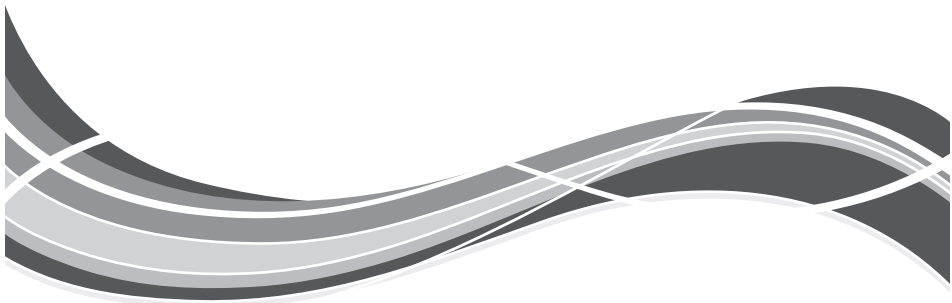




Development and Transversality Lasallian Research and Science

# DESARROLLO Y TRANSVERSALIDAD

serie Lasallista Investigación y Ciencia



001.4

C822 Corporación Universitaria Lasallista. Desarrollo y transversalidad.

Caldas: Corporación Universitaria Lasallista, 2011.  
309 p. (Serie Lasallista Investigación y Ciencia).

ISBN: 978-958-8406-14-5

Derechos reservados conforme a la ley

1. ANTIOXIDANTES– 2. UCHUVA – 3. PROGRAMAS SEIS SIGMA – 4. ENSEÑANZA  
CON AYUDA DE COMPUTADORES – 5. NEUROPSICOLOGÍA – 6. INDUSTRIA  
AVÍCOLA – 7. MUERTE – 8. BANANO – 9. – REDES SOCIALES (INTERNET).

© De los capítulos: las opiniones, conceptos, tablas, gráficas, ilustraciones y fotografías que hacen parte de cada uno de los capítulos, son responsabilidad exclusiva de los autores.

**ISBN:** 978-958-8406-14-5

Derechos reservados conforme a la ley

### **Presidente del Consejo Superior**

*Chairman of the Superior Council*

Hermano José Bianor Gallego Botero

### **Rector**

*Rector*

J. Eduardo Murillo Bocanegra, PhD.

### **Editor**

*Editor*

Luis Fernando Garcés Giraldo

### **Comité Editorial**

*Editorial Board*

Luis Fernando Garcés Giraldo, DSc. Corporación Universitaria Lasallista

Juan Carlos Restrepo Botero, PhD. Corporación Universitaria Lasallista

María Gladys Romero Quiroga, PhD. Universidad San Buenaventura

Mario Fernando Cerón Muñoz, PhD. Universidad de Antioquia

Edison Javier Osorio Durango, PhD. Universidad de Antioquia

### **Correctora de texto**

*Proofreader*

Lorenza Correa Restrepo

### **Traductor**

*Translator*

Juan David Tous Ramírez

### **Apoyo Editorial**

*Editorial assistance*

Jovany Arley Sepúlveda Aguirre

Cindy Tatiana Vélez Osorio

Diagramación e impresión

*Layout and printing*

Editorial Artes y Letras S.A.S.

e-mail: artesyletras@une.net.co

PBX (57-4) 372 77 16

Itagüí, Colombia

Fecha de edición: 30 de julio de 2011

Edición 300 ejemplares

# Tabla de Contenido

## Table of Contents

### PRESENTACIÓN / PRESENTATION

7 *J. Eduardo Murillo B.*

---

### PARTE I / PART I

### EDUCACIÓN Y SOCIEDAD / EDUCATION AND SOCIETY

Capítulo 1 / Chapter 1

WIKIAPRENDIZAJES: hacia un modelo de “motivación”  
pedagógica en las redes sociales digitales

Wikiaprendizajes (wikilearnings): a way to a pedagogical “motivation”  
in digital social networks

9 *Luis David Tobón López*

---

Capítulo 2 / Chapter 2

El pluralismo como lógica del discurso ético contemporáneo

Pluralism as a contemporary ethical discourse’s logics

21 *Jairo Alvarado Sánchez*

---

Capítulo 3 / Chapter 3

Representación de la muerte en el niño

Death’s representation in children

37 *Claudia Patricia Ortiz Escobar, Ingrid Buriticá Londoño*

---

Capítulo 4 / Chapter 4

Neuropsicología y funciones ejecutivas

Neuropsychology and executive functions

49 *Juan Carlos Restrepo Botero, David Andrés Molina González*

---

**PARTE II / PART II**  
**CIENCIAS ADMINISTRATIVAS Y AGROPECUARIAS /**  
**ADMINISTRATIVE, AGRICULTURAL AND LIVESTOCK SCIENCES**

Capítulo 5 / Chapter 5  
La investigación en administración en Colombia  
Research on management in Colombia

67 *Rodrigo Posada Bernal*

---

Capítulo 6 / Chapter 6  
Capital natural, funciones ambientales y recurso hídrico en ganadería  
de leche: una reflexión analítica desde la teoría general de sistemas  
Natural capital, environmental functions and water resources for milk cattle:  
an analytical reflection from the general systems theory

83 *Carlos Federico Álvarez Hincapié, Víctor Hugo Borda Yepes*

---

Capítulo 7 / Chapter 7  
Composición de la leche de cabra y factores nutricionales que  
afectan el contenido de sus componentes  
Goat milk's composition and nutrition factors that affect the contents  
of its components

93 *Oswaldo Bedoya Mejía, Ricardo Rosero Noguera, Sandra L. Posada*

---

Capítulo 8 / Chapter 8  
Análisis de la legislación sanitaria y ambiental para empresas  
del sector avícola y sugerencias para su aplicación  
Analysis of the sanitary and environmental laws for poultry companies and  
suggestions for their applications

*Victoria Eugenia Cano Díaz, Luz Marina Roldán Aristizábal,*  
111 *Rafael Ochoa Velásquez, Luz Adriana Gutiérrez Ramírez*

---

**PARTE III / PART III**  
**INGENIERÍA Y CIENCIA / ENGINEERING AND SCIENCE**

Capítulo 9 / Chapter 9  
Antioxidantes: importancia biológica y métodos para medir su actividad  
Antioxidants: biological relevance and methods to measure their activity

129 *Julian Londoño Londoño*

---

Capítulo 10 / Chapter 10  
Caracterización mecánica y físico-química del banano tipo exportación  
(*Cavendish valery*)  
Mechanical and physical-chemical characteristics of export-type bananas  
(*Cavendish valery*)

163 *Leonidas de Jesús Millán Cardona, Héctor José Ciro Velásquez*

---

Capítulo 11 / Chapter 11

**Inhibición de la polifenoloxidasa extraída del banano (*Cavendish*) por medio de algunos derivados del isoespintanol**

Inhibition of polyphenoloxidase from bananas (*Cavendish*) by the use of some isoespintanol derivatives

193 *Maritza Andrea Gil Garzón, Benjamín Alberto Rojano, Carlos Arturo Guerrero Eraso*

---

Capítulo 12 / Chapter 12

**Desarrollo de nuevos productos de uchuva y fresa con valor agregado**

Development of new products from physalis and strawberries with added value

249 *Ana María Restrepo Duque, Misael Cortés Rodríguez*

---

Capítulo 13 / Chapter 13

**Seis sigma: un enfoque teórico y aplicado en el ámbito empresarial basándose en información científica**

Six sigma: a theoretical focus applied in companies with a scientific information basis

291 *Rodrigo Andrés Gómez Montoya, Santiago Barrera Rendón*

---



# Presentación

Uno de los propósitos que debemos cumplir las instituciones de educación superior es no sólo investigar con pertinencia científica y social, sino posibilitar la difusión del conocimiento, producto de esas acciones específicas en materia investigativa. Eso nos ha llevado en la Corporación Universitaria Lasallista a implementar, de manera sistémica, una serie de publicaciones difusoras del conocimiento, como es el caso particular de la entrega que hacemos del libro, *Desarrollo y transversalidad*, serie Lasallista Investigación y Ciencia. Aquí aplica, sin duda ninguna, el proverbio árabe cuando nos indica que: “*Libros, caminos y días dan al hombre sabiduría*”.

Esta segunda entrega de la serie “Lasallista Investigación y Ciencia” compendia varios trabajos, producto del esfuerzo, la dedicación y el análisis de nuestros docentes en la indagación constante de diversas áreas del conocimiento, que contribuyen de manera positiva a la formación integral de nuestros estudiantes, parte muy importante de nuestro quehacer universitario.

El libro *Desarrollo y transversalidad*, consecuente con nuestros programas académicos y nuestras áreas de interés en materia investigativa, contiene una serie de artículos que responden a tres grandes temas dispuestos de la siguiente manera: Parte I, Educación y Sociedad; Parte II, Ciencias Administrativas y Agropecuarias, y Parte III, Ingeniería y Ciencia.

Durante el presente año hemos concertado con nuestros docentes investigadores la importancia de definir los campos de investigación, hacia donde vamos a enfocar nuestro accionar investigativo

y hemos acordado, de manera conjunta, centrar nuestros proyectos de investigación en un campo que involucra todos nuestros programas y nuestra decidida orientación al sector agropecuario; de ahí que el campo de investigación seleccionado responda a un macro-tema: **“Gestión agropecuaria y desarrollo regional sustentable”**. Tienen cabida en él, investigaciones multidisciplinarias y transversales, dado que, a la par que estudiamos el desarrollo del sector agropecuario, involucramos su incidencia en el medioambiente y en la producción alimentaria, y visualizamos la importancia que en estos procesos tienen diversos factores relacionados con lo social, lo económico, lo psicológico y lo cultural.

Mediante la publicación programada de nuestra serie “Lasallista Investigación y Ciencia”, tendremos oportunidad de dar a conocer al mundo científico, académico, empresarial, gremial, estudiantil y estatal, el resultado de nuestras continuas indagaciones sobre los temas que nos hemos propuesto y que, como ya lo mencionáramos anteriormente, tienen que ver con los sectores agrario, pecuario, ambiental, alimentario, productivo, ingenieril, educativo, social, económico, psicológico y cultural. *“Los problemas son oportunidades para demostrar lo que se sabe”*, afirmaba Duke Ellington, compositor y músico estadounidense.

Esperamos que el esfuerzo que hace nuestra Corporación Universitaria Lasallista, en aportar su granito de arena al desarrollo del conocimiento y, por ende, del país, mediante este tipo de publicaciones, sea no solo de buen recibo, sino que sirva de consulta, y coadyuve al desarrollo de otros procesos investigativos que generen alternativas de solución a muchos de los problemas que enfrentamos en el sector primario de la economía.

Finalizo citando a Maurice Maeterlinck, escritor belga, quien afirma: *“Cada vez que cometo un error me parece descubrir una verdad que no conocía”*.

J. Eduardo Murillo B.

# WIKIAPRENDIZAJES: hacia un modelo de “motivación” pedagógica en las redes sociales digitales

Luis David Tobón López

## Resumen

Wikiaprendizajes es una experiencia concebida como un espacio de experimentación-acción. Se trabajó de manera colaborativa con estudiantes de la carrera Comunicación y Periodismo de la Corporación Universitaria Lasallista de Medellín, Colombia y estudiantes de Medicina de La Universidad Nacional del Comahue en Argentina. Para facilitar el intercambio, se utilizaron grupos en Google y en Facebook. Está previsto para el 2011 replicar este trabajo convocando no sólo a estudiantes de otras carreras, sino también integrando a la propuesta, docentes y estudiantes de universidades de otros países de América Latina. Se prevé, asimismo, la publicación de la experiencia en formato papel y en formato digital bajo licencia de Creative Commons.

**Palabras clave:** wikiaprendizajes, TIC, redes sociales digitales, innovación pedagógica, trabajo colaborativo, wiki, laboratorio, intercambio educativo, web 2.0, motivación, participación acción.

---

\* Docente de tiempo completo Corporación Universitaria Lasallista, coordinador áreas digitales. Director Observatorio Iberoamericano de Comunicaciones Digitales capítulo Colombia. Comunicador Social Periodista Universidad Pontificia Bolivariana, Especialista en Educación y Nuevas Tecnologías FLACSO Argentina. Actualmente cursando doctorado en Relaciones Internacionales Iberoamericanas (Políticas Públicas en TIC), Universidad Rey Juan Carlos, Madrid España.

## WIKIAPRENDIZAJES (wikilearnings): a way to a pedagogical “motivaction” in digital social networks

### Abstract

Wikiaprendizajes (Wikilearnings) is a experience created as a space for experiments-action. It was made in a collaborative way with students from the Communications and Journalism program from Corporación Universitaria Lasallista in Medellín, Colombia, and Medicine students from Universidad Nacional del Comahue, in Argentina. In order to facilitate the exchange, Facebook and Google groups were used. A replication of this work is intended to be made in 2011 not only including students from other programs, but also teachers and students from other Latin American universities. It is also intended to publish this experience on paper and in a digital format under a Creative Commons license.

**Key words:** wikiaprendizajes, IT, social networks, pedagogical innovation,, collaborative work, wiki, laboratory, educational exchange, web 2.0, motivation, participation, action.

### Wikiaprendizajes: usos educativos de las redes sociales digitales. Experiencia Argentina-Colombia

Este no es un libro cualquiera, es más, es posible que ni siquiera sea un libro. En todo caso es una fuente de conocimiento desorganizado, que tuvo como origen la inspiración de querer hacer las cosas de manera diferente. ¿Facebook? ¿Grupos de Google? ¿Messenger? Esos son “gadgets”, “jugueticos” que no aportan mucho al saber científico dirán algunas voces, y quizá tengan razón. Pues bien, sin muchas pretensiones, la experiencia WIKIAPRENDIZAJES es, principalmente, un experimento, que se desarrolla gracias al trabajo colaborativo entre estudiantes colombianos y argentinos, y que además tendrá una segunda fase con estudiantes y docentes de 5 países iberoamericanos. No vamos a decir que estamos inventando a You Tube o a Blogger, pero en todo caso, trazamos un camino con múltiples ramificaciones, en el que esperamos, al menos, tener muchos aprendizajes, en el intercambio entre seres humanos, que no miran las redes sociales digitales, sólo como el espacio para “chismosear” en la web.

Acudimos a grandes cambios tecnológicos que afectan diversos ámbitos en los cuales nos desenvolvemos socialmente. La educación no es ajena

a las nuevas iniciativas, los cambios metodológicos y de enfoque; es por ese motivo que con el trabajo que en esta ocasión queremos presentar, pretendemos mostrar otras alternativas de pensar las redes sociales y sus interesantes usos educativos desde la Academia.

Normalmente decimos que el discurso del docente debe ser significativo y constructivista, y debe propiciar el trabajo colaborativo. Pero, a veces, esto resulta difícil de alcanzar, y la fuerza del día a día en el aula propicia otras dinámicas que suelen ser contrarias a aquello que se dice.

Las redes sociales digitales han propiciado un cambio en diversos ámbitos de la vida; por tal motivo, investigadores como Pablo Mancini<sup>1</sup> plantean frases similares a esta, pero con el mismo sentido: “El usuario es el contenido”; y de esta manera, sabemos que las jerarquías en las relaciones se hacen bidireccionales o multidireccionales<sup>2</sup>.

“Desde sus comienzos, la cultura de Internet se ha basado en la libertad”<sup>3</sup>, y precisamente, esa “libertad” es la que puede convertirse en referente para las relaciones en el aula de clase.

El aula, cuando hablamos de programas académicos presenciales, trasciende las fronteras, y es en esa pequeña “microsociedad”, en la cual podemos construir sueños, y aplicarlos. Las tecnologías de la información y la comunicación<sup>4</sup> deben ir más allá de la instrumentalización, y ser pensadas desde la pedagogía en los usos<sup>5</sup>.

“La estabilidad en el intercambio de las comunicaciones mediadas por redes de sociabilidad hace posible organizar movimientos participativos en el ciberespacio<sup>6</sup>. Y precisamente, no sólo tenemos que estar ante intervenciones educativas en línea, para propiciar dichos intercambios, lo podemos hacer desde la presencialidad que se combina con la virtualidad (blended learning).

WIKIAPRENDIZAJES, como lo hemos definido, es hacer trabajo colaborativo-significativo de múltiples aprendizajes, con jóvenes estudiantes de diferentes países. De esta manera, sabemos que el proceso educativo requiere de altas dosis de motivación y de referentes próximos. Es así como hemos utilizado en este proyecto redes sociales que normalmente son “vetadas”, desde la institucionalidad educativa, pero una vez más cito una frase que considero lo resume todo: “Nosotros no somos para las cosas, sino las cosas para nosotros”; la pronuncio con frecuencia, esto quiere decir que todo depende del uso que hagamos de los dispositivos, los softwares, y sin

caer en que lo único importante es la visión instrumental, y que sólo desde el ámbito de la dotación técnica, se logran los aprendizajes compartidos y las experiencias pedagógicas exitosas.

