gasoline blends containing ethanol (Blends containing ethanol at concentrations up to 10% by volume). Disponible en: <http://www.2006fuels.org/ethanol.htm>, accesado el 24 de septiembre de 2014.
- Giroldo, M., Makant, W., Werninghaus, E. & Coelho, E. (2005). Development of 1.6 L flex fuel engine for Brazilian market. *SAE Paper* 2005-01-4130.
- Guerrieri, D., Caffrey, P. & Rao, V. (1995). Investigation into the vehicle exhaust emissions of high percentage ethanol blends. *SAE technical paper* 950777.

- Hammel-Smith, C., Fang, J., Powders, M. & Aabakken, J. (2002). Issues associated with the use of higher ethanol blends. National Renewable Energy Laboratory. Disponible en: <http://www.nrel.gov/docs/fy03osti/32206.pdf>, accesado el 09 de diciembre de 2014.
- Hansen, A. C., Zhang, Q. & Lyne, P. W. (2005). Ethanol-diesel fuel blends a review. *Bioresource Technology*, 96(3): 277-285.
- Harley, R. & Kean, A. (2004). Chemical composition of vehicle-related volatile organic compound emissions in Central California. California Air Resources Board (California). Disponible en: http://www.arb.ca.gov/airways/ccos/docs/II5_0014_Aug04_fr.pdf, accesado el 09 de diciembre de 2014.
- Haskew, H. & Liberty, T. (2006). Fuel permeation from automotive systems: E0, E6, E10 and E85. C.R.C. Inc. Disponible en: <http://www.arb.ca.gov/fuels/gasoline/premodel/e653.pdf>, accesado el 09 de diciembre de 2014.
- He, B., Wang, J., Hao, J., Yan, X. & Xiao, J. (2003). A study on emissions characteristics of an EFI engine with ethanol blended gasoline fuels. *Atmospheric Environment*. 37(7), 949-957.
- Horta, L. (2003). Perspectivas de un Programa de Biocombustibles en América Central. Cepal.
- Hsieh, W., Chen, R., Wu, T. & Lin, T. (2002). Engine performance and pollutant emission of an SI engine using ethanol-gasoline blended fuels. *Atmospheric Environment*. 36(3), 403-410.
- Karman, D. (2003). Ethanol fuelled motor vehicle emissions: A literature review. Air Health Effects Division.
- Knepper, J., Koehl, W., Benson, J., Burns, V. & Gorse, J. (1993). Fuel effects in Auto/Oil High emitting vehicles. *SAE Technical paper* 930137.
- Korotney, D. (1995). Water phase separation in oxygenated gasoline. EPA. Disponible en: <http://epa.gov/oms/regs/fuels/rfg/waterphs.pdf>, accesado el 09 de diciembre de 2014.
- Kortum, D., Haslett, L., Beard, L., Liechty, K., Coryell, M. & Bruner, C. (1997). Interagency Assessment on Oxygenated Fuels. *Nat. Sc. and Tech. Coun. Com. Environment and Natural Resources*. Ed Diane Pub. 260 p.
- Landstreet, T. (2014). High food prices: an investor dilemma. *Forbes*. Disponible en: <http://www.forbes.com/sites/thomaslandstreet/2014/06/03/high-food-prices-an-investors-dilemma/>, accesado el 09 de diciembre de 2014.
- Leikauf, G. (2002). Hazardous air pollutants and asthma. *Environmental Health Perspectives* 110(4), 505-526.
- Leong, S., Muttamara, S. & Laortanakul, P. (2002). Applicability of gasoline containing ethanol as Thailand's alternative fuel to curb toxic VOC pollutants from automobile emission. *Atmospheric Environment*, 36(21), 3495-3503.
- Li, D., Zhen, H., Xingcai, L., Wu-Gao, Z., & Jian-Guang, Y. (2005). Physico-chemical properties of ethanol-diesel blend fuel and its effect on performance and emissions of diesel engines. *Renewable Energy*, 30(6), 967-976.
- Li, X., Qiao, X., Zhang, L., Fang, J., Huang, Z. & Xia, H. (2005). Combustion and emission characteristics of a two-stroke diesel engine operating on alcohol. *Renewable Energy*, 30(13), 2075-2084.
- Liska, A., Yang, H., Bremer, B., Klopfenstein, T., Walters, D., Erickson, G. & Cassman, K. (2009). Improvements in life cycle energy efficiency and greenhouse gas emissions of corn-ethanol. *Journal of Industrial Ecology*, 13, 58-74.
- Maclean, H. & Lave, L. (2013). Evaluating automobile fuel/propulsión system technologies. *Progress in Energy and Combustion Science*, 29(1), 1-69.
- Mantilla, J., Garzón, D. & Galeano, C. (2015). Multivariate analysis of performance and emissions for internal combustion engines running with gasoline-ethanol blends. *Rev. Ingeniería Energética*, 36(3), 232-242.
- Masum, B., Masjuki, H., Kalam, M., Rizwanul, I., Palash, S. & Abedin, M. (2013). Effect of ethanol-gasoline blend on NOx emission in SI engine. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 24, 209-222.

- Mayote, S., Lindhjem, C., Rao, V. & Sklar, M. (1994). Reformulated gasoline effects on exhaust emissions: phase 1: initial investigation of oxygenate, volatility distillation and sulfur effect. *SAE technical paper* 941973.
- Mayote, S., Lindhjem, C., Rao, V. & Sklar, M. (1994). Reformulated gasoline effects on exhaust emissions: phase 2: Continued investigation of the effects of fuel oxygenate content, oxygenate type, sulfur, olefins and distillation parameters. *SAE technical paper* 941974.
- Ministerio de Minas y Energía. Decreto 4892 de diciembre 23 de 2011. Disponible en: <http://www.minminas.gov.co/minminas/downloads/archivos-SoporteRevistas/8302.pdf>, accesado el 09 de diciembre de 2014.
- Niven, R. (2005). Ethanol in gasoline: environmental impacts and sustainability review article. *Renewable and sustainable energy Review*, 9(6), 535-555.
- Ocampo, W. (2006). ¿Es la biogasolina una alternativa ambiental en Colombia? *Rev. Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 38, 7-19.
- Orbital Engine. (2002). A literature review based assessment on the impacts of a 10 % and 20 % ethanol gasoline fuel blend on non-automotive engines. *Environment Australia*. Disponible en: http://www.nmma.org/assets/cabinets/Cabinet103/Impacts_of_a_10%25_and_20%25.pdf, accesado el 09 de diciembre de 2014.
- Patzek, T. (2003). Ethanol from corn: clean renewable fuel for the future, or drain our resources and pockets? *Environment, Development and Sustainability*, 7, 319-336
- Poulopoulos, S., Samaras, D. & Philippopoulos, C. (2001). Regulated and unregulated emissions from an internal combustion engine operating on ethanol-containing fuels. *Atmospheric Environment*, 35(26), 4399-4406.
- Ragazzi, R. & Nelson, K. (1999). The impacts of a 10 % ethanol blended fuel on the exhaust emissions of Tier 0 and Tier 1 Light Duty Gasoline vehicles at 35 °F. Air Pollution Control Division. Disponible en: <http://cospl.coalliance.org/fedora/repository/co%3A1742/he17102et31999internet.pdf/>, accesado el 09 de diciembre de 2014.
- Renewable Fuels Association (2010). Fuel Ethanol Industry Guidelines, Specifications And Procedures. Disponible en: <http://ethanolrfa.org/page/RFA%20Fuel%20Ethanol%20Industry%20Guideline%201210.pdf?nocdn=1>, accesado el 09 de diciembre de 2014.
- Reuter, R., Hochhauser, A., Benson, J., Koehl, W., Burns, V. & Painter, L. (1992). Effects of oxygenated fuels on RVP on automotive emissions-Auto/Oil air quality improvement program. *SAE technical paper* 920326.
- Rondón, M., Mantilla, J. & Muñoz, A. (2015). Análisis de la solubilidad de la mezcla gasolina-etanol-agua a diferentes presiones y temperaturas. *Rev. Universidad Militar Nueva Granada. Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 25(1), 61-75.
- Schifter, I., Vera, M., Díaz, L., Guzmán, E. & Ramos, F. (2001). Environmental implications on the oxygenation of gasoline with ethanol in the metropolitan area of Mexico city. *Environmental Science and Technology*, 35(10), 1893-1901.
- Shapiro, E. (2006). Roundtable on ethanol fuel: automaker view. Disponible en: <http://www.pdfdrive.net/roundtable-on-ethanol-fuel-automaker-view-south-coast-aqmd-e4823147.html>, accesado el 09 de diciembre de 2014.
- Skidmore, M., Cotti, C. & Alm, J. (2013). The political economy of state government subsidy adoption: the case of ethanol. *Economics & Politics*, 25, 162-190.
- Stationary Sources Division-Legal Office. (1998). Proposed determination pursuant to health and safety code section 42830(g) of the ozone forming potential of elevated RVP gasoline containing 10 percent ethanol. Air Resources Board. Disponible en: <http://www.arb.ca.gov/fuels/gasoline/ethanol/ofprpt.pdf>, accesado el 09 de diciembre de 2014.
- Torres, J., Molina, D., Pinto, C. & Rueda, F. (2002). Estudio de la mezcla de gasolina con 10 % de etanol anhidro. Evaluación de propiedades fisicoquímicas. *Rev. Ciencia, Tecnología y Futuro*, 2(3), 71-82.

- Turns, S. (2011). *An introduction to combustion: concepts and applications*. USA: McGraw- Hill. 752 p.
- Universidad Tecnológica de Pereira, Ecopetrol S. A. & Ministerio de Minas y Energía. (s.f.). Efecto de la mezcla de combustible E20 en el parque automotor colombiano. Disponible en: http://oab.ambientebogota.gov.co/apc-aa-files/57c59a-889ca266ee6533c26f970cb14a/efecto_E20_en_parque_automotor.pdf, accesado el 24 de septiembre de 2014.
- Viju, C. & Kerr, W. (2013). Taking an option on the future: subsidizing biofuels for energy security or reducing global warming. *Energy Policy*, 56, 543-548.
- Vitale, R., Boulton, J., Lepage, M., Gauthier, M., Qiu, X. & Lami, S. (s.f.) Modelling the effects of E10 fuels in Canada. Disponible en: <http://www.epa.gov/ttnchie1/conference/ei13/modeling/boulton.pdf>, accesado el 09 de diciembre de 2014.
- Whitten, G. & Reyes, S. (2004). Air quality and ethanol in gasoline. Disponible en: <http://www.ethanol-gec.org/pub.htm>, accesado el 14 de septiembre de 2014.
- Wright, L., Boundy, B., Perlack, B. & Davis, S. (2006). Biomass energy data book. U.S. Department of Energy. Disponible en: http://cta.ornl.gov/bedb/pdf/BEDB4_Full_Doc.pdf, accesado el 09 de diciembre de 2014.
- Wu, C., Chen, R., Pu, J. & Lin, T. (2004). The influence of air-fuel ratio on engine performance and pollutant emission of an SI engine using ethanol-gasoline blended fuels. *Atmospheric Environment*, 38(40), 7093-7100.
- Yücesu, H. & Topgül, T. (2006). Effect of ethanol-gasoline blends on engine performance and exhaust emissions in different compression ratios. *Applied Thermal Engineering*, 26(17-18), 2272-2278.
- Yüksel, F. & Yüksel, B. (2004). The use of ethanol-gasoline blend as a fuel in an SI engine. *Renewable Energy*, 29(7), 1181-1191.
- Zervas, E., Montagne, X. & Lahaye, J. (2002). Emission of alcohol and carbonyl compounds from a spark ignition engine. Influence of fuel and air/fuel equivalence ratio. *Environmental Science and Technology*, 36(11), 2414-2421.