Desde algunos trabajos y reflexiones compartidos con la profesora Teresa Pérez, de la Universidad Nacional del Comahue en la Patagonia Argentina, comenzamos a tejer el sueño; y fue así como quisimos potenciar y desmitificar un poco, por supuesto desde lo micro, eso de las redes sociales y en especial Facebook y Grupos de Google, puesto que una y otra red social o grupo de comunidades ha tenido sus señalamientos: “Chismosiadero y pornografía”, respectivamente, para resumirlo de una manera coloquial.

¿Es la solución apagar el televisor como se lo ha preguntado tantas veces, nuestro querido sociólogo Jesús Martín Barbero?<sup>7</sup> Para el televisor, o para cualquier otro dispositivo, en este caso hablamos del software para redes sociales digitales, la solución “no será apagarlo”, pegarle, esconderlo o dañarlo. Se trata de darle un uso significativo, que de acuerdo con los intereses, en este caso, pedagógicos y didácticos, nos sirva para innovar y abrir el campo de las posibilidades que nos ofrecen las tecnologías de la información y la comunicación.

“El uso que los internautas hacen de las distintas herramientas de comunicación basadas en la red se da en función de los objetivos sociales que persiguen”<sup>8</sup>. Y es así como encontramos redes sociales especializadas, pero, en definitiva, son “las personas” quienes definen los usos.

Está bien, no lo neguemos, en nuestro contexto educativo cercano, sabemos que muchas instituciones optan por la salida de “apagar el dispositivo”. Con alegría perversa, y quizá un poco irresponsable, hace algunos años me di cuenta en una clase, de que los estudiantes no podían ingresar al MSN (Servicio de mensajería instantánea Messenger de Hotmail), sin embargo, faltó poco tiempo para que ellos encontraran alternativas que dieran solución a aquello que querían hacer, mientras estaban en la sala de informática. ¿Y cómo es que logran chatear?, le dije a uno de ellos. Asustado, tuvo que decirme que accedía al msn por medio de una herramienta online llamada Meebo<sup>a</sup>. Aunque mi primera reacción fue pensar en hacer el reporte a la coordinación de sistemas para que bloquearan dicha pági-

---

a Aplicación web que permite ingresar a diferentes operadores de mensajería instantánea como Yahoo, Google Talk y Hotmail Messenger. Disponible en: <http://www.meebo.com/>

na, supe que no cambiaría las cosas, puesto que a la siguiente semana del bloqueo, seguramente encontrarían Webmessenger<sup>b</sup>, o cualquier sitio web similar para realizar las conexiones que quisieran.

Entonces es precisamente después de esas experiencias repetidas, que la profesora Teresa Pérez y yo, hemos coincidido en que no se trata de prohibir el uso de las redes sociales digitales en clase, sino más bien, potenciarlas desde un término que nos gusta bastante: ¡La MOTIVACIÓN! De esa manera buscamos que los estudiantes puedan participar de un laboratorio pedagógico permanente desde sus propias motivaciones, y esto permite la ejecución, en acciones concretas que organizan, y a las cuales, ellos les encuentran sentido.

De algo tan sencillo surge nuestra idea conjunta de realizar WIKIAPRENDIZAJES, puesto que más allá de una investigación aplicada, regida por los parámetros tradicionales conocidos, nosotros decidimos equivocarnos de una vez, y sobre la marcha ir ajustando dichos errores; obviamente, no quiere decir esto que pierda validez la investigación y sus métodos como normalmente los conocemos, pero nuestra experiencia fue distinta.

No tuvimos una experiencia perfecta, no fue color de rosas, sin embargo, quedamos muy satisfechos con una primera versión de la experiencia que, como ya hemos dicho, se basa en darle un uso significativo, innovador y educativo a las redes sociales digitales, escenarios en los cuales los estudiantes son protagonistas.

¿Facebook? ¿MSN? ¿Grupos de Google? ¿Skype? ¿You Tube? Sí, esas etiquetas que a veces pueden asustar tanto a algunos sectores del profesorado fueron las palabras, por decirlo de algún modo, que quisimos potenciar desde la experiencia WIKIAPRENDIZAJES.

Valga decir que este es un proyecto específico que se enmarca en un modelo constructivista que hoy tiene una referencia en la web y se trata de “Pensando en TIC”<sup>c</sup>, un portal web tipo red social, que he liderado, sección de un noticiero regional, e iniciativa que pretende compartir experiencias pedagógicas con estudiantes, profesores, académicos investigadores, exalumnos y toda la red de personas que “piensen” y hagan en TIC.

---

b Aplicación web que permite ingresar a diferentes operadores de mensajería instantánea como Yahoo, Google Talk y Hotmail Messenger. Disponible en: <http://www.webmessenger.es/>

c Luis David Tobón López coordina, crea y dirige: Laboratorio pedagógico online, unión de experiencias iberoamericanas. Pensando en TIC. Disponible en: <http://pensandoentic.net/ptic/>

www.pensandoentic.net es la dirección electrónica de este espacio, que hace parte de los blogs del Observatorio Iberoamericano de Comunicaciones Digitales, convenio que tenemos en Colombia desde La Corporación Universitaria Lasallista y OCD Chile<sup>d</sup>.

“Hace falta más rock en las clases”, una frase que con Guillermo Bustamante, colega chileno de OCD, construimos en una de nuestras charlas colaborativas<sup>e</sup>, como hemos nombrado los intercambios con estudiantes chilenos y colombianos, vía Skype que hace poco comenzamos.

Pero bien, antes de cambiar de nacionalidad en estas experiencias, queremos presentar WIKIAPRENDIZAJES, entre Colombia y Argentina, en su primera versión; ejercicio desarrollado durante el segundo semestre de 2010, entre estudiantes del Programa de Comunicación y Periodismo de La Corporación Universitaria Lasallista; y estudiantes de Medicina de la Universidad Nacional del Comahue en Neuquén, Patagonia argentina.

En Buenos Aires se empezó a dibujar el camino, cuando sustentamos el trabajo de investigación, diferente a Wikiaprendizajes. Como compañeros de la Especialización en Educación y Nuevas Tecnologías de FLACSO Argentina, en el primer semestre de 2010 nos conocimos personalmente la profesora Teresa Pérez y yo. Las afinidades profesionales, y las preocupaciones académicas entre una profesional de las ciencias naturales (Química) y uno de las ciencias sociales (Comunicador Social), permitió que varios encuentros vía Skype construyeran la ruta de lo que buscábamos, y así, de a poco, nació WIKIAPRENDIZAJES.

Para ser sinceros, este proyecto no fue conceptualizado en filigrana; algunas ideas fuertes nos impulsaron y quizá fuimos presa de la “Motivación”. Queríamos simplemente ser coherentes en el decir y en el hacer, y la verdad no era tan difícil. La oportunidad la creamos nosotros.

Aprovechamos como hipótesis de trabajo tres temas interesantes:

1. Utilización educativa de redes sociales digitales
2. Posibilidad de realizar trabajos académicos a pesar de la distancia en poco tiempo y con estudiantes de diferentes nacionalidades.

---

d Sitio web observatorio iberoamericano de comunicaciones digitales, OCD. Disponible en: <http://www.ocdiberoamerica.com/>

e Espacio académico en el cual el director de contenidos del observatorio Iberoamericano de Comunicaciones Digitales capítulo Chile y Luis David Tobón López, coordinador del OCD Colombia, realizan charlas para estudiantes chilenos y colombianos respectivamente, con temas afines y énfasis en Comunicaciones Digitales.

### 3. Interdisciplinariedad, estudiantes de Medicina y de Comunicación Social.

De algún modo la diferencia era la que nos posibilitaba la convergencia; y fue así como decidimos que los estudiantes “serían el contenido”, y empezarían a escribir su historia desde Facebook y Grupos de Google.

Al principio, tanto para los estudiantes de Teresa, como para los míos, la cosa sonaba extraña. ¿Qué estamos haciendo? ¿Facebook académico eso con qué se come?, decían los estudiantes con estas y otras palabras; y era quizá una reacción normal, puesto que acostumbramos darles un solo uso a las cosas. Entonces si Facebook es para subir las fotos del paseo, de la rumba, o de los viajes ¿a qué viene todo esto de mezclarlo con algo aburrido como lo son las clases? El concepto de aburrido, por supuesto, es bastante confuso en la anterior pregunta, pero por un momento quisimos citar el sentimiento de algunos estudiantes, puesto que están a veces en el aula por “pasar” y los mundos de la diversión y del estudio son para ellos sumamente distintos.

Ahora bien, experimentando es como realmente sabemos lo que nos gusta, y fue así como empezó todo este mosaico de ideas, productos, consignas de trabajo y comunicación sincrónica y asincrónica desde diversas aplicaciones de la llamada Web 2.0<sup>9</sup>.

Fue así como en el mes de octubre de 2010, comenzamos con el proyecto. Lo primero que hicimos fue crear un blog (imagen 3), pero luego nos dimos cuenta de que era mejor desde Dropbox<sup>f</sup>, compartir información, archivos, y así, también hacer wiki, aunque privados, por supuesto, para sacar luego a la luz aquello que creíamos pertinente.

Desde Google Docs, generamos el documento con las consignas de trabajo, y también creamos un canal en You Tube (imagen 4), con dos únicos vídeos: uno con el sello del mate, de Teresa Pérez, y otro con el del café, y así con nuestras palabras y sin muchos libretos, también en imágenes, les explicamos a nuestros estudiantes la propuesta de trabajo.

Primero hicimos un grupo privado en Facebook (imagen 1), no podía ser otro el nombre: WIKIAPRENDIZAJES; con alegría nos dimos cuenta de que estaba disponible. Y así, empezamos a “viralizar”<sup>10</sup> las invitaciones entre nuestros estudiantes.

---

f Aplicación web para compartir un documento de manera online. Disponible en: <http://www.dropbox.com/>



Imagen 1. Grupo en Facebook con 136 miembros

Fuente: URL del grupo en Facebook wikiprendizajes:  
<http://www.facebook.com/group.php?gid=110524425670104>

Asimismo, la intuición nos guiaba por las rutas siguientes, y la profesora Teresa Pérez y yo decidimos que un Grupo en Google sería la mejor manera de “realizar el trabajo académico”; sin embargo, Facebook terminó por absorber ese objetivo, y tras la confusión de algunos estudiantes, sobre la marcha dijimos que era opcional utilizar el grupo de Google (imagen 2). Algunos estudiantes hicieron uso de dicha plataforma (Grupos de Google), pero como para ellos era mucho más cercano Facebook, fue en dicha aplicación en la cual se realizó el trabajo base.

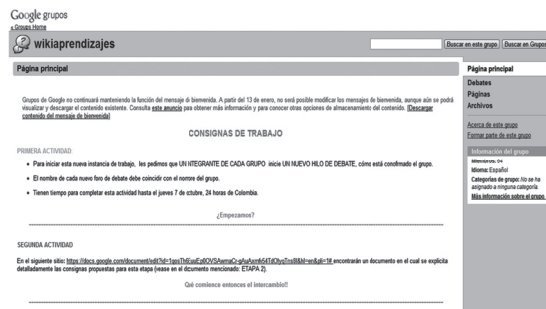


Imagen 2. Grupo de Google

Fuente: Url del grupo de Google Wikiprendizajes:  
<http://groups.google.es/group/wikiprendizajes>



Imagen 3. Blog de Wikiprendizajes

Fuente: URL Blog de Wikiprendizajes: <http://wikiprendizajes.blogspot.com/>



Imagen 4. Entrevista de estudiante sobre Wikiprendizajes

Fuente: URL Entrevista: [http://www.youtube.com/watch?v=RH32iO0Mwr0&feature=player\\_embedded](http://www.youtube.com/watch?v=RH32iO0Mwr0&feature=player_embedded)

## Metodología

Los estudiantes de uno y otro país debían, por decirlo de algún modo, “seducir”, para no utilizar el ya acostumbrado “venderse”; ante sus compañeros, entonces, para dejarlo en un tono más adecuado: “Presentaron sus argumentos para formar los grupos”.

Después de estar inscritos en el grupo de Facebook los estudiantes colombianos y argentinos debían en “el muro” de Facebook: publicar sus gustos, intereses académicos, cualidades personales y así formar los equipos de trabajo. Debían los equipos componerse de tres estudiantes colombianos y tres argentinos.

Cuando ya había afinidad en los grupos, le ponían un nombre al equipo, y así, entre Arkanos, Sinapsis, Fuerzas Unidas, entre otros grupos híbridos, comenzaron con “la misión” que debían cumplir.

Las formas de intercambio eran decididas por ellos. Aunque no sistematizamos todos los medios utilizados, según nuestra indagación, encontramos que prefirieron herramientas en tiempo sincrónico, esto es, chat de Facebook, Messenger y Skype. Así, se ponían de acuerdo, y le encontraban sentido o sinsentido a las consignas propuestas por la profesora Teresa y por mí.

*Producto 1:* El producto 1 que debían presentar era un vídeo en el que dos lugares o personajes se narraran en paralelo. Esto es: los estudiantes argentinos describían un parque público en Cipolletti, y los estudiantes colombianos describían un parque público de cualquier municipio del Área Metropolitana del Valle de Aburrá.

Así debían, con imágenes y vídeos, editar un solo producto por grupo. Este producto específico era más para dar cuenta del intercambio cultural, conociendo diferencias y similitudes de lugares y personajes. De alguna manera, este era el “producto sensible” de la experiencia Wikiaprendizajes.

Nos ocurrió de todo un poco, y la sorpresa siempre suele estar en cualquier lugar, casi podríamos decir que múltiples “serendipias”, nos permitían hacer “grandes hallazgos”, mientras la práctica ocurría. A veces podíamos dar nuevos pasos, en otras ocasiones, para evitar la confusión, nos quedábamos tal cual con las consignas planteadas, es decir, aprendimos sobre la marcha.

Estudiantes de Medicina, con gran habilidad para la edición de vídeos, o estudiantes de Comunicación, conocedores del tema de salud, en especial hábitos de vida saludable, fueron algunas de las sorpresas, que poco a poco nos permitían darle sentido a la experiencia WIKIAPRENDIZAJES.

*Producto 2:* Este segundo producto comunicacional permitía, de algún modo, plantear la interdisciplinariedad. Los equipos debían redactar un artículo con referencias bibliográficas pertinentes sobre “hábitos de vida saludable”. Suponíamos la profesora Teresa y yo que los estudiantes de Medicina guiarían los ejes temáticos, y los comunicadores, organizarían la redacción del artículo y la estética del mismo.

Ocurrió algo parecido a lo citado en el producto 1; de parte y parte hubo construcción interesante. Por ejemplo, cada equipo decidía cómo

realizar el artículo, con enfoques, imágenes y referencias. Aquí, los estudiantes, utilizaron Google Docs (imagen 5), para compartir un archivo online, haciendo wiki, y trabajar así de manera efectiva.

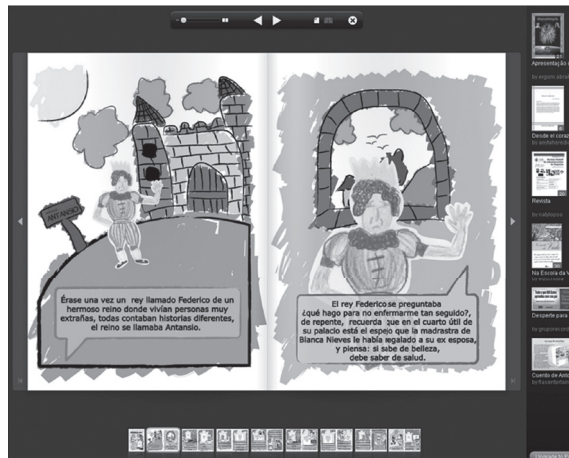


Imagen 5. Ejemplo cuento ilustrado de estudiantes:

Fuente: **URL del cuento:** [http://issuu.com/stevenduque/docs/pdfcuento\\_ilustrado](http://issuu.com/stevenduque/docs/pdfcuento_ilustrado)

Son muchos los ejemplos y quisiéramos en este espacio compartir cada vídeo, aciertos, errores y malentendidos, pero luego, de manera detallada, contaremos la experiencia en el transcurso de este libro que licenciaremos bajo Creative Commons y tendrá la versión digital e impresa. El título de dicha publicación es: *Wikiaprendizajes, usos educativos de las redes sociales digitales*.

Quedaron más aprendizajes de los que imaginábamos, puesto que con esta experiencia nos queda una hoja de ruta para entender la complejidad y, al mismo tiempo, la facilidad de realizar esta clase de ejercicios, que posibilitan hacer de las clases un espacio de laboratorio permanente, aprendiendo y aprehendiendo desde la motivación.

Más que conclusiones, pensamos que este trabajo nos ha mostrado el camino para enfocar nuestras clases. Hubo entregas con híbridos interesantes, porque algunos estudiantes decían no entender lo que se debía hacer. Entonces nacieron vídeos en solitario de un grupo en Argentina, otro en Colombia que luego no unían el producto en una sola pieza, sino que

realizaban dos vídeos por grupo. Asimismo, el copie y pegue también ocurrió en cuanto a la redacción de los artículos de hábitos de vida saludable. Pero precisamente, todo esto nos muestra que en un Ecosistema Digital<sup>11</sup> como el que habitamos, la hipertextualidad, la instantaneidad, el trabajo en equipo, y las redes sociales digitales, nos permiten plantear un escenario diverso en el que se multiplican las formas comunicativas, y ahí está la riqueza del intercambio.