Revisión de los métodos estadísticos multivariados usados en el análisis de calidad de aguas

Ingry Natalia Gómez Miranda^{1*}, Gustavo Antonio Peñuela Mesa¹

¹Grupo de Diagnóstico y Control de la Contaminación - GDCON, Escuela Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia UdeA; Calle 70 N° 52-21, Medellín, Colombia. Teléfono (574) 2196571.

*Autor de correspondencia: ingry.gomez@udea.edu.co

A review of multivariate statistical methods for analysing water quality

ABSTRACT

In aquatic ecosystems is monitored the water to determine their space-temporary variations, generating large and complex arrays of data that require tools that assist in the interpretation thereof, for managers of water resources can inform society the deterioration of these and take corrective action. This review is a revision of multivariate statistical techniques used to examine the spatial and temporal variability of water quality. We consider few techniques like Factor Analysis, which is used in order to reduce the dimensionality of the data and build underlying latent variables or factors that produce the observed variables, these factors can be used as water quality indexes built from the data collected; we also consider cluster and discriminant analysis than is commonly used to study the spatial variability and studying similarities between periods or sampling stations, these three techniques are commonly used for exploratory purposes; for more complex goals such as modeling and prediction, hierarchical models, Multiple Regression and Structural Equations are presented. For all methods, we present their functionality and usability methods and illustrated using case studies. This review describes how these methods can be used in order to study water quality for monitoring spatial and temporal variability of the measures taken.

Editor: Hernández Fernández, J.

Citation: Gómez, I. & Peñuela, G. (2016). Revisión de los métodos estadísticos multivariados usados en el análisis de calidad de aguas. *Revista Mutis* 6(1), 54-63, doi: <http://dx.doi.org/10.21789/22561498.1112>

Received: September 7, 2015. **Accepted:** March 7, 2016. **Published online:** May 31, 2016.

Copyright: ©2016 Gómez, I & Peñuela, G. This is an open-access article, which permits unrestricted use, distributions and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Competing Interests: The authors have no conflict of interest.

Keywords: multivariate statistical methods, structural equations models, hierarchical models, multivariate multiple regression, water quality.

RESUMEN

En los ecosistemas acuáticos se monitorea el agua para determinar sus variaciones espacio-temporales, generando grandes y complejas matrices de datos que requieren herramientas que ayuden en la interpretación de los mismos, para que los administradores de los recursos hídricos puedan informar a la sociedad el deterioro de estos y tomar medidas



correctivas. El presente artículo es una revisión de tema cuyo objetivo es el examen de técnicas estadísticas multivariadas usadas para examinar la variabilidad espacio-temporal de la calidad del agua. En él se presentan diversas técnicas como el análisis factorial, que se usa con el fin de disminuir la dimensionalidad de los datos y construir factores subyacentes o variables latentes que generen las variables observadas, estos factores pueden usarse e interpretarse como índices de calidad del agua construidos a partir de los datos recolectados; también se presenta en análisis de clúster y el análisis discriminante que se usan comúnmente para estudiar la variabilidad espacial, estudiando similitudes entre períodos o estaciones de muestreo, estas tres técnicas se usan comúnmente con fines exploratorios; para objetivos más complejos como el modelamiento y la predicción, se presentan los modelos jerárquicos, de regresión múltiple y de ecuaciones estructurales. Para todos los métodos se presenta su funcionalidad y aplicabilidad y se ilustran usando casos de estudio. Esta revisión describe cómo estos métodos pueden utilizarse con miras a estudiar la calidad del agua con el fin de monitorear espacial y temporalmente la variabilidad de las medidas tomadas.

Palabras clave: métodos estadísticos multivariados, modelos de ecuaciones estructurales, modelos jerárquicos, modelos de regresión múltiple multivariada, calidad de aguas.

INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso escaso e indispensable para la supervivencia humana y de la mayoría de las especies en el planeta, es por ello que se hace necesario administrar eficientemente el recurso hídrico y estudiar los impactos que han generado las actividades antropogénicas y los cambios ambientales que ocurren en las cuencas hídricas, lo que se logra estudiando la calidad del agua. La calidad del agua involucra muchos parámetros que pueden variar espacial y temporalmente, de acuerdo a los vertimientos y cambios climáticos. Estos parámetros están relacionados con la presencia de diferentes contaminantes en el agua, disueltos o en suspensión, en concentraciones que varían a lo largo del recurso hídrico por los vertimientos, las transformaciones bióticas o abióticas, sedimentación, etc. Las condiciones ambientales del agua como pH, potencial redox, tem-

peratura, oxígeno disuelto y conductividad eléctrica pueden favorecer la transformación biótica o abiótica de los contaminantes. Igualmente ocurre con las condiciones hidráulicas del recurso hídrico que pueden favorecer la sedimentación de los contaminantes. Un contaminante puede estar evaluado por uno o más parámetros, y un parámetro puede evaluar uno o más tipos de contaminantes; por esto, varios parámetros están relacionados. Por lo tanto, los parámetros de calidad de aguas pueden variar de un sitio a otro y de un día a otro, y por esto, para la interpretación de los datos que se obtengan de los diferentes parámetros en un recurso hídrico, se hace imperante contar con métodos de análisis de datos que permitan evaluar, de manera simultánea, las múltiples relaciones que existen entre las variables (parámetros) y su evolución espacial y temporal, papel que cumplen a cabalidad los métodos estadísticos multivariados.

La aplicación de diferentes métodos estadísticos multivariados como análisis de clúster (Clúster Analysis CA), análisis de componentes principales (Principal Component Analysis PCA), Análisis Factorial (Factor Analysis FA), y análisis discriminante (Discriminant Analysis DA), son de gran ayuda en la interpretación de matrices de datos complejas para un mejor entendimiento de la calidad del agua, que permiten la identificación de posibles factores o fuentes que afectan los sistemas acuáticos y ofrecen una valiosa herramienta para la administración confiable de los recursos hídricos así como soluciones rápidas a los problemas de contaminación (Shrestha & Kazama, 2007). También existen otros métodos estadísticos que estudian las relaciones de causalidad y dependencia, como son el análisis de correlación canónica (Canonic Correlation Analysis CCA), los modelos jerárquicos (Hierarchical Models), modelos de regresión múltiple multivariada (Multiple Multivariate Regression Models) y los modelos de ecuaciones estructurales (Structural Equation Models SEM). El análisis de correlación canónica es ampliamente usado en calidad de aguas con el fin de estudiar las relaciones entre grupos de parámetros, entregando dos vectores de variables, uno que representa las variables endógenas y otro las exógenas, con la particularidad de que la correlación entre estos vectores es máxima, se ha usado en calidad de aguas por ejemplo estudiando las relaciones entre los parámetros físicos (vector

que representa las variables exógenas) y químicos (vector que representa las variables endógenas) (Noori *et al.*, 2010); los modelos jerárquicos, también conocidos como modelos de efectos mixtos (Mixed Effects Models LMM), se usan con el fin de estudiar la correlación espacial y temporal en caso de ser usados en serie de tiempo, para las medidas repetidas, son especialmente útiles cuando se tienen estaciones de muestreo que funcionan de manera independiente; la regresión múltiple multivariada permite estudiar las relaciones de causalidad y dependencia cuando se tiene un conjunto de variables endógenas *versus* otro conjunto de variables exógenas. Los modelos de regresión múltiple han sido usados para encontrar ecuaciones que permiten predecir o controlar variables que afectan la calidad del agua como, por ejemplo, los sólidos disueltos totales (Chenini & Khemiri, 2009); los modelos de ecuaciones estructurales permiten estudiar, de manera simultánea, las relaciones evaluadas en la regresión múltiple y las relaciones entre las variables observadas (endógenas y exógenas) y factores no observados o latentes, constituyéndose en una combinación del análisis factorial y la regresión múltiple, muy útil para estudiar por completo un ecosistema (Grace, *et al.*, 2010), estudiar la contaminación del agua en un embalse (Liu *et al.*, 1997), o la calidad del agua en un río (Zou & Yu, 1994), entre otros.

El propósito del presente documento es la revisión de técnicas estadísticas multivariadas usadas para examinar la variabilidad espacio-temporal de la calidad del agua. Se presentan las diferencias entre las técnicas, sus ventajas y limitaciones, así como algunas aplicaciones con el fin de identificar las técnicas más apropiadas para diferentes circunstancias.

En la primera parte se presentan brevemente los diferentes métodos, su definición, objetivos y tipos, la comparación entre ellos y la formulación matemática. En la segunda se encuentran algunas aplicaciones de los métodos y algunos errores encontrados en ellas y la comparación entre los métodos. Finalmente, se tienen las conclusiones y las referencias bibliográficas.

MÉTODOS ESTADÍSTICOS MULTIVARIADOS EN LA CALIDAD DEL AGUA

Los métodos estadísticos multivariados son una herramienta muy útil al momento de evaluar múltiples relaciones de manera simultánea en bases de datos de alta complejidad. Es por ello que son de gran utilidad para el modelamiento en casi todas las áreas, porque permiten un acercamiento a los fenómenos de estudio, tanto en calidad de aguas, como en otras áreas de las ciencias ambientales y demás ciencias del conocimiento. El análisis multivariado consiste en una colección de métodos que pueden ser usados cuando se realizan varias mediciones a diversos individuos u objetos en una o más muestras. Las medidas son conocidas como variables y los individuos u objetos como unidades u observaciones (Rencher, 2003).

Los métodos multivariados priman sobre los univariados porque estos últimos están limitados a examinar uno solo o, a lo sumo, unos pocos procesos al tiempo, estos métodos han predominado en los últimos 50 años y no tienen en cuenta las interacciones en los fenómenos o sistemas bajo estudio (Grace, 2006), por lo tanto, los métodos multivariados trascienden la mirada univariada.

Los métodos multivariados más usados en el análisis de calidad de aguas se dividen en: métodos de reducción de dimensión, métodos de agrupamiento, análisis de clasificación, modelos de regresión múltiple, análisis de correlación canónica, modelos jerárquicos y los modelos de ecuaciones estructurales.

Reducción de dimensión

Las variables que se analizan en calidad de aguas pueden presentar, adicional a las estructuras de dependencia entre grupos de variables, estructuras de correlación dentro de estos grupos, lo que viola el supuesto de independencia que existe en la mayoría de los métodos multivariados. Para darle solución a esta situación y cumpliendo el principio de parsimonia en estadística (dar una explicación con la mayor cantidad de información con el menor número de variables), existen los métodos de reducción de dimensión, principalmente el análisis de componentes principales (PCA) y el análisis factorial (FA).