No queremos con esto decir que la Torre de Babel es nuestro mejor referente, todo lo contrario, pero en la coherencia con la cual los estudiantes armaron sentidos, encontramos las rutas de nuevas pedagogías para aplicar en el aula. Aula sin muros<sup>12</sup> tendremos que decir, porque con experiencias como estas, sí que trascendemos cualquier frontera geográfica.

Hubo en general diversión académica: los estudiantes ya no estaban preocupados por una nota, sino por sacar adelante a un equipo de trabajo; por viajar quizá a uno u otro país y conocer ese espacio narrado mediante el vídeo. Quedaron las invitaciones, los malentendidos, la diferencia entre tomar tinto en Argentina y tomar tinto en Colombia, la diferencia entre coger y agarrar, y muchos otros intercambios más, que hicieron de esta experiencia un espontáneo escenario de aprendizajes e intercambios multidireccionales.

Nuestra idea no es organizar el caos, nos gustó el desorden mismo de la experiencia, puesto que nos permitió entender que “encasillar” el proceso educativo a unos cuantos pasos de recetario no aporta a la creatividad ni a la necesaria revolución que podemos y debemos hacer desde el ámbito educativo.

En medio de enlaces rotos y activos, con escaneos de lectura y palabras olvidadas en el muro de Facebook, tejimos con muchas expectativas y motivación este escenario, que finalmente obtuvo su recompensa, puesto que, cuando menos pensaron, los estudiantes habían hecho sus trabajos finales y parciales, sin hacer cuentas en la calculadora para definir promedios y posibilidades de ganar una asignatura. Los estudiantes vivieron el proceso, fueron protagonistas, y se dieron cuenta de que la ciencia, la investigación y la academia, en definitiva, no son esas figuras sombrías de batas y lentes gruesos encerrados en un laboratorio solitario.

La academia es fiesta, es creatividad, son muchas posibilidades, y desde nuestra modesta experiencia, buscamos siempre cambiar los discursos que

“apagan dispositivos”; aquí sí que los usamos, con equivocaciones por supuesto, pero con una mezcla que dejó el sello del aprendizaje colaborativo.

En lo que sigue, les contaremos de manera detallada esta apasionante experiencia para nosotros, de la que esperamos se contagien un poco.

### Referencias bibliográficas

1. MANCINI, Pablo. Investigador y consultor del Observatorio Iberoamericano de Comunicaciones Digitales - Director de Medios Interactivos periódico Clarín de Argentina. [En línea]. Argentina: Grupo Clarín, 2008. [Entrevistado el 29 de mayo de 2009] Disponible en: <http://www.amphibia.com.ar/pablo-mancini/>
2. CHAPMAN, M. Contextualidad y direccionalidad del desarrollo cognitivo. ¿Modelos Unidireccionales o Multidireccionales?. En: Human Development, N° 31 de 1988, traducción de Terigi. Disponible en: <http://educacion.idoneos.com/index.php/290036>
3. CASTELLS. M. *La Era de la Información. Vol. II: El poder de la identidad*. México, Distrito Federal: Siglo XXI Editores, 2001. Pág. 21
4. WIKIPEDIA. Definición de TIC. [En línea]. Madrid: Wikipedia, 2010. [Citado el 21 de enero de 2011]. Disponible en: [http://es.wikipedia.org/wiki/Tecnolog%C3%ADas\\_de\\_la\\_informaci%C3%B3n\\_y\\_la\\_comunicaci%C3%B3n](http://es.wikipedia.org/wiki/Tecnolog%C3%ADas_de_la_informaci%C3%B3n_y_la_comunicaci%C3%B3n)
5. BERNAL, Juan C. Entre conectados y excluidos: el papel de la tecnología en la escuela. En: Revista Nodos y nudos. Julio – diciembre 2005. Vol. 2 No. 19, p. 58 -66.
6. ARETIO, Lorenzo García. “Blended Learning, ¿Es tan innovador?. En: Boletín Electrónico de Noticias de Educación a Distancia (BENED). [Citado el 04 de octubre de 2010]. Disponible en: <http://www.uned.es/catedraunesco-ead/p7-09-04.pdf>
7. BARBERO, Jesús Martín; REY, Germán y RINCÓN, Omar. Experiencia audiovisual y desorden cultural. [En línea]. En: Revista Gaceta, n° 47. Bogotá, Ministerio de Cultura, 2000, pág. 50-61. [Citado el 25 de mayo de 2010]. Disponible en: [http://www.comunicacionymedios.com/comunicacion/television/textos/martin\\_barbero\\_tvpublicalidad.htm](http://www.comunicacionymedios.com/comunicacion/television/textos/martin_barbero_tvpublicalidad.htm)
8. ARETIO, Lorenzo García.; op cit.
9. O'REILLY, Tim. ¿Qué es la Web 2.0: Patrones de diseño y modelos del negocio para la siguiente generación del software. [En línea]. Las Vegas, Estados Unidos: O'reilly media, 2005. [Citado el 15 de febrero de 2010]. Disponible en: <http://oreilly.com/web2/archive/what-is-web-20.html>
10. RAMOS, Marina. Comunicación viral y creatividad. [En línea]. En: Revista Creatividad y Publicidad. Octubre de 2007. [Citado el 15 de marzo de 2010]

Disponible en: <http://www.creatividadysociedad.com/articulos/11/Creatividad%20y%20Sociedad.%20Comunicacion%20viral%20y%20creatividad.pdf>

11. DE MORAES, Denis. El ecosistema digital y el desafío de democratizar la Red. [En línea]. En: Razón y Palabra, Número 37. [Citado el 15 de marzo de 2010] Disponible en: <http://www.razonypalabra.org.mx/anteriores/n37/dmoraes.html>
12. McLUHAN, Marshall. El aula sin muros. Barcelona: Editorial Laia, 1974. 237 p.

# El pluralismo como lógica del discurso ético contemporáneo\*

Jairo Alvarado Sánchez\*\*

“Allí donde está el peligro, crece también lo que salva”  
**Hölderlin**

## Resumen

Este trabajo comparte algunos hallazgos de la investigación: “Éticas contemporáneas: una interpretación del pluralismo ético en la Corporación Universitaria Lasallista”, desarrollada con jóvenes universitarios de la Corporación en el municipio de Caldas (Antioquia). La intencionalidad de este trabajo radica en poder describir la lógica del discurso y práctica ética de los estudiantes frente a problemáticas y situaciones en las que se posicionan como sujetos desde determinadas perspectivas de vida y de mundo.

Desde la óptica juvenil la moral es un proceso individual que desplaza el proyecto moderno de sujeto y de moral, permitiendo la aparición de lo plural y lo diverso como elementos connaturales de una nueva condición: lo posmoral. Este proceso a pesar de no estar exento de contradicciones o ambigüedades - en el discurso o en las experiencias, es una oportunidad para poder reinstalar la individualidad y la pluralidad como garantía de la autonomía.

---

\* Artículo derivado de la investigación *Éticas contemporáneas: una interpretación del pluralismo ético en la Corporación Universitaria Lasallista*. Investigadores: Jairo Alvarado Sánchez y Juan Manuel Uribe Cano. Proyecto financiado por el Fondo para el Desarrollo de la Investigación de la Corporación Universitaria Lasallista (2010).

\*\* Licenciado en Filosofía (P.U.J.). Especialista en Docencia Universitaria (U.B), Orientación Educativa y Desarrollo Humano (U.B). Magister en Educación (P.U.J). Docente de la Corporación Universitaria Lasallista.

**Palabras clave:** pluralismo ético, representación juvenil, moral individual, bienestar, individuación.

### Pluralism as a contemporary ethical discourse's logics

#### Abstract

This work aims to share some results from the research “Contemporary Ethics: an interpretation of ethical pluralism at Corporación Universitaria Lasallista”, made by young students of the Corporation in Caldas, Antioquia. The intention with this work is to describe the discourse's logic and the ethical praxis students have before problems and situations in which they assume positions as subjects from certain life and world perspectives.

From the youngsters' point of view, moral is an individual process that displaces the modern project of subject and moral, allowing the appearance of plurality and diversity as connatural elements of a new condition: Postmorality. This process, despite having contradictions and ambiguities in both the discourse and the experiences, is an opportunity to re-install individuality and plurality as autonomy's guarantee.

**Key words:** Ethical pluralism, youth representation, individual moral, welfare, individuation.

### Pluralismo y mundo juvenil universitario

En la actualidad hay una particular preocupación en torno al creciente pluralismo ético que se vive dentro del mundo contemporáneo; más exactamente, en el mundo de los jóvenes. Efectivamente, las realidades locales no son ajenas a los grandes acontecimientos globales y a las revoluciones sociales que se desprenden de los medios de comunicación, el establecimiento de sociedades de consumo, y un mundo en el que predominan riesgos e incertidumbres creadas o fabricadas. Todo este conjunto de transformaciones generales que afectan considerablemente los contextos locales inciden profundamente en el comportamiento de nuestros jóvenes. Los diferentes dispositivos de la cultura, representados hoy en los medios masivos de comunicación y en diversos artefactos tecnológicos, los mecanismos de desregulación a los que apelan los Estados liberales actuales, y el esta-

blecimiento de una sociedad en la que la socialización se presenta través del mercado alteran profundamente el *ethos* de todos nosotros y con ello nuestras prácticas, ritos, momentos de ocio, además de las valoraciones que permanentemente hacemos frente al mundo y otros seres humanos.

El medio universitario juvenil no es ajeno a estos acontecimientos. La universidad, en tanto institución abierta, es un caldo de cultivo para la pluralidad: ello se evidencia en la diversidad de formas de vida que en ella conviven. A pesar de su carácter público, privado o confesional, en la universidad convergen diversas formas de ver el mundo y la vida, lo cual la hace profundamente pluralistas y abiertas. Es un microcosmos que refleja lo que acontece a nivel global, un pequeño lugar en el que se hacen presentes diversas formas de sentir, pensar y actuar, socialmente construidas pero también en construcción. Sin embargo, a pesar de que el pluralismo podría valorarse como un aspecto positivo, pues en él reside la posibilidad de ampliar los horizontes de comprensión y lograr una sociedad más incluyente y abierta, existen diferentes problemas que tienen que ver con la convivencia. Un primer problema está ligado con la heterogeneidad de los tiempos- generacionales-, sobre todo en la relación docente-alumno. Pareciera como si en muchas ocasiones el adulto y el joven (profesor - alumno, padre-hijo) estuvieran en dos continentes profundamente distanciados, como si ninguno de los dos pudiese explicar los contextos del otro. La ausencia de una mediación que logre comunicar ambas esferas es evidente, lo cual mina profundamente las formas de consenso y acuerdo, siendo este un aspecto vital para la convivencia.

Un segundo problema, ligado al primero, tiene que ver con la pluralidad de motivaciones y valoraciones de los estudiantes. En la mayoría de las ocasiones las formas de lealtad que vinculan a los estudiantes carecen de objetivos a largo plazo, lo cual lleva a que haya un conflicto entre los contenidos académicos y valoraciones. Pareciera como si la educación y la academia tuviesen que competir con el mundo del consumo, de la publicidad y del goce estético propio de las sociedades contemporáneas. Esto evidencia que el mundo académico requiere de estrategias que permiten salvar dicha distancia, es decir, pensar en una educación más preocupada por los contextos y lo cotidiano.

Por otra parte, existen problemas ligados a la convivencia que se desprenden, evidentemente, de la pluralidad de formas de vida. Los conflictos

y las rivalidades pueden ser el anverso de la pluralidad, en este sentido, la violencia es un riesgo que evidencia dentro de la superposición de expresiones y de un deseo por imponer un punto de vista, sin embargo, la mitigación de este riesgo radica en la incorporación de mediaciones que permitan traducir o interpretar los contextos del “otro”.

Si partimos del presupuesto de que el prerequisite fundamental para la acción y la transformación está en la comprensión, nuestra tarea al acercarnos al *ethos* juvenil, para indagar sus representaciones, hábitos y prácticas, es una actividad posibilitante para su autocomprensión y la construcción de mediaciones que permitan traducir o interpretar los contextos del “otro-juvenil” por parte del adulto.

Así, en el ámbito universitario asumir esa convicción comprensiva del *ethos* juvenil, nos permitiría no solo una información sobre las coordenadas de pensamiento y acción de nuestros estudiantes sino la redirección de procesos formativos en la universidad, pensando contextualmente la educación en las sociedades de hoy.

## Pluralidad y Lenguaje

Previo al desarrollo de las categorías debemos develar dos presupuestos básicos en nuestra investigación. El primero de ellos tiene que ver con el concepto mismo de ética y moral, pues la carga que la historia y la tradición filosófica han impuesto a estos dos conceptos nos lleva a la necesidad de precisarlos. En el presente trabajo los utilizamos de manera indistinta, pues ética y moral son dos expresiones que dan cuenta de una misma experiencia socio cultural: el conjunto de valoraciones, intuiciones y reglamentaciones que construye una comunidad o un grupo social, presente a través del lenguaje y en las prácticas cotidianas de los individuos en el contacto con los otros. Así, los conceptos y valoraciones que poseen los sujetos sobre lo bueno y lo malo, lo justo e injusto, lo conveniente e inconveniente, no son un resultado independiente del mundo de la vida de los propios sujetos o el de sus comunidades, sino que se expresan a través de ellas y asociadas al lenguaje.

De igual forma, y tomando en consideración los aportes de la hermenéutica o de la misma filosofía de Wittgenstein, el ámbito de la ética está profundamente intrincado en el lenguaje: “... imaginar un lenguaje significa imaginar una forma de vida”.<sup>1</sup>). Su función no es nominar el mundo

para clasificarlo o comunicarlo, el lenguaje es el lugar para pensar el *ethos* de los individuos y sus comunidades:

“El conocimiento de nosotros mismos y del mundo implica siempre el lenguaje, el nuestro propio. Creemos, vamos conociendo al mundo, vamos conociendo a las personas y en definitiva a nosotros mismos a medida que aprendemos a hablar. Aprender a hablar no significa utilizar un instrumento ya existente para clasificar ese mundo familiar y conocido, sino que significa la adquisición de la familiaridad y conocimiento del mundo mismo tal y como nos sale al encuentro”<sup>2</sup>.

El segundo presupuesto, y en relación directa con el anterior, denota la pluralidad como un asunto que no es ajeno al lenguaje y al mundo de lo ético. En este caso, el lenguaje es un campo compartido con otros, pues el “decir” no pertenece a la esfera del yo sino del nosotros, develando la diversidad y pluralidad de formas de vida de los hablantes.

En la reflexión contemporánea se constata que el entorno cotidiano se transforma continua y dinámicamente jalonado por la presencia de nuevos dispositivos culturales que, desempeñando un papel protagónico en la vida plural de los individuos, llevan a replantear las formas tradicionales de entender el mundo y de entenderse como sujetos que configuran su propia libertad. Estas configuraciones se realizan fuera de la lógica ética que había normativizado su proyecto de vida y la había convertido en una deontologización que respondía a su naturaleza social. En este contexto, la pluralidad se describe como un evento irregular, cambiante, incluso contradictorio. Su discursividad escapa a la normativa del “deber ser” y se acerca a la interpretación dialógica que les permite a los sujetos ser soberanos sin legislar, vivir en común sin el monólogo impositivo de los deberes<sup>3</sup>.

### Posmoralidad: el bienestar como aplazamiento del deber

Gilles Lipovetsky describió la lógica de la sociedad postmoralista a partir del bienestar, siendo éste no solo una categoría teleológica para explicar la acción humana, sino como una “representación del mundo”. Nuestra civilización, según este autor, no tiene como tarea la subyugación del deseo, antes de vencerlo lo ha exacerbado y desculpabilizado. Gozar el presente y proveer a nuestro cuerpo del disfrute y la mayor comodidad posible, han permitido edificar la “nueva Jerusalén de los tiempos posmoralistas”. Esta visión se vuelve más dramática cuando en el marco de la vida social el con-

sumo se convierte en el centro de gravedad de los sujetos, así los objetos, y las marcas asociadas a ellos, ocupa un lugar preponderante en su cotidianidad<sup>a</sup>. Pero, no podemos afirmar simplemente que el consumidor, como en el pasado, desea acumular objetos, el consumismo de hoy se define por la brevedad del goce con las cosas mismas<sup>4</sup>.

“Estimulando permanentemente los valores del bienestar individual, la era del consumo ha descalificado masivamente las formas rigostas y disciplinarias de la obligación moral, la liturgia del deber se ha vuelto inadecuada para una cultura materialista y hedonista basada en la exaltación del yo y la excitación de la voluptuosidad del instante”<sup>5</sup>.

La sociedad posmoralista descrita es asumida desde la esfera juvenil como un movimiento que desplaza las obligaciones, expresadas en los deberes y los códigos, y del orden como valor fundamental. En su lugar, se instala el bienestar, convertido en el elemento de juicio para estimar o apreciar las acciones y, el objetivo-producto que se persigue en la esfera de lo cotidiano<sup>6</sup>. Atrás queda la acción cultural de una sociedad que enarbola la disciplina del deseo y las obligaciones frente a los otros.

Este desplazamiento tiene que ver con las concepciones y acciones que dibujan su escenario moral: la búsqueda de “sentido” individual, generalmente en contravía de las elaboraciones que hicieron parte de su esfera familiar o escolar; las deliberaciones para la acción que se afirman desde aquello que constituye un bienestar-beneficio para él y su sentido primario de la autonomía que le separa y diferencia de los otros, sin construir un vínculo responsable con el otro.

Desde su concepción primaria, la moral se identifica con la tradición. Ella es percibida como producto de la educación tanto familiar como escolar, pero su sentido es peyorativo al estigmatizar las acciones diversas y plurales bajo unos códigos únicos y universales que cercan o limitan la autonomía de los individuos. Este rechazo no constituye una postura ideológica ampliamente formulada o justificada, sino que responde a un deseo de independencia afectiva y económica<sup>b</sup>. Los jóvenes exigen el derecho a

a Las relaciones de los hombres con los hombres son menos representadas y valoradas que las relaciones de los hombres con las cosas, gracias a la intermediación mediática y publicitaria que las evidencia. Lipovetsky considera este aspecto como una nota característica de nuestra ideología económica moderna.

b La autonomía es concebida como la posibilidad de una acción libre soportada en la independencia económica del joven. Lo contrario genera sometimiento, pero desde el plano de lo real, el joven desplegando su capacidad adaptativa, sortea el direccionamiento de sus tutores y busca bajo esa circunstancia adversa el despliegue de sus acciones autónomas. (Grupo de discusión, sesión 2).

“desarrollar su propia perspectiva sobre la vida para poder actuar en ésta”<sup>7</sup>. La independencia se identifica con independencia material y se erige como una condición para el progresivo despliegue de ese deseo autónomo, que en términos del propio Beck, constituiría la “propia vida”, concebida desde el punto de vista material, espacial, temporal y como marco de sus relaciones sociales.

En consecuencia, la conducción de sus tutores es juzgada como legítima o favorable cuando permite al joven tomar sus propias decisiones, en definitiva, el control de su vida: “Al independizarse de los vínculos tradicionales, las vidas de las personas adquieren una cualidad que, por primera vez, hace posible la experiencia de un destino personal”<sup>8</sup>. El respeto como valor en la interacción con otros tiene que ver con la “neutralidad” que debe mantener el “adulto”, de tal manera que se brinde el espacio para el libre ejercicio de la deliberación, que en el caso de los jóvenes tiene que ver más con el cálculo práctico de costo/beneficio, que con un ejercicio reflexivo anterior a la acción en el que se involucren los principios o los intereses del otro.

El respeto como valor en la interacción con otros tiene que ver con la “neutralidad” que debe mantener el “adulto”, de tal manera que se brinde el espacio para el libre ejercicio de la deliberación, que en el caso de los jóvenes tiene que ver más con el cálculo práctico de costo/beneficio, que con un ejercicio reflexivo anterior a la acción en el que se involucren los principios o los intereses del otro.

En este sentido, los conceptos de bondad y maldad, correcto e incorrecto, no requieren elaboración alguna, según su mirada, su contenido ya fue plantado y constituyó el objetivo primario de sus tutores durante la infancia. La deliberación a la que se enfrenta el joven se desprende de su marco familiar y se nutre ahora del sentimiento y sensación de “sentirse bien” o del “estar bien”. Lo que le permite valoraciones o juicios en consonancia con la conveniencia individual en el marco del beneficio. Así, las convicciones o los principios que la tradición inculcó adquieren la imagen de entidades abstractas separadas de la realidad y de sus intereses.

La construcción semántica de lo moral enfatiza su carácter relativo con la consecuente subordinación de esta a esfera de lo subjetivo. La moral se convierte en el espacio privado e individual de deliberación, dónde no se acepta ninguna injerencia, pues se parte del supuesto que nadie puede erigirse como “agente moral” para otros. Son los sujetos y únicamente ellos

los que han de considerar o decidir qué les conviene o no. Daría la impresión que nos acercamos a la visión Hobbesiana según la cual lo bueno o malo depende del hombre mismo, en tanto que lo que desea es bueno y lo que odia malo, no habiendo nada con un valor objetivo, que determine la bondad a maldad de algo, estos conceptos son tan solo nombres que designan las preferencias individuales y en palabras del propio autor, “nunca se usan sin relación a la persona que las utiliza”<sup>9</sup>, ya que lo bueno o malo no se deriva de la naturaleza de los objetos<sup>c</sup>.

En el marco de una moralidad individual la pregunta por el “otro”, parece arrojar elementos paradójicos, pues no confirma de manera concluyente el aislamiento de los individuos, sino que este configura nuevas formas de asociación o de alianzas con el otro, en una especie de pacto de no agresión. Lipovetsky<sup>10</sup> afirmará que la era de consumo desocializa a los individuos y correlativamente los socializa por la lógica de las necesidades y de la información.

Estar juntos o encontrarse con otros obedece tal vez a una coincidencia de intereses particulares, pero no necesariamente indica que se comparte un proyecto común o colectivo. Si podemos afirmar que lo colectivo se desvanece, tendríamos que afirmar igualmente que dentro de ella se diluye la conciencia de ciudadanía. La “*res*” pública se repliega a causa del ensanchamiento de lo individual como consecuencia de la crisis de las instituciones clásicas de la modernidad, donde los sujetos se referenciaban para vivir “lo social”.

Lo social en el sentido “moderno del concepto”, es decir, aquello que implica cohesión, universalidad, referencia objetiva, orden, ley o estado, son en el marco del imaginario juvenil realidades que tienden a diluirse, pues efectiva y afectivamente no son una prioridad en el mundo juvenil. En el testimonio de los jóvenes universitarios, es claro que una fuerza que mueve su acción son los lazos que crea a través de la amistad, siendo esta una tendencia más estable y permanente. Pero, esta tesis parece no encuadrar en las realidades de ciertos fenómenos del mundo tecnológico contemporáneo donde predomina la velocidad, el movimiento, las imá-

---

c Esta misma idea se repite en la obra *Del ciudadano* donde afirma: «Todas las controversias nacen de las grandes diferencias que existen entre las opiniones de los hombres respecto a lo mío y lo tuyo, lo justo y lo injusto, lo útil y lo inútil, el bien y el mal, lo honesto y lo deshonesto y las cosas similares.» (cap. VI, párrafo 9, pág. 131)

genes, las redes y el consumo<sup>d</sup>, que en su conjunto permiten afirmar la provisionalidad de lo real, pues este sentimiento de provisionalidad, si bien aborda su mundo afectivo, el mundo de sus relaciones, es estable en lo concerniente a la amistad<sup>e</sup>.

Este conjunto de elementos descritos ratifica la asistencia al desdibujamiento de un proyecto de vida en torno al *próximo*, de hecho es impensable una moral interindividual, pues se considera que la responsabilidad de los seres no tiene más límites que el de la propia individualidad. Si bien los jóvenes ven con naturalidad que exista un movimiento egocéntrico, convertido en referente para construir sus procesos vitales, simbólicos y deliberativos sobre sus acciones, dicho movimiento no está exento de la contradicción y ambigüedad que lleva a rupturas en su ámbito de experiencia.

Evidenciamos una de estas contradicciones al constatar la ruptura entre su mundo cotidiano y el mundo laboral, en el primero la convicción del interés - personal - que se persigue no tiene condicionamiento alguno, su legitimidad está dada porque le “conviene” estratégicamente para resolver alguna situación práctica. En el segundo caso, puede suponerse que hay una continuidad y que lo individual marcará la diferencia en el contexto de la competencia profesional. Pero esta continuidad se pierde, y lo que era la búsqueda de bienestar y comodidad individual pasa a ser una situación de adaptación. Esto lo vemos reflejado en dos situaciones que fueron presentadas a los jóvenes, una referida a los códigos deontológicos de las profesiones y otra referida a acciones en los que generar una conducta no apropiada o inmoral era simplemente ambivalente.

En el primer caso, el de los códigos deontológicos de las profesiones, estos no son puestos en cuestión, y asimilando una especie de economía reflexiva se perciben como un marco de acción para el trabajo, pues son las condiciones bajo las cuales el profesional ha de desarrollar su labor. Así, las reglas de juego social y ético de la profesión son algo que requiere de la aceptación de los individuos y no generaba rupturas con los criterios de valoración que venían siendo sostenidos en su esfera cotidiana. Simplemente, los jóvenes universitarios intentan adaptarse al mundo compe-

---

d En este sentido, Lipovetsky ve en el consumo una estructura abierta y dinámica que “desembaraza al individuo de los lazos de dependencia social y acelera los movimientos de asimilación y de rechazo, produciendo individuos flotantes y cinéticos...” (pag 112)

e Grupo de discusión #1, sesión 3

titivo del trabajo sin crearse conflictos con sus experiencias cotidianas. Por ello, era censurable el fraude en la situación de una competencia por un puesto laboral, siendo calificado como antiético, atentatorio de los códigos profesionales, pues lo importante era una franca competencia meritocrática donde se impone el mejor.

En el segundo caso, las situaciones propuestas llevaban a los estudiantes a juzgar si el fraude era justificable o no, se encontró que la utilización de la “trampa” o de pequeños fraudes, pues lo encontraban como un recurso para sobrevivir en su proceso académico, pues la finalidad práctica no era otra que la de evitar la pérdida – objetivo del maestro. Algunos testimonios afirmaban que la causa de ello era el hecho de sentirse retados por la autoridad del maestro, y esto generaba estrategias para burlarla y evitar conceder la razón a esa autoridad que buscaba simplemente incomodarles. En otros casos, era justificable sólo como un acto de amistad o de compañerismo al requerir de una ayuda que más adelante pudiera devolverse o retribuirse.

En estos dos ejemplos el juicio de los jóvenes tienen un elemento común: la justicia. Se busca lograr un equilibrio o compensación, en el caso de la autoridad o de equidad, en el caso de la competencia laboral. La representación de la justicia no tiene, en ninguna de estas situaciones, un alcance social o político, responde más bien a una concepción primaria al identificarla como aquello que se otorga a cada cual según le corresponda. Cuando los jóvenes refieren valores como la tolerancia, el respeto, como deberes sociales parecen ser sólo afirmaciones que confirman el hecho de la diferencia y la individualidad, es una manera de expresar y justificar los límites de las individualidades, pero no expresan una pertenencia a lo social, ya que esta dimensión no es considerada como un factor vinculante para los individuos, confirmándose este como sesgo característico de su moral individual.

### Individualidad como configuración ética plural

La anterior descripción fenoménica nos lleva a plantear frente a los jóvenes dos posibilidades: la primera, ver en esta situación un riesgo, una patología que se convierta en un caldo de cultivo para nuevas formas de control político que restablezcan de nuevo el orden, es decir, el regreso al proyecto moderno de moralidad. La segunda, como una oportunidad para poder reinstalar la individualidad y la pluralidad como garantías de la autonomía.

La vuelta a la tradición, afirma la recuperación de lazos de autoridad que garanticen la cohesión social, esta acción adoptada específicamente en un periodo de crisis, se manifiesta en la relativización moral y, como consecuencia de ella, en la pérdida de valores objetivos. Esta añoranza se instaaura como un escenario clarificador pues en el régimen moralista moderno estaban bien señalados los límites del bien y el mal, y la fuente de la autoridad estaba plenamente identificada, asegurando por esta vía que el caos y la entropía se apoderaran de la sociedad. El papel de las instituciones (clase, familia, educación y el Estado) en este contexto es clave, pues se piensa que el individuo es sólo un componente del todo social que debe superarse para poder construir identidades colectivas, organizar al individuo, organizar la vida política y representar la individuo en la democracia política. De esta forma, la intervención de agentes sociales como maestros y padres se focaliza en la corrección y el enderezamiento social a través de una pretendida ortopedia moral<sup>11</sup>.

Esta intervención nace de la desconfianza hacia los individuos, pues son ellos los que ponen en riesgo la sociedad, de esta manera se hace necesario en el campo social la implementación de formas de control y disciplina que puedan encausarle. El discurso de desmoronamiento moral, por el cual se justifica la corrección o encausamiento, encierra un miedo a la libertad a la movilidad y pluralidad que esta entraña:

“Un bien común construido es demasiado frágil e inseguro para dejarse al cuidado de los impulsos morales de sus residentes. En el mejor de los casos, los impulsos naturales tienen cierta oportunidad de volverse genuinamente morales si actúan bajo una nueva administración, esto es, si son encaminados al bien por agencias más confiables que sus propietarios originales”<sup>12</sup>.

En el campo de las ideas, y en esto la modernidad fue un arquetipo, se construyen sistemas racionales y universales que permiten la fundamentación de la acción humana, libertando al hombre de las turbulencias de sus impulsos y los someta a principios universales y objetivos (no móviles y no plurales). Así, el discurso de desmoronamiento moral, por el cual se justifica la corrección o encausamiento, encierra un miedo a la libertad a la movilidad y pluralidad que esta entraña.

Si consideramos que la posmoralidad se mueve en el contexto de la ambivalencia y la incertidumbre -siendo los códigos su antítesis-, no podemos inferir por ello un relativismo moral. El proyecto ético de la época

moderna que se fundaba en la construcción de un código moral liberado del monopolio de la iglesia, pretendía erigir un único grupo de preceptos para ser observados por cualquier persona moral. La pluralidad de caminos e ideales se convirtió en un obstáculo y la ambivalencia de los juicios morales una situación patológica que debía rectificarse<sup>13</sup>:

“La mente moderna se siente horrorizada por la perspectiva de desregularización de la conducta humana, de vivir sin un código ético estricto y abarcador, de apostarle a la intuición moral del ser humano y a su capacidad de negociar el arte y la convivencia, más que buscar apoyo de reglas legales y despersonalizadas sustentadas en poderes coercitivos”.<sup>14</sup>

Pero negamos que se trate de un relativismo simple que lleva al enunciado práctico de “todo vale”, lo que creemos dentro de una perspectiva posmoral es la afirmación de la aceptación de la contingencia y el reconocimiento de nuestra capacidad como nuestros propios agente morales, pues “la apuesta por hacer a los individuos universalmente morales al dejar su responsabilidad moral en manos de los legisladores, fracasó”<sup>15</sup>. Partir del individuo permite reversar la historia de la moral, donde se creía que la capacidad coercitiva y educativa de la sociedad engendraba individuos morales, al contrario, la continuidad y bienestar de la sociedad depende de la competencia moral de sus individuos.

Alan Wolf afirmará en este sentido, que la moralidad es una práctica negociada entre los agentes – individuos- de la sociedad que son capaces de crecer y transformarse, por un lado, y la sociedad abierta al cambio de sus agentes, por la otra. Por ello el pluralismo más que un obstáculo es concebido como una oportunidad de transformación y afirmación de los individuos.

Unido a lo anterior, se ha creído que el individualismo acarrea otro riesgo, que podríamos denominar: indiferencia moral. Por el contrario, la apuesta de la individualidad es por el sentido de responsabilidad moral que nos impide simplemente el estar con otros, para permitirnos “ser con otros”. Dicha responsabilidad se convierte en un acto de auto-constitución del individuo al conectar el yo moral con el yo social. La recomposición de la individualidad, tal como la advertía Lipovetsky<sup>16</sup>, implica la necesidad de contrarrestar la tendencia individualista de emanciparse de cualquier obligación social.

Ser individuo no excluye la preocupación por el otro, es tal vez por una especie de tara histórica, que se ha tildado la conducta individualista como

una conducta antisocial, incluso antihumana. Lo que se descubre más bien, es su conexión interna pues, “vivir solo significa vivir socialmente”<sup>17</sup>, ya que la tendencia creciente de individualidad no da al traste con las relaciones de solidaridad, lo que se genera es un nuevo tipo de solidaridad y vinculación con los otros.

Desde la perspectiva moral nos distanciamos de ver en la individualidad un mal, afirmamos más bien, que la moral es individual antes que social. No somos morales gracias a la sociedad, vivimos en sociedad y somos colectivo gracias a ser morales. Bauman<sup>18</sup> afirmará en este sentido que en el corazón de la sociabilidad se encuentra la soledad de la persona moral.

Esta reivindicación de lo social en el proyecto de individualización tiene que ver igualmente con el desafío prioritario: “hacerse individuo” y no con el dato escueto de serlo. Los tiempos posmorales, lejos de la negación del individuo, convierten la individualidad en una tarea identitaria, “cargando sobre los actores la responsabilidad de la tarea y de las consecuencias de su actuación”.<sup>19</sup> Si la “individualización” significa la desintegración de las certezas morales colectivas y personales, se teje sobre él la única obligación de su existencia y es responder de manera vital y creativa a la pregunta: ¿qué deseo para mí mismo? Los individuos se convierten entonces en “artesanos de sus propias biografías”<sup>20</sup>.