Análisis de componentes principales (PCA)

El PCA es un procedimiento matemático que transforma un conjunto de variables correlacionadas en un conjunto menor de variables no correlacionadas llamadas componentes principales. Esta técnica tiene dos objetivos: (1) Reducción de dimensión y (2) Facilitar la interpretación de los datos (Johnson & Wichern, 2002). En el análisis de componentes principales se busca maximizar la varianza de una combinación lineal de variables, con la menor pérdida de información posible.

Suponga que \mathbf{X} es un vector aleatorio de $p \times 1$ con matriz de varianzas covarianzas $\Sigma_{p \times p}$, entonces:

$$Y_i = \mathbf{a}_i^T \mathbf{X} \quad (1)$$

Donde Y_i es la i -ésima componente principal de \mathbf{X} y \mathbf{a}_i es el i -ésimo vector propio de Σ .

Análisis factorial (FA)

El FA tiene por objeto explicar un conjunto de variables observadas por un pequeño número de variables *latentes* o no observadas llamadas *factores* (Peña, 2002). En el análisis factorial se representan las variables X_1, X_2, \dots, X_p como combinaciones lineales de un pequeño conjunto de variables aleatorias f_1, f_2, \dots, f_m (con $m \ll p$), llamadas factores, donde los factores son *constructos latentes* que generan las X'_2 . El modelo factorial sería:

$$(\mathbf{X} - \boldsymbol{\mu}) = \mathbf{L}\mathbf{F} + \boldsymbol{\varepsilon} \quad (2)$$

Donde $\boldsymbol{\mu}$ es el vector de medias de \mathbf{X} , \mathbf{L} , es la matriz que contiene las cargas o pesos del j -ésimo factor f_j en la i -ésima variable X_i , \mathbf{F} es la matriz que contiene los factores y $\boldsymbol{\varepsilon}$ es el vector de errores que da cuenta de la parte de la variable que es única (no común con otras variables).

Las diferencias entre PCA y FA son señaladas por Rencher (2003) y Peña (2002) así:

1. Los componentes principales están definidos como combinaciones lineales de las variables originales. En FA, las variables originales son expresadas como combinaciones lineales de los factores.

2. En PCA se explica una gran parte de la varianza total de las variables. En FA se busca dar cuenta de las covarianzas o correlaciones entre las variables.

3. PCA es una herramienta descriptiva, mientras que FA presupone un modelo estadístico formal de generación de la muestra dada.

Adicionalmente,

4. En PCA los componentes son ortogonales. En FA existen varias metodologías para estimar los factores, si se cumplen los supuestos del método, se puede estimar el modelo ortogonal usando el método de máxima verosimilitud.

5. En FA los ejes se pueden rotar usando rotación varimax para capturar más varianza. En PCA se pueden rotar pero esto no garantiza que se esté capturando más varianza.

6. Los factores son invariantes ante transformaciones lineales de las variables. PCA es muy sensible a estas transformaciones, incluso si se estandarizan las variables, los componentes son diferentes.

Agrupamiento y clasificación

Los métodos de agrupamiento tienen por objeto agrupar unidades experimentales en grupos homogéneos en función de las similitudes entre ellas, estos métodos se conocen como métodos de *aprendizaje no supervisado* porque son las unidades experimentales las que deciden la manera en la que conforman los grupos homogéneos. Los métodos de clasificación se denominan de *aprendizaje supervisado* porque los grupos están conformados *a priori*, y el método confirma qué tan buenos son los agrupamientos, qué variables son las que los determinan y en qué grupo se ubicaría una nueva unidad experimental.

Métodos de agrupamiento: análisis de clúster

El agrupamiento se realiza aplicando el análisis de clúster, cuyo objetivo es encontrar un agrupamiento óptimo en el cual las observaciones u objetos dentro de cada clúster (grupo) son similares, pero los clústeres son diferentes unos de otros (Rencher, 2003). Existen dos enfoques para el análisis de clúster: el jerárquico y el no jerárquico (Johnson, 1998), y básicamente dependen del objetivo del investigador. El más usual es el jerárquico, observándose el agrupamiento en un gráfico llamado dendograma.

Análisis de clasificación: análisis discriminante (DA)

El análisis discriminante (DA) es una técnica multivariada usada para determinar las variables responsables de la separación de las unidades dentro de los grupos (Bierman *et al.*, 2011) which are based on in situ data collection and hence are often spatially or temporally limited. Remote sensing imagery is increasingly used as a rich source of spatial information, providing more detailed coverage than other methods. But the complexity of information in the imagery requires new analysis techniques that allow us to identify the components and possible causes of spatial and temporal variability. This paper presents a review of methods to analyse spatial and temporal variations in remote sensing data of coastal water quality and discusses and compares these methods and the outcomes they achieve. Selected techniques are illustrated by using a sample dataset of MODIS chlorophyll-a imagery. We consider classification methods (cluster analysis, discriminant analysis. El análisis discriminante puede resolver una serie de preguntas, entre las cuales están determinar si hay diferencias estadísticamente significativas entre dos o más grupos conocidos, estableciendo cuáles variables independientes aportan a las diferencias entre los grupos, y encontrar procedimientos para clasificar unidades dentro de ellos (Hair, 2010). El DA se puede considerar como el análisis de regresión en la que la variable endógena "Y" es categórica, que toma valores o categorías para cada grupo, y las variables exógenas son las variables continuas que determinan a qué grupo pertenecen las unidades.

Los métodos de agrupamiento y clasificación son métodos complementarios. Generalmente, se usan de manera simultánea. Inicialmente se usa el CA, jerárquico en la mayoría de los casos debido a la interpretabilidad y visualización del dendrograma, para agrupar las unidades y, para estos clústeres establecidos, se aplica el DA con el fin de confirmar los agrupamientos, conocer qué variables discriminan mejor entre grupos y, en caso de incorporar una nueva unidad experimental, una estación de muestreo por ejemplo, saber a cuál de los grupos pertenece.

Otros métodos multivariados

Entre otros métodos multivariados están los de regresión lineal múltiple multivariada y los jerárquicos, que permiten encontrar ecuaciones que describen las re-

laciones de dependencia en un conjunto de variables. Los primeros son usados cuando se busca un modelo que describa las relaciones de dependencia entre varias variables endógenas explicadas por un conjunto de variables endógenas. El resultado es un modelo del tipo:

$$Y=X\beta+e \quad (3)$$

Donde **Y** es la matriz que contiene las variables endógenas (explicadas), **X** contiene las variables exógenas (explicatorias), **β** contiene los pesos o contribuciones marginales que tienen las Xs en las Ys, y **e** es el vector de errores.

Los modelos jerárquicos determinan qué variables exógenas predicen o explican mejor la variable endógena y sus interacciones. En estos modelos y otros, basados en el análisis de varianza ANOVA, a las variables exógenas se les llama factores y a sus categorías se les llama niveles. Los modelos jerárquicos usan datos cuya estructura es jerárquica, es decir, las unidades (de observación o experimentales) del primer factor se encuentran anidadas dentro de las unidades del segundo factor, las unidades del segundo factor anidadas en las del tercero y así sucesivamente, por tanto, los parámetros de estos modelos pueden ser visualizados como una estructura lineal jerárquica (Raudenbush & Bryk, 2002).

Los modelos jerárquicos comparados con los modelos de regresión lineal, tienen la ventaja de recoger tanto la variabilidad espacial como la temporal de medidas repetidas para todos los tipos de datos (Pätynen *et al.*, 2013). Mientras que las regresiones lineales tienen la ventaja de que pueden mezclar variables exógenas tanto discretas como continuas, y hasta categóricas, en contraste los modelos jerárquicos no pueden incorporar variables exógenas continuas directamente (Raudenbush & Bryk, 2002).

Modelos de ecuaciones estructurales (SEM)

Los modelos de ecuaciones estructurales, SEM, relacionan estados de entrada, procesos y salidas a través de variables exógenas y endógenas, en los que las variables endógenas pueden convertirse en variables de exógenas en otros momentos. Esta técnica estima relaciones de dependencia múltiples y cruzadas, que incorpora conceptos no observados, llamados constructos. La mejor forma de determinar el modelo de

ecuaciones estructurales es a través de la gráfica denominada diagrama de secuencias, debido a que en esta las relaciones de interdependencia se representan a través de flechas directas que señalan el impacto o causalidad de la variable exógena sobre la variable endógena y, las flechas curvadas señalan la correlación entre las variables. Las ecuaciones del modelo de ecuaciones estructurales son:

$$\eta = \beta\eta + \Gamma\xi + \zeta \quad (4)$$

Donde:

η es el vector de variables aleatorias latentes endógenas, ξ el vector de variables aleatorias latentes exógenas, β la matriz de coeficientes entre latentes dependientes, Γ la matriz de coeficientes entre variables latentes dependientes e independientes y ζ vector de perturbaciones.

$$x = \Lambda_x \xi + \delta_x \quad (5)$$

$$y = \Lambda_y \eta + \varepsilon_x \quad (6)$$

Donde:

x es el vector de p variables observadas, Λ_x la matriz de coeficientes que muestran las relaciones entre las variables latentes y observadas exógenas, ξ la latente exógena y δ el vector de errores asociados a las variables exógenas.

y el vector de q variables observadas, Λ_y la matriz de coeficientes que muestran las relaciones entre las variables latentes y observadas endógenas, η la latente endógena y el vector de errores asociados a variables endógenas.

La ecuación (4) se conoce como el modelo estructural y las ecuaciones (5) y (6) como los modelos de medida.

Validación de supuestos

En estadística, los supuestos son condiciones que se deben cumplir para que los modelos puedan usarse de manera confiable y no llegar a conclusiones erradas en la interpretación de los mismos. En PCA no existen los supuestos porque es un método matemático pero no estadístico, en cambio en el FA sí existen supuestos y se deben hacer validaciones (Johnson & Wichern, 2002); en el análisis de clúster, independiente del método elegido, se deben cumplir los su-

puestos de normalidad e independencia de las variables (Johnson & Wichern, 2002; Rencher, 2003); los supuestos de la regresión múltiple multivariada son los mismos de la regresión múltiple, (Gujarati, 1988); tanto en los modelos jerárquicos (Montgomery, 2008) como en SEM (Hair, 2010) existen supuestos.

APLICACIONES EN CALIDAD DE AGUAS

Los métodos estadísticos multivariados han sido ampliamente usados desde la década de 1980 debido al desarrollo de paquetes estadísticos que facilitan el modelamiento matemático. En calidad de aguas se encuentran aplicaciones con todos los métodos mencionados previamente.

La construcción de índices de calidad de aguas es una de las principales aplicaciones de los métodos de reducción de dimensión, por ejemplo Coletti *et al.* (2010), construyeron un índice de calidad del agua aplicando el análisis factorial para determinar la influencia de las actividades agrícolas en la calidad del recurso hídrico del río Das Pedras ubicado en las regiones de Mogi Guaçu y Estiva Gerbi en Brasil; para ello se analizaron los siguientes parámetros de calidad de aguas: conductividad eléctrica, pH, nitrógeno amoniacal, amonio, nitratos, fósforo total, sólidos suspendidos, turbiedad y oxígeno disuelto, durante trece meses, demostrándose, a partir de dicho índice, que la calidad del agua en el río Das Pedras se ha deteriorado progresivamente debido a las actividades agrícolas.

Los modelos SEM se han usado para proponer valores estándar de los parámetros que inciden en la eutrofización con el fin de apoyar los procesos de legislación y establecer límites en una ecoregión de China (Ji *et al.*, 2013) there has been no nutrient standard established for LE control in many developing countries such as China. This study proposes a structural equation model to assist in the establishment of a lake nutrient standard for drinking water sources in Yunnan-Guizhou Plateau Ecoregion (Yungui Ecoregion; la metodología partió con una consulta a expertos que arrojó una serie de modelos estructurales evaluando datos históricos por más de diez (10) años, determinándose que el fósforo total y la clorofila a fueron las variables determinantes en la eutrofización, inclusive fijaron valores límites para estas. De igual manera, Grace *et al.* (2010), but also because of its promise as a means of representing

theoretical concepts using latent variables. In this paper, we discuss characteristics of ecological theory and some of the challenges for proper specification of theoretical ideas in structural equation models (SE models desarrollaron dos modelos SEM; en el primero pretendieron estudiar la relación entre la recuperación de la vegetación después de una conflagración con la edad de las plantas y la severidad del incendio, en el segundo tenían como objetivo predecir el conteo de especies en un río con base en cuatro variables latentes (estrés abiótico, disturbancia, biomasa y diversidad de plantas); adicionalmente, los investigadores presentaron propuestas de desarrollos teóricos en los SEM. Grace (2008) hace una brevísima descripción de los SEM, análisis de dos casos de estudio, descripción de la notación LISREL (Linear Structural Relations) y un breve recuento histórico del desarrollo de los SEM.

Aplicación de los métodos estadísticos

De otro lado, se ha realizado la combinación de varias técnicas estadísticas con el fin de enriquecer la interpretación de los fenómenos estudiados y complementar los aportes de las técnicas individuales.

Métodos de reducción de dimensión, agrupamiento y clasificación

El análisis de componentes principales se usó, acompañado del análisis de correlación canónica, CCA (Noori *et al.*, 2010), para estudiar el río Karoon en Irán. Se monitorearon 12 parámetros entre los que estaban la turbiedad, los sólidos suspendidos totales, la demanda química de oxígeno, los sulfatos y los nitratos. El objetivo fue identificar las estaciones de muestreo más significativas para el monitoreo de la calidad del agua y los parámetros de calidad más importantes, mediante el PCA, y relacionar los parámetros físicos *versus* los químicos en dicho río, mediante el CCA. Aplicando el análisis de componentes principales se descartaron 4 de las 17 estaciones de muestreo y se determinó una correlación de 0.993 entre los parámetros físicos y químicos.

Bierman *et al.* (2011), realizaron una revisión bibliográfica del uso combinado de PCA, FA, CA y DA para el monitoreo de la calidad del agua en zonas costeras. Los autores recomiendan el uso de los métodos de agrupamiento y clasificación (CA y DA) tanto en el análisis exploratorio, confirmatorio como predictivo, porque resumen e identifican patrones en bases de

datos altamente complejas, mientras que recomiendan el uso de PCA y FA para identificar relaciones entre las variables, identificar variables representativas de un conjunto grande de ellas y crear un conjunto menor de variables que reemplace las originales en análisis posteriores. También recomiendan usar mapas autoorganizados (Self-organising maps-SOM) que son una forma de redes neuronales (no son métodos estadísticos), para extraer patrones en grandes conjuntos de datos, y los semivariogramas para obtener una medida de la variabilidad entre mediciones, conforme su separación espacial se incrementa. Shrestha & Kazama (2007), aplicaron estos métodos en la cuenca del río Fuji en Japón para extraer información acerca de las similitudes o disimilitudes entre sitios de muestreo usando CA, identificación de las variables responsables de las variaciones espaciales y temporales en la calidad del agua del río usando DA, determinación de los factores subyacentes que explican la estructura de la base de datos usando PCA y FA, y la influencia de posibles fuentes antropogénicas en los parámetros de calidad del agua. Se midieron 12 parámetros de calidad del agua en 13 sitios de muestreo a lo largo del río durante las 4 estaciones del año. Los resultados a los que llegaron son: los principales parámetros responsables de la calidad del agua son los relacionados con las descargas al río, la temperatura ambiente y la contaminación orgánica; la cuenca del río se clasifica, según su grado de contaminación, en tres áreas, alta, media y baja, cuyo grado de contaminación es debido principalmente a las fuentes antropogénicas como las aguas residuales domésticas, los fertilizantes y las industrias. También Varol *et al.* (2012) aplicaron estas metodologías estadísticas en la cuenca del río Tigris en Turquía.

Modelos SEM y otros métodos estadísticos

Los modelos SEM se usan combinados con técnicas como PCA, FA, regresión múltiple, los modelos jerárquicos y el análisis de series de tiempo. Zou & Yu (1994), desarrollaron un modelo SEM para modelar la calidad del agua en el río Arkansas en Estados Unidos, monitoreando 14 parámetros mensualmente durante 14 años en una estación de muestreo; el modelo desarrollado se combinó con el análisis factorial para determinar el número de constructos a usar (se eligieron cinco). Obtuvieron cinco modelos que se compararon tanto desde el punto de vista teórico como técnico con el fin de elegir aquel que cumpliera los supues-

tos y que mejor describiera las interacciones entre los diferentes parámetros. Zou & Yu (1994), muestran la validez de los supuestos.

De igual manera, Wu *et al.* (2014) which was first conducted to determine four types of factors, respectively, those for organic pollution, eutrophication, seasonal influence, and sediment pollution. The analysis results effectively help to determine water quality in the watershed of the reservoir. The authors reutilize analysis of moment structures (AMOS) combinaron los SEM y el análisis factorial, para construir un conjunto estándar de métodos que pudieran usar las autoridades que manejan los embalses, para mejorar la calidad de aguas, tanto en las cuencas como en los embalses. Wu *et al.* (2014) usaron 6 estaciones de monitoreo a lo largo de la reserva Fetsui en Taiwán, en las que se midieron 9 parámetros de calidad de agua: pH, temperatura, oxígeno disuelto, demanda bioquímica de oxígeno, sólidos suspendidos, surfactantes aniónicos, nitrógeno amoniacal, fósforo total, y clorofila_a durante dos años y medio. Comprobaron que las 9 variables son generadas por 4 constructos: contaminación orgánica, eutrofización, estacionalidad y contaminación por sedimentos. Se evaluaron tres modelos estructurales a partir de estas variables, pero uno de ellos (modelo 3) fue el más adecuado para el propósito inicial. Esta aplicación presenta el inconveniente de que no valida los supuestos.

La calidad de las aguas subterráneas también se ha estudiado usando los SEM combinados con los modelos de regresión, el análisis de componentes principales y el análisis de clúster. Un ejemplo de ello es el trabajo de Chenini & Khemiri (2009) quienes estudiaron un área de 1250 km² localizados en la región de Atlas en Túnez, en la cual se monitoreó un sistema de tres acuíferos tomando 28 muestras de agua, midiendo 10 parámetros entre octubre y noviembre de 2005. Iniciaron con un PCA para determinar las relaciones entre las propiedades del agua analizadas e identificar los factores que afectan la concentración de cada uno, encontrándose tres componentes principales que acumulan el 70 % de la varianza total; seguidamente realizaron CA en las variables para conocer las semejanzas entre ellas; luego se encuentra un modelo usando la regresión lineal para predecir los sólidos disueltos totales a partir de los valores de magnesio, calcio, sodio, cloro, HCO₃⁻ y el SO₄²⁻; y, finalmente, construyeron un modelo estructural, SEM, para pre-

decir de manera simultánea los sólidos disueltos totales y el cloro, con base en el magnesio, calcio, sodio, HCO₃⁻ y el SO₄²⁻, con el fin de proveer una explicación adecuada de las interacciones simultáneas de las variables en el modelo conceptual.

Otra aplicación en aguas subterráneas, la realizaron Liu *et al.* (1997), quienes usaron los modelos SEM y las series de tiempo para investigar la influencia del clima, la hidrología y la dosificación de nitrógeno en la producción agrícola, sobre el área de Big Spring en Iowa, Estados Unidos. Los investigadores eligieron como variables endógenas la concentración de nitrógeno y las descargas; como variables exógenas la precipitación, la temperatura del aire, la evapotranspiración potencial y el balance de nitrógeno, que se midieron mensualmente entre 1982 y 1991. En el modelamiento se incluyó un rezago de un período de tiempo para las variables endógenas, incorporando las series de tiempo en el modelo SEM. Se ajustó un modelo para cada una de las cuatro estaciones del año: verano, invierno, primavera y otoño, comprobando que la influencia del clima, la producción agrícola y la tendencia creciente en el tiempo de la concentración de nitrógeno en el suelo, son los factores que más afectan la dinámica de la contaminación por nitrógeno en el agua subterránea del área bajo estudio.

Pätynen *et al.* (2013), muestran la aplicación de los modelos SEM y los modelos jerárquicos en el estudio de la ecología acuática, indicando que estos modelos son una importante alternativa para evaluar la interacción entre diferentes variables, conocer la incidencia de factores subyacentes que pueden explicar diversas situaciones en el modelamiento ecológico, modelar espacialmente y desarrollar la creatividad (principalmente en el uso de los SEM). Señalan desventajas de estos modelos, como la gran cantidad de datos que requieren, que no siempre se pueden obtener desde el punto de vista técnico, y la alta capacidad de las herramientas computacionales para el modelamiento.

Comparación de métodos

Los métodos expuestos, más que ser rivales y que el investigador tenga que decidir cuál usar, son complementarios. Los métodos de reducción de dimensión FA y PCA se pueden usar si se incumple el supuesto de independencia de las variables, sin embargo, se debe elegir uno de ellos, se recomienda el uso de FA cuando las variables sean normales

(se pueden usar transformaciones de potencia para normalizar) y se apliquen otros métodos estadísticos posteriormente.

En análisis de clúster se puede realizar de dos formas, jerárquica y no jerárquica. El CA jerárquico se recomienda para tamaños de muestra pequeños dado que el objetivo es conocer las similitudes entre las variables o individuos, el clúster no jerárquico es el adecuado para grandes tamaños de muestra, en este caso observar la separación de los grupos es lo primordial. Generalmente las aplicaciones de CA van seguidas de DA, con el fin de conocer las variables responsables de la separación entre los grupos (o clústeres); y también, aunque menos común, clasificar unidades (estaciones de muestreo por ejemplo) que no habían sido tenidas en cuenta en la observación inicial, en los grupos ya existentes. El CA y DA tienen los supuestos de normalidad e independencia de las variables, lo que provoca que la confiabilidad en los resultados se vea limitada, incluso restringida, cuando no se cumplen.