#### Referencias bibliográficas

1. WITTGENSTEIN, Ludwig. Investigaciones filosóficas. Barcelona: Ediciones Altaza, 1999. p. 13.
2. GADAMER, Hans-Georg. Verdad y método I. Salamanca: Ediciones Sígueme, 2001. p. 147.
3. BAUMAN, Zygmunt. Ética posmoderna. 2 ed. México: Siglo XXI, 2005. p. 25.
4. *Ibíd.*, p. 29
5. LIPOVETSKY, Gilles. El crepúsculo del deber. Barcelona: Editorial Anagrama, 1994. p. 51
6. *Ibíd.*, p.128
7. BECK, Ulrich y BECK-GERNSHEIM, Elizabeth. La individualización. El individualismo institucionalizado y sus consecuencias sociales y políticas. Barcelona: Paidós, 2003. p. 102
8. *Ibíd.*, p. 85
9. HOBBS, Thomas. Leviatán. Buenos Aires: FCE de Argentina, 1992. p. 120. 120

10. LIPOVETSKY, Gilles. La era del vacío. Ensayos sobre el individualismo contemporáneo. Barcelona: Editorial Anagrama, 1986. 220 p.
11. ALVARADO SÁNCHEZ, Jairo Augusto. Educación, reproducción y conflicto: democratización y pacificación en la escuela. En: Investigación Educativa y formación docente. Enero – marzo 2000. Vol. 2, no 4. p.4-10
12. BAUMAN, Op. cit., p. 76
13. BAUMAN, Op. cit., p. 28-29
14. *Ibíd.*, p.42
15. *Ibíd.*, p.40
16. LIPOVETSKY, Op. cit., p.210
17. BECK, Op. cit., p. 282
18. BAUMAN, Op. cit., p. 73
19. BECK, Op. cit., p. 20
20. BECK, Ulrich. La democracia y sus enemigos. Barcelona: Paidós, 2000. p. 35-36

# Representación de la muerte en el niño\*

Claudia Patricia Ortiz Escobar\*\*

Ingrid Buritica Londoño\*\*\*

## Resumen

La investigación indagó por la representación de la muerte en el niño como construcción psíquica. La particularidad de esta investigación fue articular los recursos cognitivos y subjetivos del niño que participan en dicha representación. Por lo tanto, se trabajó con el siguiente supuesto teórico: si bien los recursos cognitivos del niño y la maduración de sus procesos de pensamiento, son fundamentales para acceder al concepto de la muerte de acuerdo con una línea evolutiva, estos por sí solos no son suficientes para dar cuenta de la representación que el niño se haga de ella. De allí se impone la necesidad de identificar y reconocer aquello que la representación involucra y que no se reduce a lo cognitivo. Para lo primero, lo cognitivo, la propuesta fue abordar sus leyes universales del desarrollo, en tanto evolución normativa, lo que permitió, desde la perspectiva psicogenética, conocer el desarrollo del concepto de muerte en el niño. Para lo segundo, lo subjetivo, se recurrió a los planteamientos freudianos de la vida anímica, que se fundamenta en el inconsciente, y la vida pulsional, y que dan cuenta de la ambivalencia propia de dicha vida anímica (amor, odio, rivalidad, celos, envidia y agresión). Ambivalencia que está presente de manera temprana en las relaciones del niño con los otros, y en lo cual se manifiesta un primer acercamiento con la muerte, dejando traslucir que no sólo el desarrollo cognitivo es el artífice de la representa-

\* Artículo derivado de la investigación Representación de la muerte en el niño. Proyecto financiado por el Fondo para el Desarrollo de la Investigación de la Corporación Universitaria Lasallista, realizada durante el año 2006-2007. Grupo de Investigación en Educación y Subjetividad.

\*\* Licenciada en Educación Preescolar. Psicóloga. Especialista en Psicología Clínica y MSc en Educación y Desarrollo Humano. Docente Corporación Universitaria Lasallista.

\*\*\* Psicóloga. MSc en Educación y Desarrollo Humano.

ción de la muerte. **Objetivo.** Analizar la representación de la muerte en el niño como construcción psíquica. **Material y método.** Investigación de corte cualitativo con un enfoque hermenéutico. Como estrategia metodológica se utilizó la revisión documental y la entrevista semiestructurada. **Resultados.** La investigación es una propuesta integradora de la representación como construcción psíquica en la cual no se privilegia ni la dimensión cognitiva ni la afectiva, sino que se muestran, de manera analítica, estas dos vías desde las cuales el niño logra la representación de la muerte.

**Palabras clave:** niño, representación, cognición, psiquismo.

## Death's representation in children

### Abstract

This research work is about the representation of death among children, as a psychic construction. This work's particularity was the articulation of the cognitive and subjective resources of the children that participate in that representation. Therefore, the following theoretical basis was assumed: The children's cognitive resources and the maturation of their thinking processes are basic to assume the concept of death according to the evolution line, but they are not enough to define the representation children make of it. Hence the necessity to identify and recognize the aspects involved in the representation, which are not only reduced to the cognition. For the cognitive aspect, it was proposed an approach from the universal laws of development, under normative evolution terms, allowing, from a psychogenetic perspective, to get familiar with the children's concept of death. For the subjective aspect, Freud's approaches concerning the mental life, based on the unconscious and useful to explain mental life's ambivalence (love, hate, rivalry, jealousy, envy and aggression). This ambivalence is part of life from early stages and can be seen in a child's relationship with others, in which a first approach to death can be evident allowing the conclusion that cognition is the basis of death's representation. **Objective.** To analyze the representation of death in children as a psychic construction. **Materials and methods.** Qualitative research with a hermeneutical focus. As a methodological strategy, documental revision and semi-structured interviews were used. **Results.** This work provides an integrative proposal of death's representation as a psychic construction in which neither the cognitive or the affective dimensions are privileged, but showed analytically as two ways from which children see death.

**Key words:** Children, death, representation, cognition, psychism.

## Introducción

En la investigación se indaga por la representación de la muerte en el niño como construcción psíquica, en la cual participan tanto el componente cognitivo como el subjetivo, es decir, se examina el desarrollo de la comprensión de la muerte en el nivel conceptual y lo que esta palabra connota, y se examina también el componente subjetivo, entendido como el afecto más particular del sujeto, junto con los procesos anímicos que la muerte suscita en el otro.

El trabajo consta de cinco capítulos; en ellos se abordan diversos tópicos para dar respuesta a la pregunta de investigación, sobre *cómo la representación de la muerte en el niño obedece a una construcción psíquica que articula lo cognitivo y lo subjetivo*.

En el primer capítulo se trabaja *El niño y su construcción psíquica*, capítulo en donde se analiza el concepto de niño en la teoría psicoanalítica freudiana. Se retoma la sexualidad infantil, tema que permite vislumbrar la relación entre la castración y la muerte; la primera constituye el primer encuentro con la pérdida. En este capítulo se trabaja un caso de Freud, conocido como “el caso Juanito”, el cual ilustra los avatares de la sexualidad y del complejo de Edipo.

En el segundo capítulo se aborda *La muerte* en su perspectiva histórico-cultural, en la cual se examina la forma como el ser humano, de acuerdo con la época histórica, ha enfrentado el problema de la muerte, pasando por la Edad Media hasta la Posmodernidad. En dicho capítulo, además, se concede un especial interés a los planteamientos que hace Freud en relación con la muerte, abordando algunos conceptos, entre ellos el de “pulsión de muerte” el cual permite desvelar la dimensión hostil y agresiva de la subjetividad, haciendo énfasis en el componente cruel de la vida infantil. Más adelante se expone la relación directa entre la pulsión y la compulsión de repetición, que tiene como una de sus manifestaciones el juego del Fort-Da, tal y como lo denomina Freud.

El tercer capítulo, *El niño y la muerte*, contiene el análisis de la representación de la muerte en el niño desde el desarrollo cognitivo propuesto por Jean Piaget, particularmente las etapas sensoriomotriz y preoperacional, que se considera abarcan el desarrollo y las características del pensamiento del niño menor de siete años. Adicionalmente, se trabajan algunos postfreudianos para analizar desde la vida anímica la representación de la

muerte en el niño, examinando las experiencias fundamentales de pérdida de objeto, de pérdida de amor y el origen de los deseos de muerte en el niño, tal y como lo vislumbró inicialmente Freud. Además, se analiza el lugar de los cuentos de hadas como la forma más estética de mostrar y enfrentar al niño a esta problemática. Finalmente, se trabaja la articulación niño-muerte desde Freud, para lo cual se retoma nuevamente el caso Juanito y los conceptos de castración, sexualidad, Edipo y pulsión de muerte.

## Materiales y métodos

La investigación es de corte *cualitativo* con un enfoque *hermenéutico*. El enfoque cualitativo en la investigación “*aborda las realidades subjetivas e intersubjetivas como objetos legítimos de conocimientos científicos. Busca comprender -desde la interioridad de los actores sociales- las lógicas de pensamiento que guían las acciones sociales. Estudia la dimensión interna y subjetiva de la realidad social como fuente del conocimiento*”<sup>a</sup>. El proceso hermenéutico apunta hacia la comprensión de estas realidades subjetivas como procesos de construcción ligados a la historia de los sujetos. Cabe anotar que la palabra hermenéutica proviene del verbo griego *hermeneuein* que significa interpretar. La presente investigación conjuga en este sentido, la interpretación de textos y la interpretación de la experiencia humana.

**Estrategia metodológica.** Como estrategia metodológica se utilizó la *revisión documental* y la *entrevista semiestructurada*, lo que permitió la construcción de los datos que dieron respuesta a la pregunta de investigación *la representación como una construcción psíquica que articula la dimensión cognitiva y subjetiva en el niño*.

En cuanto a la revisión documental, se recurrió a fuentes primarias y secundarias, principalmente. Para el abordaje de la dimensión cognitiva, se acudió a los planteamientos piagetianos, analizando algunos de sus textos como fuente primaria y se utilizaron, además, algunas fuentes secundarias; la misma lógica investigativa se utilizó para el abordaje de la subjetividad, y se hizo necesario ir a los textos de Freud y a algunos post-freudianos como fuentes primarias y, en menor medida, se utilizaron fuentes secundarias.

a GALEANO MARÍN, María Eumelia. Diseño de proyectos en la investigación cualitativa. Medellín: Fondo editorial universidad EAFIT, 2004. p. 18

Además de lo anterior, se recurrió al análisis de las entrevistas con el fin de comprender y, a la vez, ilustrar en una realidad subjetiva específica la representación que un niño hace de la muerte, lo que a la vez arrojó nuevos datos. Es importante aclarar, que aunque se recogieron dibujos infantiles alusivos al tema de la muerte, los cuales pueden ser considerados documentos, estos no se analizaron ni en cuanto a contenido ni en cuanto a forma, ya que la intención fue mostrar sólo la representación gráfica que un niño puede hacer de la muerte.

**Proceso metodológico para el desarrollo de la estrategia:** el primer proceso fue la delimitación del tema, para lo cual se realizó la revisión de los antecedentes con el fin de establecer el “estado de la cuestión” y conocer tanto las comprensiones del tema como los vacíos teóricos. En un segundo momento se eligieron las fuentes a utilizar según el problema planteado y se decidió hacer una lectura tanto intratextual como intertextual. Se elaboraron notas, fichas de contenido, memos analíticos y lectura cruzada y comparativa de los documentos con el fin de construir las categorías de análisis.

**Análisis de contenido. Categorización:** luego de precisar el objetivo de investigación y los elementos en juego, se procedió a procesar la información, de tal manera que se fuera estructurando un cuerpo conceptual que diera respuesta a la pregunta de investigación.

Para la construcción de las categorías se tuvieron en cuenta las dos grandes unidades de análisis: lo cognitivo y lo subjetivo. Para el abordaje de lo cognitivo, se enfatizó en los dos estadios del desarrollo cognitivo que corresponden al niño menor de siete años. Dentro de esta revisión, emergieron las siguientes categorías y subcategorías en relación con la representación de la muerte en el niño: dentro del período sensoriomotriz emergieron los conceptos de *causalidad* y *permanencia de objeto* principalmente, y para el período preoperacional emergieron las características del pensamiento infantil tales como: *animismo*, *egocentrismo*, *realismo* y *sincretismo*, fundamentalmente, las cuales fueron puestas a consideración teniendo como precedente la pregunta de investigación. El análisis de estas categorías permitió desde lo conceptual comprender la construcción nocional del tema de la muerte, indispensable para reconocer la representación que un niño puede hacerse de ella. A partir de este análisis se pudo proponer la entrevista y focalizar el tema de la muerte como construcción psíquica que tiene en cuenta la cognición y sus leyes de desarrollo.

Para lo subjetivo se recurrió a los textos de Freud y emergió la sexualidad infantil como principal categoría para la explicación de la subjetividad. De ella surgieron las siguientes subcategorías: Edipo, castración, pulsión de muerte y angustia. El análisis de esta información permitió dirigir la atención y la escucha en la entrevista hacia los contenidos de carácter eminentemente subjetivo y que hacían parte de la singularidad del niño entrevistado, con el fin de esclarecer esa articulación de la dimensión cognitiva y subjetiva implicada en la representación de la muerte.

**Técnicas de recolección de información:** como se mencionó anteriormente se realizó el *análisis documental* retomando fuentes primarias y secundarias. Además se recurrió a la *entrevista semiestructurada*, ya que a partir de esta se pretendía focalizar el tema, atendiendo previamente a la selección de las categorías de análisis. Sin embargo, en el momento de su realización se dejó al sujeto expresarse libremente y a partir de su discurso se indagó o enfatizó en aspectos relevantes para el tema de investigación. Es decir, el procedimiento fue guiado pero flexible. Posteriormente, se realizó la transcripción y se procedió a la búsqueda de los datos emergentes con el fin de pasar de la descripción a la interpretación teniendo como base las categorías emergentes.

En la presente investigación, las categorías fueron construidas desde la teoría como punto de referencia, y la experiencia o realidad empírica sirvió para ilustrar esta construcción teórica.

Para la selección del sujeto se tuvo en cuenta el criterio de edad, ser menor de siete años. Adicionalmente dos requisitos: la presunción de la salud tanto física como psíquica, es decir, que no estuviera en estado terminal y que no hubiera tenido antecedentes psicopatológicos.

Para acceder a la información a través de la entrevista fue preciso solicitar el consentimiento informado a su representante legal, en este caso su madre, y contar con la voluntad del niño.

En la presente investigación se realizó adicionalmente una *entrevista de grupo focal<sup>b</sup>*, llevado a cabo en el preescolar Mañanitas con el grupo de transición, conformado por 12 niños de cinco a seis años, lo cual permitió de manera preliminar indagar por la representación de la muerte en el niño

---

b Estrategia de recolección de información con carácter grupal, en donde se realiza una entrevista focal semiestructurada como fuente básica de datos o como medio de profundización en el análisis. Se denomina focal ya que pretende abordar profundamente un tópico o problema y se eligen sujetos que cumplan con la característica propia de lo que se busca en la investigación.

y se constituyó en el insumo para construir posteriormente las entrevistas al informante clave.

## Conclusiones

Las conclusiones devienen de la lógica investigativa desarrollada durante el trabajo de investigación. Así, en primera instancia, el recurso histórico esbozado en el presente trabajo permitió comprender la muerte como fenómeno histórico-cultural, en contraste de la muerte como un hecho de la vida anímica que, como se ilustrará en las siguientes conclusiones, permite advertir la dimensión de la pulsión de muerte como un asunto inherente al psiquismo del sujeto.

La pulsión de muerte atraviesa el psiquismo desde la infancia. En la etapa pregenital, que abarca de los tres a los cinco años de edad predominan las pulsiones parciales. En esta fase se desarrollan en el niño los componentes crueles de la pulsión, los cuales provienen de la pulsión de apoderamiento propia de esta etapa, y se expresa en la particular crueldad de los niños hacia los animales.

Con el advenimiento del complejo de Edipo, se escenifica en el niño, el deseo de muerte del rival que es el progenitor del mismo sexo y el deseo sexual hacia el progenitor del sexo opuesto, y en su forma negativa se presenta a la inversa: el amor hacia el progenitor del mismo sexo, y odio y celos hacia el progenitor del sexo opuesto. El complejo de Edipo, entonces, intensifica los temores de pérdida, separación, límite, abandono y muerte; esta última en el sentido de imposibilidad en relación con los deseos de carácter sexual.

En relación con las fases psicosexuales, se puede aducir, que estas influyen en la posición del niño en relación con la muerte: sadismo en la fase anal, angustia de muerte entendida como angustia de castración en la fase fálica, deseos de muerte durante el conflicto edípico y sentimientos de culpa al inicio de la etapa de latencia.

En el devenir psíquico se pueden encontrar experiencias muy tempranas de pérdida, angustia, separación y aniquilación que, aunadas a la pulsión de muerte, preparan los sentimientos y el significado de la muerte como tal para el niño. Así, la angustia es la repuesta del yo a la amenaza de una situación de peligro, referida ésta a la separación o pérdida de un objeto de amor y su manifestación da cuenta de la presencia de contenido psíquico en el niño, en la medida en que se encuentra anudada a una huella mnémica.

Desde otras posturas teóricas, se encuentran elementos coincidentes con la anterior perspectiva que pueden integrarse a la vida pulsional y que aportan datos para comprender la manera como el niño se representa la muerte. Para los psicoanalistas que estudian el desarrollo como Spitz o Mahler, desde la perspectiva psicoanalítica, la diferenciación gradual del mundo interno y externo permite la construcción del yo y de la identidad individual a partir de una relación simbiótica, en principio, o una relación dual.