Los métodos de FA, PCA, CA y DA, son para fines exploratorios. Mientras que el modelamiento usando modelos SEM, jerárquicos, de regresión y demás, son para análisis más profundos que involucran descripción, control y predicción de las relaciones de asociación y dependencia entre las variables.

Los modelos de regresión son una gran familia que agrupa todo el modelamiento estadístico basado en el ANOVA. Sin lugar a dudas son los modelos estadísticos más usados en todas las áreas del conocimiento, comprenden la regresión simple, múltiple, múltiple multivariada, los modelos lineales generalizados (MLG), las series de tiempo, y demás; su gran ventaja es que entregan una o varias ecuaciones que sirven, entre otros, para obtener pronósticos confiables. Tienen los supuestos de normalidad, independencia de las variables exógenas, varianza constante (homocedasticidad) y no autocorrelación de los residuales; el no cumplimiento de estos supuestos presenta diagnósticos y pronósticos poco confiables.

Los SEM son una combinación del análisis factorial confirmatorio y los modelos de regresión, por ello tienen la gran ventaja de que permiten modelar simultáneamente múltiples relaciones de causalidad y dependencia; sin embargo, requieren un conocimiento *a priori* del fenómeno estudiado y las posibles relaciones entre las variables, debido a que los SEM res-

ponden a fines confirmatorios más que exploratorios. Además, tienen fuertes supuestos de normalidad, co-integración y demás, propios de los modelos estadísticos complejos.

El investigador puede usar las técnicas exploratorias y de modelación estadística de manera simultánea en el análisis de un mismo fenómeno, esto le permitirá tener una visión más completa del comportamiento univariado, multivariado y de las relaciones entre las variables.

CONCLUSIONES

Los métodos estadísticos multivariados son herramientas muy valiosas en los estudios de la calidad del agua. Permiten reducir la dimensionalidad de los datos, determinar factores subyacentes que generen las variables involucradas en los estudios, conocer las variaciones espaciales y temporales de las dinámicas presentes en los cuerpos de agua, obtener modelos que permiten evaluar las relaciones entre las variables de manera simultánea y, principalmente, apoyar la toma de decisiones mediante el diagnóstico y predicción de los fenómenos estudiados. Estos métodos pueden complementarse con otros análisis como los de redes neuronales y los geoestadísticos para tener una visión más amplia de los fenómenos bajo estudio.

En la actualidad existe la tendencia en la aplicación de los modelos de ecuaciones estructurales en la calidad de aguas, esto se debe a su gran potencia al evaluar las relaciones de entrada, los procesos y las salidas a través de variables exógenas y endógenas, en los que las variables endógenas pueden convertirse en variables exógenas en otros momentos, e incorpora conceptos no observados, llamados constructos, lo que permite un mayor y mejor acercamiento al comportamiento de las dinámicas en los cuerpos de agua.

En varias de las aplicaciones se encontró que no se validan los supuestos, lo cual puede ocasionar una falta grave a la confiabilidad de los modelos. Se recomienda que siempre que se use un método estadístico se validen los supuestos del modelo, en caso de violarse alguno o varios de ellos, se deben hacer los procedimientos a que haya lugar para corregirlos.

Es de resaltar que estos métodos requieren de un alto poder computacional y de altos volúmenes de datos, lo que en muchas ocasiones no es viable económica y técnicamente.

REFERENCIAS

- Abbasi, T., & Abbasi, S. A. (2012). *Water Quality Indices*. Elsevier Science.
- Bierman, P., Lewis, M., Ostendorf, B., & Tanner, J. (2011). A review of methods for analysing spatial and temporal patterns in coastal water quality. *Ecological Indicators*, 11(1), 103-114.
- Chenini, I., & Khemiri, S. (2009). Evaluation of ground water quality using multiple linear regression and structural equation modeling. *International Journal of Environmental Science & Technology*, 6(3), 509-519.
- Coletti, C., Testezlaf, R., Ribeiro, T. A. P., Souza, R. T. G. de, & Pereira, D. de A. (2010). Water quality index using multivariate factorial analysis. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 14(2), 517-522.
- Grace, J. B. (2006). *Structural Equation Modeling and Natural Systems*. Cambridge University Press, Ed.
- Grace, J. B. (2008). Structural Equation Modeling for Observational Studies. *The Journal of Wildlife Management*, 72(1), 14-22.
- Grace, J. B., Anderson, T. M., Olff, H., & Scheiner, S. M. (2010). On the specification of structural equation models for ecological systems. *Ecological Monographs*, 80(1), 67-87.
- Gujarati, D. N. (1988). *Basic Econometrics*. McGraw-Hill.
- Hair, J. F. (2010). *Multivariate Data Analysis* (7th ed.). Prentice Hall.
- Ji, D., Xi, B., Su, J., Huo, S., He, L., Liu, H., & Yang, Q. (2013). A model to determine the lake nutrient standards for drinking water sources in Yunnan-Guizhou Plateau Ecoregion, China. *Journal of Environmental Sciences*, 25(9), 1773-1783.
- Johnson, D. E. (1998). *Applied Multivariate Methods for Data Analysts*. Duxbury Press.
- Johnson, R. A., & Wichern, D. W. (2002). *Applied Multivariate Statistical Analysis* (5th ed.). Prentice Hall.
- Liu, Z.-J., Hallberg, G. R., & Malanson, G. P. (1997). Structural Equation Modeling of Dynamics of Nitrate Contamination in Ground Water1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 33(6), 1219-1235.
- Montgomery, D. C. (2008). *Design and Analysis of Experiments*. John Wiley & Sons.
- Noori, R., Sabahi, M. S., Karbassi, A. R., Baghvand, A., & Taati Zadeh, H. (2010). Multivariate statistical analysis of surface water quality based on correlations and variations in the data set. *Desalination*, 260(1-3), 129-136.
- Pätynen, A., Kotamäki, N., & Malve, O. (2013). Alternative approaches to modelling lake ecosystems. *Freshwater Reviews*, 6(2), 63-74.
- Peña, D. (2002). *Análisis de datos multivariantes* (1st ed.). Mac-Graw Hill.
- Raudenbush, S. W., & Bryk, A. S. (2002). *Hierarchical Linear Models: Applications and Data Analysis Methods*. SAGE Publications.
- Rencher, A. C. (2003). *Methods of Multivariate Analysis*. (2003 John Wiley & Sons, Ed.) (second ed.). Wiley-Interscience.
- Shrestha, S., & Kazama, F. (2007). Assessment of surface water quality using multivariate statistical techniques: A case study of the Fuji river basin, Japan. *Environmental Modelling & Software*, 22(4), 464-475.
- Varol, M., Gökot, B., Bekleyen, A., & Şen, B. (2012). Spatial and temporal variations in surface water quality of the dam reservoirs in the Tigris River basin, Turkey. *CATENA*, 92(0), 11-21.
- Wu, E., Tsai, C., Cheng, J., Kuo, S., & Lu, W. (2014). The Application of Water Quality Monitoring Data in a Reservoir Watershed Using AMOS Confirmatory Factor Analyses. *Environmental Modeling & Assessment*, 19(4), 325-333.
- Zou, S., & Yu, Y.-S. (1994). A general structural equation model for river water quality data. *Journal of Hydrology*, 162(1-2), 197-209.

El juego de rol: aportes de la educación universitaria a la cultura de la paz

Liliam Palomeque-Forero¹

¹ Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias, Departamento de Química, Carrera 45 N° 26-85, 451/ 302-4, Bogotá D. C., Colombia. Correo electrónico: lapalomequef@unal.edu.co

Role-play: higher education contributions to peace culture

ABSTRACT

The main objective in this work was to analyze the acceptance and response regard a socio-scientific issue using a role-playing game as classroom strategy in a general chemistry college course. Students participate in a game with five randomly assigned roles; during exercise, they had to assume different positions and points of view and present their ideas about the subject: “genetic modified crops”. Acceptance of the activity was evaluated with an online survey that included multiple choice and open questions. Participants greeted positively the strategy classroom and discovered the personal skills necessary to face and deal with points of view different from their own that they encountered in conversations and explanations. This kind of exercise could be extremely useful at all levels of education, including at the university level, concerning the current need and relevance of a culture of dialogue and acceptance of diversity of thought.

Keywords: peace culture, role-play, GM crops.

Editor: Hernández Fernández, J.

Citation: Palomeque, L. (2016). El juego de rol: aportes de la educación universitaria a la cultura de la paz. *Revista Mutis* 6(1), 64-72, doi: <http://dx.doi.org/10.21789/22561498.1113>

Received: February 29, 2016. **Accepted:** April 5, 2016. **Published on line:** May 31, 2016.

Copyright: ©2016 Palomeque, L. This is an open-access article, which permits unrestricted use, distributions and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Competing Interests: The authors have no conflict of interest.

RESUMEN

El objetivo principal del presente trabajo fue analizar la aceptación de un juego de rol diseñado como estrategia de aula para discutir un tema sociocientífico en un curso universitario de química general. Los estudiantes participaron en un juego con cinco roles asignados aleatoriamente; durante el ejercicio, debieron asumir diferentes posiciones y puntos de vista y exponer sus ideas sobre el tema: “cultivos transgénicos”. La aceptación de la actividad se evaluó con una encuesta en línea que incluyó escogencia múltiple y preguntas abiertas. Los participantes acogieron positivamente la estrategia de aula y descubrieron por sí mismos habilidades personales necesarias para afrontar conversaciones en las que surgen diversas explicaciones, justificaciones y opiniones, que pueden re-



sultar contrarias a las propias. Este tipo de ejercicios puede ser de gran utilidad como parte del proceso de formación en el ámbito universitario, a propósito de la actual necesidad y pertinencia de una cultura basada en el diálogo y la aceptación de la diversidad de pensamiento.

Palabras clave: cultura de paz, juego de rol, transgénicos.

INTRODUCCIÓN

La cultura de la paz

En un país como Colombia que ha vivido intermitentes aproximaciones a la finalización del conflicto armado, se han investigado y establecido metodologías, elementos constitutivos, definiciones y estrategias hacia la generación de las condiciones adecuadas para que la sociedad disfrute de escenarios pacíficos duraderos. La cultura de la paz se soporta en dos ejes fundamentales: la educación y la sociedad civil (Poveda-Villafañe, 2014). Las situaciones que se prevén durante el posconflicto incluyen, por una parte, la capacidad para resolver conflictos, y por otra las acciones de tipo restaurativo, como el perdón, la prevención y la sanación. La cultura de la paz se define, además, como “todas aquellas prácticas que se desarrollan en diferentes contextos y que van encaminadas a incidir sobre los sujetos para desaprender juicios, actitudes, valores y relacionamientos que originan actos y manifestaciones violentas” (Poveda-Villafañe, 2014). Cuando se plantean las necesidades para una sociedad en paz después de tantos años de violencia, también se establecen como prioritarias aquellas acciones enfocadas al reconocimiento de semejanzas y diferencias, y a preguntarnos como país y como sociedad, por la manera de asumir estas diferencias, y por el modo como se resuelven y se tratan los conflictos cotidianos. Es importante reconocer que deben hacerse cambios y, como lo establecen los autores Guerra y Plata, ser conscientes de que esta nueva situación “pone a nuestra sociedad en la necesidad de recuperar esa propiedad de las culturas de aprender a aprender y de corregir, para pasar al círculo virtuoso de una sociedad orientada al diálogo, el desarrollo humano, la inclusión y la participación”. Uno de los ejes principales de la cultura de la paz es el diálogo como “medio de solución de las diferencias”, ya que propicia

el desarrollo humano y social. Lo anterior “demanda esfuerzos en la educación y transformaciones en el mundo de la cultura” (Guerra & Plata, 2005).