Este proceso gradual de inscripción del vínculo y del objeto parte de las sensaciones que formarán en primera instancia huellas mnémicas, rastros de memoria o imagos, y posteriormente se convertirán en un objeto interno. La imago implica el elemento somático, emocional, con relación a la persona o parte de la persona evocada. Este es el más primitivo trabajo representacional que se constituye en antecedente del pensamiento.

Desde esta perspectiva, la pérdida de objeto inicia al niño en el proceso de simbolización, en la medida en que las restricciones en la satisfacción llevarán del camino de la alucinación, a la decepción, pero al mismo tiempo le permiten ponerse en contacto con un mundo más real e iniciar procesos de lenguaje y pensamiento los cuales serán los insumos de la simbolización.

Es de anotar que entre esta interdicción, alucinación y decepción surge el deseo, la búsqueda del objeto perdido. El deseo, podría decirse, es la presencia aún no colmada de una ausencia, y esta experiencia de pérdida signará el significado de la muerte para el niño, pues la ausencia del objeto de amor es experimentada por el niño desde los seis meses, como angustia de separación cada vez que la madre desaparece, y simboliza así el origen de la representación de muerte en el niño.

Con respecto a la elaboración de la ausencia, se puede decir que tanto Piaget como Freud ven el juego como la mejor vía de acceso para la comprensión de los contenidos psíquicos, especialmente durante el período preverbal cuando faltan otros medios de simbolización y posibilitan la explicación de la representación del objeto perdido como su relación con éste y el dominio de la realidad.

Piaget pone el énfasis en las posibilidades de acción, coordinación y organización de la conducta, desde la simple repetición hacia la ejecución planeada e intencionada, es decir, de un menor a un mayor grado de desarrollo intelectual. Plantea problemas cognoscitivos a los niños, por

ejemplo, esconder un juguete, y estudia de este modo la posibilidad de construcción de una imagen mental que constituirá una representación del objeto ausente o la permanencia del objeto como él lo denomina. Este logro será necesario para que posteriormente el niño pueda jugar simbólicamente a la ausencia y presencia, al juego de aparecer y desaparecer, tan frecuente alrededor del primer año de vida.

Este tipo de juego, estudiado por Freud en *Más allá del principio de placer*, no se desencadena por un desequilibrio cognitivo sino por un estado afectivo displacentero ante la ausencia materna, ausencia que comenzará a registrarse muy tempranamente en el psiquismo como el objeto perdido que satisfacía las necesidades. La pérdida del objeto de la experiencia de satisfacción se constituye en el elemento que pone en movimiento el deseo, la alucinación, el sueño y la fantasía. La pérdida del objeto de la pulsión, la pérdida del objeto del deseo y posteriormente la pérdida del amor materno fundarán la posibilidad de “encuentros” con el objeto. Todo encuentro será para Freud un reencuentro con el objeto perdido, lo cual es también una explicación de la relación del mundo interno y externo.

De acuerdo con lo anterior, el juguete de Piaget no está libidinizado pues es un juguete que afectivamente no condensa ningún sentimiento especial, sólo un interés por la novedad o el asombro que refleja el desequilibrio cognitivo. Por el contrario, el juguete en Freud, el carrete en el juego del “Fort-Da”, está libidinizado y el niño al arrojarlo intenta elaborar la pérdida del objeto de amor. En esta medida el juguete también simboliza a la mamá y a través de éste proyecta sus sentimientos de tristeza y abandono, sirviéndole como descarga emocional mientras encuentra la palabra para nombrar lo que para él es displacentero.

En síntesis, el deseo de aniquilación del otro es un sentimiento fundamental en la representación de la muerte en el niño; dichas mociones hostiles están anudadas a las vicisitudes de la vida pulsional del sujeto cuyo origen se remonta a la amenaza de perder la fusión con el objeto, ya sea el propio objeto materno o quien cumpla esta función. Esta experiencia, por tanto, es tan intensa que crea sentimientos ambivalentes, de amor y odio, forjando deseos de muerte, de aniquilación del otro, con ocasión del nacimiento de un hermano o hacia su progenitor del mismo sexo por ejemplo, como se observó en el “caso Juanito”.

## Recomendaciones

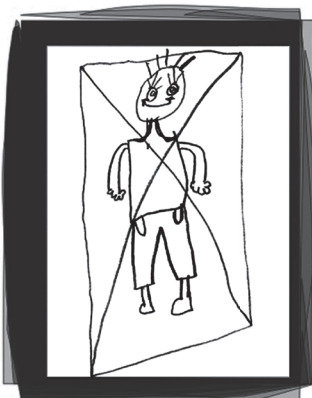
Un desarrollo conceptual como el que se llevó a cabo en la presente investigación permite al educador infantil conciliar o tener en cuenta esta doble articulación de lo cognitivo y lo subjetivo para la comprensión del psiquismo del niño y ver en una representación, en este caso “la muerte” como participan ambas dimensiones. Es necesario plantear en el currículo del programa de Licenciatura en Preescolar de la CUL, la importancia de incluir cursos, actividades investigativas y académicas con una clara intención formativa que incluyan el discurso de la subjetividad como pilar en el hacer y el saber docente. Dicha propuesta permitirá una diferenciación especial de los estudiantes de la CUL con respecto a otras instituciones de educación superior, que formen maestros de preescolar.



**MUERTE EN COMBATE**



**EL ESQUELETO DE  
MI ABUELITO**



**MI PAPÀ SE MURIÓ**



**A MI PERRITO LO PISÓ  
UN CARRO**

### Referencias bibliográficas

1. ARIES, Philippe. El hombre ante la muerte. Madrid: Taurus, 1983. 524 p.
2. BETTELHEIM, Bruno. Psicoanálisis de los cuentos de hadas. Barcelona: Crítica, 1999. 463 p.
3. CASAS, Ferrán. Infancia: perspectivas psicosociales. Barcelona: Paidós, 1998. 568 p.
4. DE MAUSE, Lloyd. Historia de la infancia. México: Alianza, 1982. 256 P.
5. DOLTO, Françoise. Psicoanálisis y pediatría. 18 ed. Madrid: Siglo XXI Editores, 1999. 266 p.
6. FREUD, Sigmund. Algunas consecuencias psicológicas de la diferencia anatómica entre los sexos. En: \_\_\_\_\_. Obras completas. Vol. 19. Buenos Aires: Amorrortu Editores, 2001
7. \_\_\_\_\_. Contribución a la historia del movimiento psicoanalítico. Trabajos sobre la metapsicología y otras obras (1914 -1916): Lo inconsciente. En: \_\_\_\_\_ Obras completas. V. 14. Buenos Aires: Amorrortu Editores, 2001
8. \_\_\_\_\_. De guerra y muerte. Temas de actualidad (1915): Nuestra actitud ante la muerte. En: \_\_\_\_\_. Obras completas. Vol 14. Buenos Aires: Amorrortu Editores, 2001.
9. \_\_\_\_\_. Duelo y melancolía. En: \_\_\_\_\_. Obras Completas. Vol 14. Buenos Aires: Amorrortu Editores, 2001.
10. \_\_\_\_\_. El sepultamiento del complejo de Edipo. En: \_\_\_\_\_. Obras completas. Vol. 19. Buenos Aires: Amorrortu Editores, 2001
11. \_\_\_\_\_. Historiales clínicos: análisis de la fobia de un niño de cinco años. En: \_\_\_\_\_. Obras completas. Vol II. Madrid: Biblioteca Nueva, 1968
12. \_\_\_\_\_. Inhibición, síntoma y angustia. En: \_\_\_\_\_ Obras completas. Vol 20. Buenos Aires: Amorrortu Editores, 2001.
13. \_\_\_\_\_. La interpretación de los sueños: los sueños de la muerte de personas queridas. En: \_\_\_\_\_. Obras completas. Vol 4. Buenos Aires: Amorrortu Editores, 2001
14. \_\_\_\_\_. La organización genital infantil: la ilustración sexual del niño. En: \_\_\_\_\_. Obras completas. Vol I. Madrid : Biblioteca Nueva, 1968.
15. \_\_\_\_\_. Más allá del principio de placer. En: \_\_\_\_\_. Obras completas. Vol. 18. Buenos Aires: Amorrortu Editores, 2001.
16. \_\_\_\_\_. Pulsiones y destinos de pulsión. En: \_\_\_\_\_. Obras completas. Vol. 14. Buenos Aires: Amorrortu Editores, 2001.

17. \_\_\_\_\_. Una teoría sexual. En: \_\_\_\_\_. Obras completas. Vol I. Madrid: Biblioteca Nueva, 1968
18. FURMAN, Erna. Cuando muere uno de los padres del niño. New Haven: Yale University Press, 1989. 367 p.
19. PIAGET, Jean. El nacimiento de la inteligencia. Barcelona: Crítica, 1985. 398p.
20. \_\_\_\_\_. La representación del mundo en el niño. 6 ed. Madrid: Morata, 1984. 342 p.
21. SPITZ, René. El primer año de vida del niño. Bogotá: Fondo de Cultura Económica, 1986. 294 p.
22. YALOM, Irvin. Psicoterapia existencial. Barcelona: Heder, 1984. 640 p.

# Neuropsicología y funciones ejecutivas\*

Juan Carlos Restrepo Botero\*\*  
David Andrés Molina González\*\*\*

“Si el cerebro humano fuera tan sencillo que lo pudiéramos entender, entonces nosotros seríamos tan simples que no lo podríamos comprender”.

**E. Pugh<sup>1</sup>**

## Resumen

La era actual ha sido definida como la era del cerebro. Es así como las neurociencias, dentro de las cuales se encuentra la neuropsicología, han tenido un desarrollo acelerado en los últimos años. En el estudio de la relación cerebro-conducta, propio de la neuropsicología, cada vez se reporta en la literatura científica un mayor número de estudios sobre las llamadas funciones ejecutivas, las cuales se han asociado con los lóbulos frontales. Se ha encontrado que éstas tienen un papel fundamental en la coordinación de diversos procesos cerebrales y, por ejemplo, son objeto de rehabilitación neuropsicológica en los procesos de aprendizaje con niños y adolescentes. El presente capítulo pretende definir las funciones ejecutivas, su correlato anatómico, funcional y la forma en que éstas han sido abordadas en la literatura científica ante diferentes trastornos cerebrales. Al inicio, se hará una contextualización de la neuropsicología clínica y del funcionamiento cerebral básico.

**Palabras clave:** neuropsicología, cerebro, funciones ejecutivas.

\* Derivado de la revisión teórica de la investigación de tesis: “Relación entre funciones ejecutivas y estados emocionales en adultos jóvenes” realizada por Juan Carlos Restrepo Botero para optar el título de doctor en Psicología con orientación en Neurociencia Cognitiva Aplicada.

\*\* Psicólogo. Doctor en Psicología con orientación en Neurociencia Cognitiva Aplicada de la Universidad Maimónides de Buenos Aires, Argentina. Docente y director del grupo de investigación en Psicología Aplicada de la Corporación Universitaria Lasallista.

\*\*\* Psicólogo, estudiante de maestría en Diagnóstico y Rehabilitación Neuropsicológica de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla de Puebla, México.

## Neuropsychology and executive functions

### Abstract

The current era has been defined as the Brain Age. This is why neurosciences, among which neuropsychology plays a very important role, have had a very fast development in recent years. In the brain-conduct study, approached by neuropsychology, the number of reports in the scientific literature about the executive functions is growing. They are related to the frontal lobes and have a fundamental role in the coordination of several brain processes. For instance, they are a part of the neuropsychological rehabilitation in learning processes with children and adolescents. This chapter aims to define the executive functions, their anatomical and functional correlates and the way they have been approached by the scientific literature in relation to the different brain disorders. At first, there is a contextualization about clinic neuropsychology and the basic aspects of the way the brain works.

**Key words:** Neuropsychology, brain, executive functions.

### Introducción

La neuropsicología clínica ha tenido un desarrollo muy acelerado durante los últimos 40 años<sup>2</sup>. El estudio de pacientes con lesiones cerebrales a través de pruebas neuropsicológicas ha aportado considerablemente a la comprensión del funcionamiento cerebral normal, así como a la identificación de los diferentes tipos de disfunciones que se pueden generar en éste<sup>3-5</sup>.

Lezak<sup>6</sup> ha identificado más de 600 tests y procedimientos para la valoración clínica del funcionamiento de los procesos cerebrales estudiados por la psicología y la neuropsicología. Por medio de estos instrumentos de evaluación, han surgido las diferentes baterías neuropsicológicas que, hoy por hoy, constituyen uno de los principales factores que le han otorgado autonomía a la neuropsicología como disciplina, y que han enriquecido las labores de diagnóstico e intervención en las instituciones del área de la salud a la par con psiquiatras, neurólogos y demás profesionales en este campo<sup>7-8</sup>.

A partir de los resultados obtenidos en los exámenes y evaluaciones neuropsicológicas, efectuados tanto en la labor clínica como en las investigaciones científicas, se han explorado procesos cognitivos y estados

emocionales tanto en población normal como en población patológica. Frente a esta última, algunos estudios se han enfocado en describir el perfil neuropsicológico de diferentes condiciones entre las que se encuentran: los traumatismos cráneo-encefálicos, la enfermedad de Alzheimer y demencias relacionadas, la enfermedad de Parkinson y demencias relacionadas, la enfermedad de Huntington y demencias de origen genético, los accidentes cerebro-vasculares y las demencias vasculares, la epilepsia y los trastornos convulsivos, la esclerosis múltiple, los efectos de agentes tóxicos, los trastornos inmunológicos y el virus de la inmunodeficiencia humana, el déficit de atención e hiperactividad, las discapacidades en el aprendizaje, los trastornos afectivos, la esquizofrenia, el síndrome de Gilles de la Tourette, la diabetes y otras condiciones sistémicas, el alcoholismo y abuso de sustancias. Asimismo, se han realizado investigaciones a diferentes condiciones neurológicas tales como: encefalitis, lesiones cerebrales, el síndrome del lóbulo frontal, lesiones en la espina dorsal, lesiones deportivas, demencia fronto-temporal, trastornos de la memoria, tumores cerebrales, el hidrocéfalo y la espina bífida, los aneurismas cerebrales y la miastenia gravis. No menos importante, se han estudiado condiciones sistémicas y genéticas tales como: las enfermedades cardiovasculares, la apnea del sueño, el síndrome de Klinefelter, la fibromialgia, así como el síndrome de fatiga crónica. Por último, se podría mencionar el estudio en condiciones psiquiátricas tales como el trastorno obsesivo-compulsivo, los trastornos de la conducta, la anorexia nerviosa, el estrés post-traumático y los trastornos de la personalidad<sup>9</sup>.

En neuropsicología, la comprensión del funcionamiento cerebral normal se ha entendido a través del conocimiento de lo anormal o patológico. Sin embargo, hacen falta más estudios normativos en población no patológica.

En el estudio de la relación cerebro-conducta, propio de la neuropsicología, diversos procesos han sido explorados. Procesos cognoscitivos tales como la atención, la percepción, la memoria, el aprendizaje y el lenguaje han sido clásicamente estudiados<sup>10,11</sup>. En los últimos años, ha cobrado relevancia el estudio de otros procesos, como por ejemplo, las llamadas funciones ejecutivas<sup>12-18</sup>.

## Funcionamiento cerebral básico

Aún en la historia de la neuropsicología, estrechamente ligada con la medicina y la psicología, y por supuesto con la filosofía, las posturas dua-

listas no han desaparecido totalmente y, por el contrario, siguen acompañando a las de tipo mecanicista. Intelecto frente a intuición, ciencia frente a arte y lo misterioso frente a lo lógico, según Springer y Deutsch<sup>19</sup>, se ven reflejados en varios investigadores que han enfatizado el significado de las diferencias entre los dos hemisferios. Según estos autores, los significados ante los hemisferios no son algo producto de la cultura o la filosofía, sino que está basado en las diferencias existentes entre ambos hemisferios. Lo anterior evidencia la existencia de diferentes aproximaciones que se han hecho a la forma como el cerebro está organizado y como éste procesa la información que le llega.

El estudio con pacientes lesionados cerebrales y comisuromizados puso al descubierto la diferencia interhemisférica conocida como asimetría cerebral, la cual, no sólo se refiere a las de tipo estructural, sino también a las funcionales<sup>20</sup>. De esta manera, se ha hecho una categorización de funciones específicas para cada hemisferio en términos de primacía aunque no de exclusividad. Así, el hemisferio derecho sintetiza información de tipo espacial, mientras que el izquierdo la de tipo temporal o en relación con el tiempo; el hemisferio derecho percibe formas, y el izquierdo, detalles; el hemisferio derecho codifica información sensorial en términos de imágenes, mientras que el izquierdo, en términos de descripciones lingüísticas; el hemisferio derecho tiene un sintetizador gestáltico, y el izquierdo, uno fonológico<sup>21,22</sup>. Sin embargo, varias preguntas sin resolver se han formulado ante la evidente asimetría cerebral después del estudio de diversas problemáticas como son: las dificultades en el aprendizaje, tartamudez, esquizofrenia, entre otras que, según Springer y Deutsch<sup>23</sup>, son las que han dirigido las investigaciones por más de 40 años.

Como bien lo indica Luria<sup>24</sup>, existen, principalmente, dos grandes posturas explicativas que intentan abordar el funcionamiento del cerebro y de las cuales se derivan todas las demás teorías. En primer lugar, se encuentran las de tipo localizacionista, las cuales están interesadas en la ubicación de centros o módulos específicos y que pueden llegar a ser exclusivos en el procesamiento de la información. En segundo lugar, las de tipo funcional, las cuales toman el cerebro como un todo que se organiza para cada tarea y aun cuando reconoce zonas especializadas, entienden que estas trabajan en paralelo con otras. A pesar de ser posturas divergentes, ambas tienen en común el reconocimiento de las diferencias existentes entre hemisferios o asimetrías hemisféricas<sup>25</sup>.

Alexander Luria<sup>26,27</sup>, a partir de las corrientes localizacionistas que existían en la neurología de su tiempo, propuso que las funciones cerebrales no podían localizarse dentro de “centros” y verse como ubicadas dentro de ellos. A partir de las primeras observaciones sistemáticas de la relación cerebro-conducta, Luria concluyó que las funciones cerebrales eran complejas e involucraban una serie de acciones y localizaciones, las cuales actuaban en conjunto para producir una función determinada. Esta postura era ampliamente apoyada por varios autores de su época entre los cuales estaba Vigostky del cual incluye la siguiente cita:

Las funciones psíquicas superiores pueden existir solamente gracias a la interacción de estructuras cerebrales altamente diferenciadas, cada una de las cuales llevan consigo una aportación específica en el conjunto dinámico y participan en el sistema funcional en sus propios papeles<sup>28</sup>.

Luria<sup>29</sup> comenta al respecto: “Esta postura que de raíz es tan opuesta tanto al ‘localizacionismo reduccionista’ como a las ideas de ‘equipotencialidad’ difusa será el pensamiento dirigente de todo nuestro libro”.

Los postulados de Luria fueron en su momento tan revolucionarios, que a partir de ellos se han marcado nuevas rutas de investigación y constituyen para una gran mayoría, primicias básicas de organización y funcionamiento cerebral a tal punto que, según Walsh y Darby<sup>30</sup>, se ha llegado a afirmar: “Cualquier modelo que se enfoque en compartimentos cerebrales a expensas de la integración tenderá a desviarse”.

Según Luria<sup>31</sup>, el cerebro humano cumple tres funciones primordiales. En primer lugar, es responsable de orientar a la persona frente a su medioambiente y enfocar la atención sobre aquellos elementos del ambiente necesarios para responder adaptativamente. En segundo lugar, el cerebro es responsable por procesar y almacenar información que pueda ser recuperada posteriormente dentro del proceso general de adaptación. Finalmente, el cerebro humano es responsable por regular la acción y ejecutar actos motores con propósitos adaptativos.

Luria, además, divide el funcionamiento cerebral en tres unidades con localización identificable, responsables por la ejecución de cada una de las tareas mencionadas anteriormente. La Unidad Funcional I es responsable por iniciar los procesos relacionados con la atención, es decir, por la activación de lo que denominó el reflejo de orientación. De acuerdo con Luria, este proceso tiene su inicio en la formación reticular y se difunde por todo el tejido cerebral a través del sistema activador reticular ascendente.

Este sistema se ha descrito como “difuso” y “penetrante”, y su localización exacta no ha sido determinada. Luria describe el impacto de la Unidad Funcional I como si éste, de alguna forma, “alumbra” el tejido cerebral y lo “prepara” para “enfocar”. Una vez iniciados estos procesos, y el tejido cerebral ha sido activado, los mismos deben ser sostenidos en un orden temporal, lo cual requiere una actividad continuada del sistema.

La Unidad Funcional II, según lo ha descrito Luria, tiene la responsabilidad de recibir la información que accede al cerebro primordialmente por medio de la visión, la audición y el tacto. Cumple, además, la tarea de procesar la información recibida y almacenarla para su recuperación posterior. La localización de esta unidad se ha ubicado en los lóbulos “posteriores” de la corteza cerebral, es decir, los parietales, los temporales y los occipitales. En efecto, la Unidad Funcional II es responsable por la percepción y la memoria.

Por otro lado, la Unidad Funcional III es responsable de la organización, la ejecución y la regulación de la acción. De acuerdo con Luria, la acción se origina a partir de un pensamiento, proceso que atribuyó a las regiones anteriores de los lóbulos frontales. A partir del pensamiento, se organiza la acción, la cual es “ejecutada” y su impacto sobre el medioambiente demanda nuevamente la activación de los procesos de atención mediados por la Unidad Funcional I para la debida regulación de la acción. En la Unidad Funcional III es donde se ubicaría el concepto de funciones ejecutivas que será más adelante abordado.

De acuerdo con Luria, la organización interna de cada una de las unidades funcionales está determinada por la presencia de tres tipos de zonas o áreas de funcionamiento dentro de las cuales la información es procesada de forma diferencial. En primer lugar, existen las zonas primarias. Estas son responsables por el procesamiento de la información en términos de las características físicas de la misma. La Unidad Funcional II es responsable por recibir, procesar y almacenar información proveniente de los sentidos, especialmente del tacto, la audición y la visión. Estas zonas primarias se encuentran ubicadas en los lóbulos parietal, temporal y occipital, respectivamente.

La información proveniente del tacto es recibida en el lóbulo parietal, la información auditiva es recibida en el lóbulo temporal y la información

visual en el occipital. Posteriormente, esta información pasa a las zonas secundarias, las cuales son adyacentes a las zonas primarias. En las zonas secundarias, la información es procesada con base en aprendizajes previos. En términos de la información táctil, ésta se conforma con el esquema corporal. La información auditiva es procesada con base en las reglas del idioma que se ha aprendido, y la visual en términos de las reglas de la organización del espacio.

Por último, se destacan las zonas terciarias, las cuales son comunes o diversas avenidas de entrada de información y son responsables por la integración intersensorial, es decir, por unir, por ejemplo, información visual y auditiva, o táctil y visual.

Los planteamientos de Luria aportaron tanto a la forma de estudiar la relación cerebro-conducta, que se constituyeron en primicias básicas de cómo el cerebro organiza y procesa la información<sup>32</sup>. Actualmente, según Nicholls y Whelan<sup>33</sup>, existen tres modelos principales que surgen a partir de estos planteamientos. El primero postula que los procesos cerebrales se realizan en serie y/o en paralelo. Un segundo modelo afirma que los procesos se realizan de forma global y/o local y, por último, está aquel que dice que los procesos cerebrales se llevan a cabo de forma analítica y/u holística.

El funcionamiento cerebral básico anteriormente descrito puede ser interrumpido o alterado por varios fenómenos. Waxman<sup>34</sup> identifica nueve trastornos principales que afectan al sistema nervioso: trastornos vasculares, traumatismos, neoplasias, infecciones e inflamaciones, trastornos de origen tóxico, metabólico y por deficiencias; enfermedades desmielinizantes, enfermedades degenerativas, malformaciones congénitas y trastornos perinatales y, por último, trastornos musculares.

Como se ha mencionado anteriormente, el entendimiento del funcionamiento normal del cerebro ha sido posible mediante el estudio de las alteraciones anatómicas y funcionales que se asocian con los fenómenos anteriormente enumerados. Estos efectos se identifican principalmente en tres zonas de acuerdo con las tres unidades funcionales de Luria<sup>35</sup>: en los lóbulos frontales, ocasionando problemas de organización y ejecución de la conducta; en los lóbulos posteriores, dando como resultado dificultades en la percepción, y en la memoria y en el tallo cerebral, con repercusiones en los procesos de activación o atención. La anterior clasificación es, aún hoy en día, apoyada por numerosos estudios recientes<sup>36-40</sup>.

## Funciones ejecutivas

Cuando las alteraciones mencionadas anteriormente comprometen los lóbulos frontales se dice que se comprometen con ello las llamadas funciones ejecutivas. Así, diversas funciones son alteradas: procesos de organización y ejecución de la acción dentro de los cuales se ubica la expresión del lenguaje, déficit característico en la programación de las funciones corticales superiores, así como en la organización, regulación y verificación de la acción<sup>41</sup>, dificultades en el uso y aplicación del juicio<sup>42</sup>, disminución de la conciencia del orden temporal de los eventos, así como de la frecuencia de los eventos ambientales<sup>43</sup>, la disminución en el uso de pautas autoestablecidas como guías de la conducta, particularmente en las lesiones dorso-laterales frontales izquierdas, así como la disminución en la inhibición de las respuestas, particularmente en las lesiones frontales medias<sup>44</sup>, dificultad para estimar la frecuencia de los eventos cuando están implicados los frontales derechos y dificultad para formular aproximaciones con base en señales ambientales como el tamaño y la cantidad en lesiones fronto-laterales y medias<sup>45</sup>, la utilización exagerada de respuestas principalmente cuando la lesión se ubica en las zonas frontales inferiores<sup>46-48</sup>, afasias o disfasias de Broca relacionados con el hemisferio izquierdo, producto de disartria o trastorno motor de la pronunciación y disfasia motora transcortical, producto de lesiones en las regiones anteriores y dorsales a la llamada área de Broca<sup>49</sup>, aumento en el esfuerzo “paralingüístico”, dificultades en la prosodia o ritmo del lenguaje<sup>50</sup>, entre otros.

La variedad de alteraciones permite entender que las funciones ejecutivas son un conjunto de habilidades de orden superior que son controladas por los lóbulos frontales<sup>51</sup>. Está compuesto, por tanto, por habilidades cognitivas tales como: la anticipación, la generación de estrategias, la selección y ejecución del plan de acción apropiado y socialmente aceptable a la meta propuesta, el monitoreo de la conducta manteniendo la estrategia elegida en caso de ser exitosa y la flexibilidad mental para variar de estrategia ante contingencias<sup>52,53</sup>. Se trata de una función compleja, y el análisis de cada componente de la ésta y su peso factorial son bastante difíciles y, en algunos casos, confusos, pues cuando se evalúa la función ejecutiva se hace paralelamente con otras funciones, y no es posible hacerlo de otra forma<sup>54-56</sup>. Al explorar este término en otros autores, ellos lo definen como un conjunto de factores organizados y ordenados subyacentes a todas las demás actividades cognoscitivas<sup>57</sup>. La perspectiva americana sobre las fun-

ciones ejecutivas está influenciada fuertemente por Lezak<sup>58</sup> quien aporta que las funciones ejecutivas están caracterizadas por permitir que una persona funcione con independencia, que su comportamiento esté guiado por un propósito determinado, con conductas autosuficientes y de una manera satisfactoria. Cuando se alteran las funciones ejecutivas la persona no es capaz de autocuidarse, de realizar trabajos para otros ni de mantener relaciones sociales normales, independiente de cómo conserve sus capacidades cognitivas.

Investigaciones de estudios clínicos y experimentales durante las últimas tres décadas proponen la regulación de las funciones ejecutivas, sobre todo, el rol tradicional de la corteza prefrontal y la participación de las estructuras subcorticales como los ganglios basales<sup>59</sup> y el cerebelo<sup>60</sup>, cambiando la visión funcional tradicional de los ganglios y cerebelo como estructuras que coordinan el movimiento.

La neuroanatomía presenta las funciones ejecutivas dentro del lóbulo frontal en el cual se ven reflejadas actividades, específicamente: las regiones anteriores, el área pre-frontal y las conexiones de las zonas del cortex cerebral y las estructuras subcorticales<sup>61</sup>. La complejidad de los lóbulos frontales es evidente en los diversos sistemas de conexiones recíprocas con el sistema límbico (sistema motivacional), con el sistema reticular activador (sistema de atención sostenida), con las áreas de asociación posterior (sistemas organizativos de reconocimiento), y con las zonas de asociación y las estructuras subcorticales (núcleos basales) dentro de los mismos lóbulos frontales (sistema de control sobre las respuestas comportamentales)<sup>62,63</sup>.

El lóbulo frontal, lesiones y trastornos de los ganglios basales no son sólo de las patologías relacionadas con la disfunción ejecutiva. Varios estudios con pacientes con déficit en las funciones ejecutivas han mostrado que pueden rendir normalmente en pruebas cognitivas estructuradas y solamente manifestarán su déficit en situaciones que requieran de la capacidad de organizar, monitorear y controlar la propia conducta. Hay pruebas en las que los pacientes con enfermedad vascular subcortical isquemia muestran deficiencias en la prueba selectiva de la función ejecutiva. También existen pacientes con demencia frontal y con la enfermedad de Alzheimer y otras demencias asociadas, en los que se presenta este fenómeno<sup>64</sup>. Los déficits ejecutivos son comunes en pacientes con diversos trastornos psiquiátricos, incluyendo la depresión<sup>65,66</sup> y la esquizofrenia<sup>67,68</sup>. Todos estos

trastornos se caracterizan por una amplia gama de déficits. Existe en todos ellos una disfunción en las conexiones fronto-subcorticales.

Arango, et al.<sup>69</sup> proponen no limitar el estudio de las funciones ejecutivas a su aspecto cognoscitivo, como la mayoría de autores lo hacen, a través de la evaluación de éstas por medio de tests neuropsicológicos. Proponen considerar también el que denominan *dominio conductual* para el que, según ellos, no existen muchos autores que se enfoquen en estos aspectos estructurales como lo señalan Gioia et al. (citado por Arango et al.<sup>70</sup>). Lo anterior, debido a la complejidad del funcionamiento del lóbulo frontal que hace que existan diferentes definiciones que, aunque coinciden en sus planteamientos básicos, difieren en el énfasis que les prestan a determinados procesos más que a otros. Por esa razón, se identifican diferentes formas de evaluarlas y estudiarlas. Resulta interesante en la revisión bibliográfica que ellos hacen sobre el síndrome prefrontal el planteamiento de que las funciones ejecutivas tienen 3 dominios básicos: cognoscitivo, conductual y emocional que tienen respaldo en el estudio de pacientes clásicos como lo son Phineas Gage y Elliot<sup>71</sup>. Son las situaciones sociales y personales a las que se enfrenta una persona en su vida cotidiana las que mantienen unida la anterior tríada y las que permiten una adecuada interacción entre ellas. En otras palabras, algunos pacientes con síndrome prefrontal, aunque tengan un desempeño normal o superior en la ejecución de pruebas neuropsicológicas y psicológicas en ambientes controlados, no predicen necesariamente su funcionamiento en situaciones de su vida cotidiana. Esto sucede porque, según Damasio<sup>72</sup>, en estas circunstancias el procesamiento en tiempo real puede requerir mantener información en la mente por períodos más prolongados, especialmente si se generan nuevas opciones y consecuencias, además de necesitar comparación.

A continuación se enumerarán las habilidades enunciadas por Arango<sup>73</sup> para cada uno de los dominios. El *dominio cognoscitivo* organizado en la región dorsolateral lo conforman: la habilidad para planificar la conducta hacia una meta, la programación de acciones necesarias para alcanzar un objetivo, la flexibilidad para corregir errores o incorporar conductas nuevas en función de los estímulos del entorno y para finalizar la tarea cuando se han alcanzado los objetivos, el control de la interferencia de estímulos irrelevantes, el monitoreo de la puesta en marcha de planes para comprobar su ajuste a un objetivo y estrategias iniciales, memoria operativa, producción del lenguaje, atención, pensamientos abstracto y razonamiento matemáti-

co. El *dominio conductual* organizado en las regiones órbita-frontales está conformado por regulación de comportamientos sociales, responsabilidad, composición y estructura de la personalidad, control de impulsos, constancia, organización, disciplina, flexibilidad en las conductas para cambiar de tareas, capacidad para iniciar acciones sin instigación exterior y autorregulación de las conductas dirigido a solucionar problemas y ejecutar tareas. Por último, en el *dominio emocional*, organizado también en la región órbita-frontal y medial, se identifican: el procesamiento de información emocional, la expresividad y la capacidad de generar respuestas adaptativas a diferentes estímulos con cargas emocionales.

Una vez aclarado el concepto funciones ejecutivas, se procederá a revisar otro concepto más específico de las funciones ejecutivas: el concepto teoría de la mente. Ésta es una de las tantas habilidades superiores mencionadas anteriormente.

El término “Teoría de la Mente” fue definido originalmente por Premack y Woodruff<sup>74</sup> como la habilidad para adscribir, asignar, atribuir estados mentales a otros y a uno mismo. Estos autores la consideran teoría, en primer lugar, porque tales estados no son directamente observables, y en segundo lugar, porque el sistema puede utilizarse para hacer predicciones, de forma específica, acerca del comportamiento de otros organismos.

Por otra parte, Eisenber y Miller<sup>75</sup> plantean que uno de los aspectos fundamentales de la teoría de la mente es la empatía; ésta permite un adecuado funcionamiento social e interpersonal a través de la expresión de sentimientos, la cual por sí misma es un inhibidor del comportamiento violento. Para determinar esto, se realizó un meta-análisis, donde se concluyó que el entrenar a los individuos en la experimentación de sentimientos de empatía disminuyen, no solamente las respuestas agresivas y hostiles, sino que incrementa la presentación de comportamientos sociales más adecuados. Varios autores sostienen que la aparición de las conductas violentas se debe, al menos en parte, a no poder inferir los estados mentales y emocionales del otro.