La educación es, entonces, una de las principales estrategias para evitar el resurgimiento de los conflictos, una vez lograda la paz. La educación permite la reconstrucción socioeconómica, y es a través de ella que se inculcan nuevos valores sociales y democráticos. Su potencial para enseñar nuevas actitudes, habilidades y comportamientos, y para reducir polarizaciones económicas sociales y étnicas, es alto, indiscutible y valioso. Los colegios, y en general todo el sistema educativo, deben desempeñar un papel constructivo en las sociedades del posconflicto, considerando que en las aulas se aprende sobre la vida, se amplía la mente y se comprende la diversidad del mundo (Márquez, 2013). De hecho, las acciones de cooperación enfocadas al desarrollo en sociedades en posconflicto, incluyen la educación como un factor que contribuye a minimizar conflictos internos y al mantenimiento de la paz (Cilliers & Mbadlanyana, 2010). Los gastos de inversión y la capacidad de un Estado de administrar adecuadamente los recursos y generar impacto social en una situación de posconflicto, están relacionados con la provisión de derechos como la salud y la educación (Rodríguez, 2010).

El desarrollo de habilidades relacionadas con la cultura de la paz, no parecería tener cabida en campos como la química y su enseñanza, pero resulta oportuno y pertinente en la totalidad de las acciones de la escuela, a todos los niveles. La adquisición de competencias relacionadas con las interacciones entre la ciencia y la sociedad o, simplemente, aquellas que son útiles para la comunicación entre los individuos, incluyen el diseño de nuevas acciones en las aulas, y es deber de los educadores permitir espacios abiertos al diálogo, a la solidaridad, a la convivencia y a la libre expresión de opiniones y argumentos. Las estrategias que incluyen espacios de participación también mejoran las capacidades para ponerse en el lugar de los demás, para interactuar, mediar, compartir, opinar y reflexionar y, en últimas, propician el desarrollo de pensamiento crítico (Arias & Palomeque, 2013).

Juegos de rol y la enseñanza de las ciencias naturales

El juego es un integrante habitual del desarrollo humano, que se diluye a medida que se avanza en edad; no obstante, se ha identificado la importancia que este tiene en la vida de las personas, de la cual no se exime la formación en la universidad, dado que se trata de una etapa importante en la vida de muchos seres humanos; gracias a los juegos la gente tiende a recordar experiencias positivas, y los estudiantes son propensos a retener las lecciones que han aprendido a través de ejercicios interactivos debido al disfrute experimentado. Estos ejercicios además de ser educativos ayudan a captar la atención de los estudiantes y a motivarlos (Shaw, 2004).

Los juegos de rol han sido empleados como estrategia de aula, sobretodo en escuelas de negocios o programas de psicología. Han sido aprovechados en diferentes niveles educativos porque permiten descubrir y compartir múltiples perspectivas, al explorar temas ecológicos y sociales, por ejemplo. Son un ejercicio útil para el entendimiento de las implicaciones políticas y sociales de las decisiones que se toman en la sociedad, y para revisar los diferentes puntos de vista de la ciencia y de los científicos (Howes & Cruz, 2009). En algunos esquemas de juego los participantes resuelven situaciones o problemas, para avanzar o ganar objetivos. Los juegos acarrearán alta carga cultural y social, a la vez que aseguran espacios para repensar los estereotipos poniéndolos como elemento de análisis dentro del aula al abordar una realidad. Se recomienda que los juegos se planteen de tal manera que las etapas de análisis, argumentación, discusión y debate, estén seguidas de las debidas conclusiones y puntos finales de acuerdo. En general, la participación en los juegos favorece adelantos en expresión corporal y oral, habilidades de raciocinio rápido, capacidad de interpretación y, dependiendo de la actividad, capacidad de escritura (Dias-Cavalcanti & Barbosa-Soares, 2009). Las actividades que propician la generación de reacciones frente a otros en circunstancias emocionales, pueden además estimular la creatividad, la conciencia comunal, el crecimiento personal (Dinapoli, 2009), las habilidades para el trabajo en grupo, la resolución de problemas y conflictos, la toma de decisiones y la dirección de sistemas complejos (Ortiz-de-Urbina Criado, Medina Salgado, & De La Calle Durán, 2010). Los juegos de rol espontáneos o pre-

parados con anterioridad, generan entusiasmo e interés en los participantes, y aunque se propusieron inicialmente para alcanzar objetivos en el aprendizaje de teoría económica, por ejemplo, se han extendido y empleado en otras disciplinas. Dentro de los juegos se incluyen los debates, controversias cooperativas, actuaciones dramáticas y aeróbicos mentales, entre otros (DeNeve & Heppner, 1997). También se han encontrado resultados interesantes con el empleo de juegos de rol para mejorar la comprensión sobre la ciencia y la naturaleza de la ciencia como parte del proceso de alfabetización científica y tecnológica (Vázquez-Alonso, Aponte, Monassero-Mas, & Montesano, 2014); estos autores, en particular, han planteado el abordaje de un tema específico y muestran el análisis de las evidencias de la mejoría en la comprensión de la temáticas, con buenos resultados en cuanto a la visión crítica equilibrada. En el aula de enseñanza de la química se encuentran exploraciones que registran mejoras relacionadas con la responsabilidad y los métodos de estudio independiente. En química los juegos son un modo de interactuar de manera cercana con modelos de roles de la vida real, generando el reto de aplicar los conocimientos disciplinares del área en una sociedad tecnológicamente compleja, donde las soluciones a los problemas no siempre son sencillas o predecibles (Trumbore, 1974). También se encuentran en esta área propuestas que incluyen el uso de juegos elaborados en los que se plantea una situación-problema relacionada con química, sobre la cual se deben evaluar las soluciones, complicaciones e implicaciones ambientales y de seguridad; los estudiantes asumen el reto a manera de "misión". Los resultados de estas propuestas didácticas demuestran la utilidad de las actividades lúdicas para el desarrollo de "destrezas, habilidades y estrategias". Los juegos, en general, favorecen "la sociabilidad, desarrollan la capacidad creativa, crítica y comunicativa del individuo" (Morelli & Hernández, 2014). En el mismo sentido este tipo de actividades "permiten al jugador (estudiante) una organización de ideas de tal suerte que pueda extraer aquellas consideradas como fundamentales para relacionarlas con otras situaciones, haciendo que el aprendizaje sea significativo, situación que contribuye a una formación profesional más integral" (Barbato, 1999). A través de los juegos se promueve un enfoque de aprendizaje profundo y holístico que requiere que los estudiantes interactúen y colaboren para completar una tarea asignada. El contexto del juego de rol requiere que los estudiantes

adopten perspectivas diferentes y piensen reflexivamente sobre la información que representa el grupo, beneficios estos que conectan, de modo indiscutible, esta metodología con la obtención de aprendizaje significativo en la docencia universitaria (Schaap, 2005). El juego de rol tiene múltiples motivaciones para los estudiantes entre las que se mencionan: asumir ideas y posiciones distintas a las propias, trabajo en equipo, empoderamiento en la toma de decisiones en el juego, mayor compromiso con la asistencia a clases; todo lo anterior se transforma en razones poderosas por las cuales un docente debiera considerar la posibilidad de incorporar a su aula este tipo de metodologías (Porter, 2008). Los juegos de rol, en general, propician espacios de discusión, promueven el trabajo en equipo, generan entusiasmo e interés en los educandos y desarrollan en ellos conciencia sobre sus sentimientos y los sentimientos de los demás. “El juego de rol es una herramienta de participación activa del alumno, que facilita el aprendizaje cooperativo y que, además, demuestra ser más efectiva que los métodos tradicionales para la formación en competencias” (Ortiz-de-Urbina Criado, M.; Medina Salgado, S.; De La Calle Durán, C., 2010). Las debilidades que poseen los juegos de rol como estrategia de enseñanza se relacionan con su limitada utilidad, el difícil uso con población de personas mayores con poca o ninguna educación formal y dificultades de los participantes para concluir y extrapolar las situaciones trabajadas (Arias & Palomeque, 2013).

Uso de temas sociocientíficos en el aula

Es ya conocido el uso deliberado de temas sociocientíficos en el aula (SSI, sigla por su nombre en inglés: Socio-Scientific Issues) que promueven el diálogo, la discusión y el debate. En general se eligen temas controversiales que conllevan algún grado de razonamiento moral o de evaluación de elementos éticos, para finalmente llegar a la resolución de preguntas o cuestiones propuestas. La intención además, es que este tipo de ejercicios tenga algún significado en la experiencia personal de los participantes y que se requiera el uso de evidencias y conocimientos científicos sólidos sobre el tema planteado (Zeidler, D.L.; Nichols, B.H., 2009) (Zeidler, Sadler, Applebaum, & Callahan, 2009).

METODOLOGÍA

Características del curso y participantes

El trabajo se realizó con estudiantes de pregrado del Programa de Química, (Facultad de Ciencias) inscritos en una asignatura denominada Química Fundamental; esta asignatura es la que introduce a los estudiantes del Programa en el lenguaje y conceptos fundamentales de esta ciencia; además de los objetivos académicos, se busca generar identidad con la profesión y que los novatos entiendan los alcances de los estudios que comienzan. La asignatura tiene espacios para la discusión sobre la química y su relación con otras ciencias, sobre la química en la cotidianidad y sobre los avances actuales; cuenta con asesorías especiales por parte de expertos en psicología y consejería estudiantil con lo que se pretende asistirlos para que generen mejores métodos de estudio, para que desarrollen habilidades de expresión oral y escrita, y para favorecer una adecuada adaptación a la vida universitaria; todo lo anterior tiene como objetivo disminuir la deserción en el primer año. Todos los estudiantes (25 en total), inscribieron la asignatura por primera vez. Su promedio de edad fue 17 años. El 16 % eran mujeres y el 84 % hombres.

Metodología de la clase con juego de rol

Se recomendaron lecturas sobre el tema “cultivos genéticamente modificados”, tomando como base artículos de divulgación científica que presentaban la información desde varios puntos de vista y que contenían cifras y datos sobre la situación del tema en Colombia (Chaparro-Giraldo, 2011) (Vélez, 2011). Los estudiantes hicieron las lecturas previamente. Al iniciar la sesión, participaron en un sorteo para formar grupos de 5 personas. El problema planteado fue: ¿qué piensa de los cultivos transgénicos? Cada una de las personas del grupo asumió un rol específico, asignado aleatoriamente. Los roles fueron: a) periodista; b) consumidor; c) productor de semillas para cultivos transgénicos; d) agente de control gubernamental, y e) campesino/indígena. Durante la sesión, cada estudiante participó en la discusión grupal defendiendo o rechazando los cultivos de este tipo, según el rol asignado y su opinión personal; el rol fue cambiado una vez, aleatoriamente, al interior del grupo, de modo que cada persona tuvo que argumentar desde dos puntos de vista. Después de la discusión al interior de cada equipo, se hicieron grupos con las personas

del mismo rol y siguieron argumentando. En la última parte de la sesión, se escogió un representante de cada rol y se socializaron las diferentes posiciones relatando cuáles habían sido las opiniones discutidas y cómo se había logrado llegar a las conclusiones de la jornada. La aceptación de la actividad se evaluó con el uso de una encuesta de percepción con preguntas de escogencia múltiple y preguntas abiertas. El análisis de la aceptación de la actividad se constituye en uno de los principales propósitos del presente trabajo. Las respuestas dadas a las preguntas se expresan como porcentaje. Las respuestas dadas a las pregun-

tas abiertas se organizaron como nubes de palabras con preponderancia dada por el tamaño de letra.

RESULTADOS Y ANÁLISIS

Resultados de la encuesta

Los estudiantes respondieron una encuesta de opinión sobre la actividad en la que se examinaban las experiencias vividas durante el juego y la opinión que les merecían. Las preguntas y respuestas de la encuesta se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Preguntas de la encuesta aplicada y respuestas obtenidas.

Pregunta	Si (%)	No (%)
Me sentí cómodo trabajando en grupo durante el juego de rol	92	8
Siento que conocí mejor a mis compañeros durante la actividad: juego de rol	92	8
El juego de rol me generó ansiedad	8	92
Me gustó la idea de participar en un juego de rol en clase	100	0
Me parecen interesantes los ejercicios de clase sobre temas controversiales	92	8
Las instrucciones del juego fueron claras y suficientes	92	8
Le conté a mis familiares o amigos cercanos que había participado en un juego de rol en la clase de química	40	60
Pude expresar mis opiniones fácilmente según los roles asignados	68	32

Las respuestas dejan ver que el juego fue bien acogido. No generó especial angustia, confusión o incomodidad. Al parecer, según lo observado en el aula y según las respuestas dadas, la actividad generó interés y satisfacción. No se notó especial impacto fuera del aula, aunque esto podría deberse a que la encuesta se aplicó el mismo día de la actividad, de manera que pudo no haber tiempo suficiente para que la comentaran en su entorno social cercano. Casi todos los participantes expresaron fácilmente sus opiniones, según los roles, aunque, se notó que la personalidad definía de cierto modo la participación o uso continuo de la palabra. La dinámica del juego se entendió con facilidad. La percepción sobre un mejor conocimiento de los compañeros de aula (92% respondieron que conocieron mejor a sus compañeros) es un logro importante en el proceso formativo y de autoconocimiento en el que se basa el esquema general del curso.

Además de los cuestionamientos expuestos en la tabla 1, se hicieron tres preguntas abiertas. La primera pregunta abierta fue: "Proponga otros temas que crea de interés y que pudieran trabajarse con esta metodología de clase", con lo cual se buscaba encontrar qué es personalmente relevante para los estudiantes y en qué están pensando; esto es un importante punto de partida para comprender los intereses particulares del grupo de alumnos (Zeidler & Nichols, 2009) y los posibles direccionamientos que, a futuro, pudieran hacerse en otras clases guiadas con metodologías como la aplicada en el presente trabajo o similares. Los temas más sugeridos se muestran en la tabla 2; los temas más populares fueron los relacionados con contaminación, educación y combustibles.

Tabla 2. Temas propuestos por los estudiantes para futuros juegos de rol.

Contaminación
Educación
Combustibles
Guerras químicas – Armamento químico
Sobrepoblación
Energías renovables
Minería
Medicina: cáncer – eutanasia
Violencia en la ciudad
Problemas sociales de la propia universidad

Los dos siguientes cuestionamientos para responder abiertamente (“Según su criterio, ¿cuáles habilidades personales se desarrollan mediante estos ejercicios de aula?” y “Escriba las tres principales conclusiones que le han quedado en claro sobre el tema *cultivos transgénicos*, después de la actividad”), se analizaron generando nubes de palabras en el programa de uso libre “Wordle” (© 2013 Jonathan Feinberg); las nubes dan mayor importancia a las palabras que apa-

recen con mayor frecuencia en el texto de origen. Las imágenes 1 y 2 (creadas en <http://www.wordle.net/create>), muestran el resultado obtenido al analizar las respuestas de los estudiantes que participaron en el juego de rol.

En la figura 1 se nota que la percepción sobre las principales habilidades afianzadas con la metodología, tienen que ver con la argumentación y las habilidades para escuchar y pensar de manera crítica. Se destacan palabras de especial evocación como: expresar, comprender, respetar, comunicar. Aparecen referencias a la tolerancia, la adaptación, la seguridad, el autocontrol, los acuerdos, y otras acciones como convencer y concluir. Un resultado importante obtenido con la aplicación del juego fue que los estudiantes fueron quienes establecieron, por sí mismos, las bondades del uso del juego, encontrándose que las principales habilidades que se buscaban fortalecer fueron las que ellos descubrieron al analizar su propia experiencia. Sobre este punto en particular, además de los resultados encontrados en las respuestas a la encuesta, el trabajo en el aula demostró que todos los estudiantes asumieron bien sus papeles y entendieron el objetivo del juego, exponiendo gran capacidad para la toma de decisiones grupales democráticas, el fomento de los valores humanos y el fortalecimiento de habilidades relacionadas con la inteligencia emocional.



Figura 1. Habilidades personales.

En la figura 2 resalta las palabras más empleadas al concluir sobre el juego empleado en el aula. Se nota la aparición de palabras con especial significado como: Colombia, acuerdo, beneficios, información, naturaleza, tecnología, correcto e incorrecto. La palabra corrupción llama la atención porque, justamente, una gran conclusión en el aula fue la necesidad de mantener incorruptibles los entes de control que garantizan el cumplimiento de las

regulaciones y normas, y tienen un papel de especial importancia al asegurar que la población esté bien informada. La referencia a los indígenas y campesinos fue recurrente, lo que puede interpretarse como un buen resultado ya que, al parecer gracias al juego, se toma conciencia de los intereses, necesidades, derechos y problemáticas de estos grupos sociales tan alejados de la realidad citadina de los jóvenes.

El principal aporte de este trabajo es demostrar cómo puede incluirse un juego de rol en el esquema de una clase de química básica universitaria como parte de las actividades para desarrollar habilidades de mediación y resolución de conflictos, indispensables en la sociedad actual y futura, pensada como un escenario pacífico y tolerante y dispuesto al diálogo y a la aceptación de las diferencias.

Los buenos resultados obtenidos en el aula y la buena aceptación de este tipo de ejercicios sencillos y de corta duración, sugieren que podrían incluirse más frecuentemente como parte de la formación de los estudiantes no solo como científicos, sino como ciudadanos conscientes de la toma de decisiones informadas, y de su debida participación pública en materia de ciencia y tecnología (Bickerstaff, Lorenzoni, Jones, & Pidgeon, 2010), considerando la pluralidad de los entornos sociales y culturales con los que interactúan.

Durante el juego se fijaron posiciones claras con argumentos sólidos, en un clima de respeto, entendimiento del otro y aceptación de las diferencias.

REFERENCIAS

- Arias, M. & Palomeque, L. (2013). *Memorias de IX Congreso Internacional sobre el Enfoque Basado en Competencias (CIEBC)*, Medellín-Colombia: CIEBC. Archivos digitales.
- Barbato, M. (1999). El juego es algo serio. (F. d. Santiago de Chile: Pontificia Universidad Católica de Chile, Ed.) *C. Pregnam (comp.), Juego, aprendizaje y creatividad*. 75-85.
- Bickerstaff, K., Lorenzoni, I., Jones, M. & Pidgeon, N. (2010). Locating scientific citizenship: The institutional contexts and cultures of public engagement. *Science Technology and Human Values*, 35(4), 474-500.
- Chaparro-Giraldo, A. (2011). Soberanía alimentaria y cultivos transgénicos: ¿una relación imposible? *Innovación y Ciencia*, XVIII(2), 28-35.
- Cilliers, J. & Mbadlanyana, T. (2010). El desarrollo y sus relaciones con la paz y la seguridad en África: Observaciones de la Asociación Estratégica UE-África. *Cuadernos de Estrategia*. 146, 123-147.
- DeNeve, K. & Heppner, M. (1997). Role Play Simulations: The Assessment of an Active Learning Technique and Comparisons with Traditional Lectures. *Innovative Higher Education*, 21(3), 231-245.
- Dias-Cavalcanti, E. & Barbosa-Soares, H. (2009). O uso do jogo de roles (roleplaying game) como estratégia de discussão e avaliação do conhecimento químico. *Revista Eletrônica de Enseñanza de las Ciencias*, 8(1), 255-282.
- Dinapoli, R. (2009). Using dramatic role-play to develop emotional aptitude. *IJES International Journal of English Studies*, 9(2), 97-110.
- Guerra, M. & Plata, J. (2005). Estado de la investigación sobre conflicto, posconflicto, reconciliación y papel de la sociedad civil en Colombia. *Revista de Estudios Sociales*, 21, 81-92.
- Howes, E. & Cruz, B. (2009). Role-Playing in Science Education: An Effective Strategy for Developing Multiple Perspectives. *Journal of Elementary School Education*, 21(3), 33-45.
- Márquez, A. (2013). El papel de la educación en situaciones de posconflicto: estrategias y recomendaciones. *Hallazgos*. 11(21), 223-245.
- Morelli, A. & Hernández, S. (2014). Un juego de video para la enseñanza de la disciplina química. *Congreso Iberoamericano de Ciencia, Tecnología, Innovación y Educación*. Buenos Aires, 1-8.
- Ortiz-de-Urbina Criado, M., Medina Salgado, S. & De La Calle Durán, C. (2010). Herramientas para el aprendizaje colaborativo: una aplicación práctica del juego de rol. *Revista Teoría de la Educación: Educación y Cultura en la Sociedad de la Información*, 11(3). 277-300.
- Porter, A. (2008). Role-Playing and Religion: Using Games to Educate Millennials. *Teaching Theology & Religion*, 11(4). 230-235.
- Poveda-Villafañe, L. (2014). Sociedad civil y educación: Reflexiones desde una perspectiva de paz. *Revista Latinoamericana de Derechos Humanos*, 25(1), 227-241.

- Rodríguez, L.M. (2010). Gasto social y ayuda internacional en posconflicto (1974-2007). *Archivos de Economía*, 364, 1-50.
- Schaap, A. (2005). Learning Political Theory by Role Playing. *Politics*, 25(1), 46-52.
- Shaw, C. (2004). Using role-play scenarios in the IR classroom: An examination of exercises on peacekeeping operations and foreign policy decision making. *International Studies Perspectives*, 5(1), 1-22.
- Trumbore, C. (1974). A Role- Play Exercise in General Chemistry. *Journal of Chemical Education*, 51(2), 117-118.
- Vázquez-Alonso, A., Aponte, A., Monassero-Mas, M. & Montesano, M. (2014). Una secuencia de enseñanza-aprendizaje sobre un tema socio-científico: análisis y evaluación de su aplicación en el aula. *Educación Química*, 25(E1), 190-202.
- Vélez, G. (2011). Los cultivos de maíz y algodón transgénicos en Colombia. *Innovación y Ciencia*, XVI-II(2), 36-47.
- Zeidler, D. & Nichols, B. (2009). Socioscientific Issues: Theory and Practice. *Journal of Elementary Education*, 21(2), 49-58.
- Zeidler, D., Sadler, T., Applebaum, S. & Callahan, B. (2009). Advancing Reflective Judgment through Socioscientific Issues. *Journal of Research in Science Teaching*, 46(1), 74-101.

MUTIS

REVISTA DE CIENCIAS NATURALES E INGENIERÍA DE LA UNIVERSIDAD JORGE TADEO LOZANO

Instrucciones para autores

ENVÍOS DE ARTÍCULOS

La revista *Mutis* acepta permanentemente los siguientes tipos de artículos:

1. Artículo de investigación científica y tecnológica: documento que presenta, de manera detallada, los resultados originales de proyectos terminados de investigación.
2. Artículo de métodos: documento que presenta la invención o estandarización de un método experimental, computacional, o educativo, entre otros.
3. Artículo de revisión (estado del arte): es una revisión bibliográfica de por lo menos 50 referencias, con el fin de dar cuenta sobre los avances y las tendencias de desarrollo de un campo particular de las ciencias naturales e ingeniería.
4. Comunicación corta: documento que presenta resultados parciales de una investigación en desarrollo cuya publicación sea de gran importancia.

Los trabajos que se presentan a consideración de la revista *Mutis*, se deben enviar vía correo electrónico a revista.mutis@utadeo.edu.co con copia a javier.hernandez@utadeo.edu.co y cesaro.diaz@utadeo.edu.co (Asunto: artículo revista *Mutis*) en formato de procesador de texto habilitado para modificaciones (Microsoft Word). El artículo debe estar escrito en español o inglés, con una extensión máxima de 25 páginas (incluyendo tablas, figuras y referencias), con márgenes simétricos de 2 cm, sin columnas, con títulos y subtítulos alineados a la izquierda, en letra Times New Roman, tamaño 12 y en espacio doble. Para facilitar el proceso de evaluación, se deben numerar todos los renglones del trabajo. Los trabajos deben tener la siguiente estructura y cumplir con los siguientes requisitos:

Tipo de artículo. El tipo de artículo (*Short communication, Research article o Review article*) debe ser colocado en mayúscula, negrilla y alineado a la derecha en la parte superior.

Título. El título debe representar con precisión y de manera concisa el contenido del trabajo sin exceder 15 palabras. Se debe escribir con letras tamaño de fuente 16, en minúsculas, en negrilla y alineado a la izquierda.

Título corto. Debe sugerirse un título corto de no más de 5 palabras que resuma el título original, el cual se colocará en las páginas impares del texto publicado.

Autores. Debe escribirse nombre completo de los autores, separados por comas y tamaño de fuente 12. El autor para correspondencia debe marcarse con un asterisco como superíndice al final del apellido. Cada afiliación debe estar precedido por el número que se insertó como superíndice al final del apellido de cada autor. No se deben incluir títulos académicos ni las posiciones o cargos que los autores ocupan. Las afiliaciones se deben escribir en este orden: Universidad, facultad, programa, laboratorio o grupo (si aplica), dirección, ciudad, país, *correo electrónico del autor para correspondencia. Ejemplo:

Yvonne Sarmiento Rangel,¹ Ariadna Hazel Vergel^{2*}

¹Universidad Jorge Tadeo Lozano, Facultad de Ciencias Naturales e Ingeniería, Departamento de Ciencias Naturales y Ambientales. Grupo de Investigación Genética, Biología Molecular y Bioinformática – GENBIMOL, Carrera 4 N° 22-61, Bogotá D. C., Colombia. CP 011110

²Instituto de Investigaciones de Viandas Tropicales (INIVIT), Apartado 6, Santo Domingo, Villa Clara, Cuba. CP 53000.
Correo electrónico: arhazel@inivit.cu

Resumen. Debe tener un máximo de 250 palabras. El texto del resumen debe ir en tamaño de fuente 12 Times New Roman. El resumen debe incluir objetivo, métodos, resultados concretos de la investigación y una conclusión general.

Palabras clave. Deben escogerse un máximo de 5 palabras claves. Palabras diferentes incluidas en el título.

Abstract. Debe ser una traducción correcta y precisa al idioma inglés del resumen que aparece en español. Se usa el mismo estilo ya descrito para el resumen en español.

Keywords. Debe ser una traducción correcta y precisa al idioma inglés de las palabras clave que aparecen en español. Se usa el mismo estilo ya descrito para las palabras clave en español.

Introducción. Donde se habla sobre el origen de la investigación, interés y visión general del tema a tratar.

Materiales y métodos. No aplica para artículo de revisión. Descripción detallada de técnicas, equipos y reactivos utilizados en el desarrollo de la investigación.

Resultados. No aplica para artículo de revisión. Donde se hace una presentación clara de los resultados de investigación.

Discusión. Donde se realiza la interpretación y análisis de los resultados de investigación comparándolo con resultados previamente publicados. Pueden presentarse tablas o figuras para sintetizar los resultados. Si se han realizado análisis estadísticos se deberá describir la procedencia de los datos y el método estadístico empleado.

Conclusiones. Deben basarse en los resultados obtenidos y estar relacionados con la hipótesis o planteamiento del problema descrito en la introducción.

Agradecimientos. Los autores agradecerán de manera corta y concisa a instituciones o personas que hayan aportado de manera relevante a la investigación. Es de carácter opcional.

Ecuaciones. Las ecuaciones se deben escribir centradas con respecto al texto principal y se deben numerar continuamente a lo largo del texto. Cada ecuación debe estar enumerada con un número entre paréntesis ubicado en el margen derecho del texto. El significado

y las unidades deben explicarse inmediatamente después de la ecuación en que se utilicen por primera vez.

Cantidades y unidades. Para todas las cantidades numéricas, se debe utilizar una coma para separar los miles y un punto para indicar las cifras decimales. Se recomienda utilizar el Sistema Internacional de Unidades.

Tablas. Las tablas se deben numerar continuamente a lo largo del texto. El encabezado de cada tabla debe incluir la palabra **Tabla** (en negrilla) seguida del número arábigo consecutivo correspondiente, y de una breve descripción del contenido de la tabla. Tanto el encabezado como el contenido de la tabla se deben escribir en tamaño de fuente 10. Solo deben usarse líneas horizontales para separar las entradas de la tabla. No deben usarse líneas verticales para separar las columnas. En el caso de necesitarse algún pie de tabla, este debe estar escrito con tamaño de fuente 8. Las tablas no deben duplicar la información dada en las figuras.

Figuras. Las figuras (o fotografías) se deben numerar de manera consecutiva a lo largo del texto. El rótulo de cada figura debe estar en parte inferior de la figura y debe incluir la palabra **Figura** (en negrilla) seguida del número arábigo correspondiente, y de una breve descripción del contenido de la figura. El rótulo de la figura se debe escribir en tamaño de fuente 10. Las figuras deben incluirse como imágenes originales importadas o copiadas al archivo del trabajo desde una herramienta gráfica (por ejemplo, de *Microsoft Excel*) con una resolución de 300 dpi de tal manera que la legibilidad no se sacrifique cuando el tamaño de las figuras se ajuste durante el proceso de edición. No se publicará por ningún motivo información de fotografías descargadas por internet sin el permiso expreso del autor.

Referencias bibliográficas. Se debe utilizar a lo largo del texto el sistema de citación APA que utiliza los apellidos de autores seguidos del año de publicación entre paréntesis. La lista de las referencias se debe dar al final del documento después de la sección de Conclusiones y debe estar organizada en orden alfabético de acuerdo a la inicial del primer apellido del primer autor. En esta lista solamente se deben colocar las referencias citadas en el texto. Todas las referencias se deben escribir en tamaño de fuente 12 Times New Roman.

EJEMPLOS:

ARTÍCULO

Giraldo, G., Talens, P., Fito, P., & Chiralt, A. (2003). Influence of sucrose solution concentration on kinetics and yield during osmotic dehydration of mango. *Journal of food Engineering*, 58(1), 33-43.

LIBRO

Shames, I. H., & Shames, I. H. (1982). *Mechanics of fluids* (pp. 8-36). New York: McGraw-Hill.

CAPÍTULO DE LIBRO

Bertucco, A. &. (2002). Micronization of a polysaccharide by a supercritical antisolvent technique. En J. &. Williams (ed), *Supercritical Fluids Methods and Protocols*. (págs. 335-412). New Jersey: Humana Press, Inc.

DOCUMENTO DE INTERNET

Benson, T. (Nov. 17, 2005). *Forces on a Rocket*. Consultado en octubre 2, 2008, Disponible en: <http://exploration.grc.nasa.gov/education/rocket/rktfor.html>, accesado el XX de XX de XXXX

TESIS DE GRADO

Yépez, B. (2009). Glicerólisis e hidrólisis de triglicéridos saturados, en dióxido de carbono supercrítico. Tesis Doctoral, Escuela de Ingeniería Química, Universidad del Valle, Cali, Colombia.

En caso de dudas comunicarse con los editores (revista.mutis@utadeo.edu.co, cesaro.diaz@utadeo.edu.co, javier.hernandez@utadeo.edu.co). Estas instrucciones quedan supeditadas a los cambios que el Comité editorial disponga.



Comité Evaluador

DIANA VARGAS OVIEDO
Universidad de los Andes

EDUARDO CASTRO MONTERO
Universidad de Chile

SERGIO ANÍBAL ÁLVAREZ ARMIJO
Universidad de Chile

SIMÓN REIF
Universidad del Valle

LUIS ALEJANDRO ARIAS RODRÍGUEZ
Universidad Jorge Tadeo Lozano

MADELEYNE PARRA FUENTES
Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria – Corpoica

CARLOS MARIO GARZÓN OSPINA
Universidad Nacional de Colombia

FRANK RODOLFO FONSECA FONSECA
Universidad Nacional de Colombia

MAURICIO ANDRÉS RUIZ OCHOA
Universidad de La Guajira

VIVIANA OSORNO ACOSTA
Universidad del Bosque

JACIPT ALEXANDER RAMÓN VALENCIA
Universidad de Pamplona

MÓNICA MORENO MACHADO
Universidad de Pamplona



UNIVERSIDAD DE BOGOTÁ JORGE TADEO LOZANO

ESTA REVISTA ELECTRÓNICA
ES EDITADA POR LA
UNIVERSIDAD DE BOGOTÁ
JORGE TADEO LOZANO.
SE FINALIZÓ
EN EL MES DE MAYO
DE 2016