La teoría de la mente es una función cognitiva que se adquiere desde la niñez y se desarrolla a lo largo de toda la infancia. A partir de los 18 y 24 meses se inicia el desarrollo ontogénico de la teoría de la mente. Se han descrito tres estadios fundamentales en el desarrollo de la teoría de la mente en el ser humano, que se conocen como fase 1, fase 2 y una tercera fase

de entendimiento y reconocimiento de los errores. La fase 1 se adquiere hacia los 4-5 años de edad corresponde a la habilidad para entender que otras personas pueden tener creencias falsas sobre el estado del mundo, que es diferente a nuestro propio concepto del mundo. La fase 2, que se alcanza entre los 6-7 años, se denomina la fase de creer en lo creído, y hace referencia a la habilidad para reconocer que uno puede tener una creencia falsa acerca de lo que los demás creen. En la fase 3, se adquiere la habilidad para reconocer los errores, se alcanza entre los 9-11 años y corresponde a la capacidad de entender y reconocer situaciones en las que alguien dice algo inapropiado, sin saber o entender que no debería decirlo; es decir, que la gente puede equivocarse de forma no consciente. Es preciso recordar que el medio familiar resulta importante en el desarrollo de la teoría de la mente. Los padres que hablan a sus hijos sobre los estados emocionales de otros y los hermanos mayores pueden estimular en los niños los procesos de adquisición de la teoría de la mente. Por el contrario, un medioambiente familiar con depravación emocional o comportamientos abusivos impide el desarrollo de las habilidades cognitivas de la teoría de la mente y produce un funcionamiento desadaptativo o abstraído, acompañado de una franca inhibición en lo funcional, como estrategia de afrontamiento frente a las agresiones del medio<sup>76-78</sup>.

En lo anterior se evidencia un proceso de aprendizaje en el cual la interacción es necesaria para llegar a una comprensión de la mente. Pero la teoría de la mente no solo se limita a atribuir estados mentales a otros seres humanos sino que también, gracias a ésta, el ser humano les puede atribuir estados mentales a animales y hasta objetos. Ejemplo de ello es cuando alguien se lastima con algún objeto y acto seguido el individuo procede a descargar su rabia contra ese objeto con algunas verbalizaciones, atribuyéndole de esta forma alguna intención al objeto.

En este punto es importante aclarar que los estudios sobre teoría de la mente no se han quedado solo en el sustrato abstracto o cognitivo de la misma. Las investigaciones y resultados motivados por éstas han dado pie al estudio del sustrato biológico de la teoría de la mente. Las estructuras cerebrales y su desarrollo han dejado entrever los procesos de adaptación que evidencian nuevas redes neuronales y circuitos que la sustentan biológicamente. En recientes investigaciones se habla de neuronas espejo que se activan cuando los primates imitan el comportamiento de otro. El descubrimiento de las neuronas espejo en los humanos permite suponer que

la capacidad de imitar las acciones de los otros ha evolucionado hasta ser capaz de simular los estados mentales del otro. Pero para la teoría de la mente, es necesario, además, que el individuo sea capaz de distinguir si la conducta es originada por él mismo o por el otro, porque simular el estado mental del otro no necesariamente implica una reflexión consciente. Se podría decir entonces, que el sustrato biológico de la teoría de la mente aborda mucho más que el estudio de las neuronas espejo.

El procesamiento de los estímulos relacionados con la teoría de la mente supone la integración de redes neurales entre la corteza prefrontal medial, la circunvolución temporal superior y los lóbulos temporales. La activación de estas áreas durante el proceso de mentalización, entendida en términos de la evolución de procesos preexistentes, permite distinguir entre lo animado y lo inanimado, lo mío y lo de los otros, desarrollar la habilidad para representar las acciones dirigidas hacia un objetivo e inferir los estados mentales del otro<sup>79</sup>.

Asimismo, es posible pensar que la teoría de la mente va más allá de ser una teoría acerca de los estados mentales del otro, ya que ésta, además, implica una identificación y subjetivación de las relaciones en las dinámicas sociales.

En este punto aparece un tercer concepto que es importante abordar en la presente revisión teórica: el concepto de cognición social. Ésta “se refiere al conjunto de competencias, experiencias cognoscitivas y emocionales que rigen las relaciones y explica los comportamientos del ser humano con su entorno familiar y social”<sup>80</sup>. Además, interactúa con otras funciones cognoscitivas como la percepción de señales sociales, la motivación, el afecto, la atención y la memoria.

De acuerdo con lo anterior, se puede decir que la cognición social es un componente de la teoría de la mente. Se ocupa, por tanto, esencialmente del modo como funciona la estructura cognitiva del hombre, ya que usualmente éste percibe y procesa los estímulos del medio de acuerdo con sus experiencias o vivencias cotidianas, lo cual difiere del pensamiento científico en tanto éste está fundamentado en un proceso lógico de pensamiento, evitando así los sesgos en el procesamiento de la información.

Al hablar de cognición social, será también necesario hacer referencia a sus demás dimensiones, entre las cuales se destacan: construcción de la identidad y conciencia de uno mismo; toma de decisiones; competencia

social, juicios morales y comportamientos antisociales; función pragmática del lenguaje y empatía.

Si bien, la anterior revisión no pretende ser exhaustiva, permite ilustrar la complejidad de las llamadas funciones ejecutivas y su papel fundamental en la conducta humana. Como se puede evidenciar, el estudio de las funciones ejecutivas es aún un campo de retos. No en vano hoy por hoy se cataloga a esta era como la era del cerebro y, por tanto, la era de las neurociencias.

### Referencias bibliográficas

1. ROSSELLI COCK, Diego Andrés. *Neuro: Introducción a las neurociencias*. Bogotá: Centro Editorial Javeriano CEJA, 1997. 348 p.
2. SNYDER, Peter Jeffrey & NUSSBAUM, Paul David. *Clinical neuropsychology: A Pocket Handbook for Assesment*. Washington: American Psychological Association, 2003. 674 p.
3. JUNQUÉ, Carme y BARROSO, José. *Neuropsicología*. Madrid: Síntesis; 1994. 346 p.
4. WALSH, Kevin. & DARBY, David. *Neuropsychology: A Clinical Approach*. Edinburgh: Churchill Livingstone, 1999. 477 p.
5. KOLB, Bryan & WHISHAW, Ian. *Neuropsicología humana*. Madrid: Editorial Médica Panamericana, 2006. 763 p.
6. LEZAK, Muriel. *Neuropsychological assessment*. 3a. ed. New York: Oxford University, 1995. 1056 p.
7. SNYDER, Peter Jeffrey & NUSSBAUM, Paul David., *Op. Cit.* 674 p.
8. WALSH, Kevin. & DARBY, David., *Op. Cit.* 477 p.
9. HERRERA, J.A. *Introducción a la evaluación neuropsicológica*. Manuscrito en preparación.
10. JUNQUÉ, Carme y BARROSO, José. *Op. Cit.* 346 p.
11. WALSH, Kevin. & DARBY, David., *Op. Cit.* 477 p.
12. FUSTER, Joaquin M. *The prefrontal cortex: anatomy, physiology and neuropsychology of the frontal lobes*. New York: Raven Press, 1980. 320 p.
13. WILLIS, Dennis y MATEER, Catherine. *Developmental impact of frontal lobe injury in kiddle childhood. Special issue: the role of frontal lobe in maturation in cognitive and social development*. En: *Brain and Cognition*. 1992. Vol. 20, no.1. p. 196-204.
14. LEZAK, Muriel. *Op. Cit.* 1056 p.
15. LEÓN-CARRIÓN, José.; *et al.* *Neuropsicología del pensamiento: control ejecutivo y lóbulo frontal*. Sevilla: Kronos, 1997.

16. BARROSO, Juan Manuel y LEÓN, José. Funciones ejecutivas: control, planificación y organización del conocimiento. En: Revista de Psicología General y Aplicada. 2002. Vol. 55, no.1. p.27-44
17. FLORES LÁZARO, Julio Cesar y OSTROKSY-SOLÍS, Feggy. Neuropsicología de lóbulos frontales, funciones ejecutivas y conducta humana. En: Revista Neuropsicología, Neuropsiquiatría y Neurociencias. 2008. Vol.8, no.1. p.47-58
18. HUGHES, John H.; *et al.* Differential deficit in executive control in euthymic bipolar disorder. En: Journal of Abnormal Psychology. 2009. Vol.118, no.1, p.146-160.
19. SPRINGER, Sally & DEUTSCH, Georg. Left brain right brain. New York: W.H Freeman and Company, 1993. 406 p.
20. WALSH, Kevin. & DARBY, David., Op. Cit. 477 p.
21. SPRINGER, Sally & DEUTSCH, Georg. Op. Cit. 406 p.
22. WALSH, Kevin. & DARBY, David., Op. Cit. 477 p.
23. SPRINGER, Sally & DEUTSCH, Georg. Op. Cit. 406 p.
24. LURIA, Alexander Romanovich. Las funciones corticales superiores del hombre. Barcelona: Fontanella, 1983. 691 p.
25. WALSH, Kevin. & DARBY, David., Op. Cit. 477 p.
26. LURIA, Alexander Romanovich. Cerebro y lenguaje. Barcelona: Editorial Fontanella; 1978. 560 p.
27. \_\_\_\_\_. El cerebro en acción. Barcelona: Editorial Fontanella; 1979. 383 p.
28. \_\_\_\_\_. Las funciones corticales superiores del hombre, Op. Cit. p.72
29. *Ibíd.*, p.72
30. WALSH, Kevin. & DARBY, David. Op. Cit. p.352
31. LURIA, Alexander Romanovich. El cerebro en acción. Op. Cit. 560 p.
32. NICHOLLS, Michael & WHELAN, Rochelle. Hemispheric asymmetries for the temporal resolution of brief tactile stimuli. En: Journal of Clinical and Experimental. Neuropsychology. 1998. Vol.20, no.4, p.445-456.
33. *Ibíd.*, p.445-456.
34. WAXMAN, Stephen. Neuroanatomía correlativa. México D.F.: El Manual Moderno, 1997. 461 p.
35. LURIA, Alexander Romanovich. Las funciones corticales superiores del hombre. Op. Cit. p.72

36. BAKKER, K. & ANDERSON, V. Assessment of attention following pre-school traumatic brain injury: a behavioural attention measure. En: Pediatric Rehabilitation. 1999. Vol.3, no.4. p.149-157.
37. CICERONE, Keith. Attention deficits and dual task demands after mild traumatic brain injury. En: Brain Injury. 1996. Vol.10, no.2, p.79-89.
38. MANGELS, Jennifer; *et al.* Impaired retrieval from remote memory in patients with frontal lobe damage. En: Neuropsychology. 1996. Vol.10, no.1, p.41.
39. NIEMANN, Hendrik; RUFF, Ronald & KRAMER, Joel. An attempt towards differentiating attentional deficits in traumatic brain injury. En: Neuropsychology. 1996. Vol.6, no.1. p.11-46.
40. PALMESE, CHRISTINA y RASKIN, S Sarah. The rehabilitation of attention in individuals with mild traumatic brain injury, using the APT-II programme. En: Brain Injury. 2000. Vol. 14, no.6, p.535-548.
41. HÉCAEN, J. & ALBERT, M. Disorders of mental functioning related to frontal lobe pathology. En: D. F. Benson & D. Blumer (Eds.) Psychiatric aspects of neurological disease. New York: Grune & Stratton; 1975.
42. WALSH, Kevin W. Understanding brain damage. Edinburgh: Churchill Livingstone; 1985. 280 p.
43. CROSSON, Bruce. Treatment of interpersonal deficits for head-trauma patients in patient rehabilitation settings. En: The Clinical Neuropsychologist. 1987. Vol 1, no.4. p.335-352.
44. WALSH, Kevin W. Op. Cit. 280 p.
45. *Ibíd.*, 280 p.
46. CAPRUSO, D. & LEVIN, H. Cognitive impairment following head injury. En: Neurologic Clinics of North American. 1992. Vol.10, no.4. p.879-893.
47. STABLUM, F.; *et al.* Attention and control deficits following closed head injury. En: Cortex. 1994. Vol. 30. p. 603-618.
48. WALSH, Kevin W. Op. Cit. 280 p.
49. LURIA, Alexander Romanovich. El cerebro en acción. Op. Cit. 560 p.
50. \_\_\_\_\_. Fundamentos de neurolingüística. Barcelona: Toray Masson, 1980.
51. LEÓN-CARRIÓN, José.; *et al.* Op. Cit.
52. LURIA, Alexander Romanovich. Human brain and psychological processes. New York: Harper & Row; 1966. 587 p.
53. LEZAK, Muriel. The problems of assessing executive functions. En: International Journal of Psychology. 1982. Vol.17. p. 281-297.

54. BOONE, K. Neuropsychological assessment of executive functions. In: Miller Bl, Cummings JL, eds. The human frontal lobes. New York: The Guilford Press; 1999.
55. LEZAK, Muriel. Op. Cit. p. 281-297.
56. DENCKLA, Martha Bridge. Research on executive function in a neurodevelopmental context: application of clinical measures. En: Developmental Neuropsychology. 1996. Vol.12. p. 5-15.
57. PINEDA SALAZAR, David Antonio; *et al.* Executive dysfunction in children with attention deficit hyperactivity disorder. En: International Journal of Neuroscience. 1998. Vol. 96. p. 177-96.
58. LEZAK, Muriel. Op. Cit. p. 281-297.
59. TAYLOR, Ann; SAINT-CYR, J. & LANG, A. Frontal lobe dysfunction in Parkinson's disease. En: Brain. 1986. Vol. 109. p. 845-883.
60. ABEL, C.; *et al.* Evaluación cognitiva en 12 pacientes con enfermedad cerebelosa degenerativa pura. En: Revista de Neurología. 2005. Vol. 40, no. 8. p. 465-472.
61. STRUSS, Donald y BENSON, Frank. The frontal lobes. New York: Raven Press; 1997. 320 p.
62. LURIA, Alexander Romanovich. Human brain and psychological processes. Op. Cit. 587 p.
63. CHOW, T.W. & CUMMING, J.L. Frontal-subcortical circuits. In: MALLER, B. & Cummings, J. Eds. The human frontal lobes. New York: Guilford press; 1999.
64. CUMMING, J. L. Vascular subcortical demencias: clinical aspects. En: Demencia. 1994. Vol. 5. p. 177-180.
65. AUSTIN, Marie-Paule.; MITCHELL, Philip. & GOODWIN, Guy. Cognitive deficits in depression: posible implications for functional neuropathology. En: The British Journal of Psychiatry. 2001. Vol. 178. p. 200-206
66. CUMMING, J. L. Op. Cit. p. 177-180.
67. ELLIOTT, Rebecca & SAHAKIAN, Barbara. The neuropsychology of schizophrenia: relations with clinical and neurobiological dimensions. En: Psychological Medicine. 1995. Vol. 25, no. 3. p. 581-94.
68. WEINBERGER, Daniel & GALLHOFER, Bernd. Cognitive function in schizophrenia. En: International Clinical Psychopharmacology. 1997. Vol. 12, no.4. p. 29-36.
69. ARANGO TOBÓN, Olber Eduardo; PUERTA, Isabel Cristina y PINEDA SALAZAR, David Antonio. Estructura factorial de la función ejecutiva desde el dominio conductual. En: Revista diversitas – perspectivas en psicología. 2008. Vol.4, no.1, p. 63-77.
70. *Ibíd.*, p. 63-77.
71. DAMASIO, Antonio. El error de Descartes. Barcelona: Editorial Crítica, 2001. 325 p.

72. *Ibíd.*, 325 p.
73. ARANGO TOBÓN, Olber Eduardo. Estructura factorial de la función ejecutiva utilizando un inventario de conductas en adolescentes infractores del Valle de Aburrá. Trabajo de grado para optar al título de Magíster en Neuropsicología. Medellín, Colombia. Universidad de San Buenaventura. 2006.
74. PREMACK, David & WOODRUFF, Guy. Does the chimpanzee have a theory of mind? *En*: Behavioral and Brain Sciences. 1978. Vol. 1, no. 4. p. 515-526.
75. EISENBERG, Nancy y MILLER, P. A. The relation of empathy to prosocial and related behaviors. *En*: Psychological Bulletin. 1987. Vol. 101, no. 1. p. 91-119.
76. RIVIÈRE, Ángel y NÚÑEZ, María. La mirada mental. Buenos Aires: Aique, 1996. 131 p.
77. RIVIÈRE, Ángel. Objetos con mente. Madrid: Alianza Editorial, 1998. 245 p.
78. ROSAS DÍAZ, Ricardo; *et al.* La mente reconsiderada en homenaje a Ángel Riviere. Santiago: Ediciones Psykhe, 2001. 347 p.
79. TÉLLEZ-VARGAS, Jorge Enrique. Teoría de la mente: evolución, ontogenia, neurobiología y psicopatología. *En*: Avances en psiquiatría biológica. 2006. Vol. 7, no. 1. p. 6-27.
80. GIL-JUÁREZ, Adriana. Psicología social de hechos, de procesos y de proyectos: objeto y tiempo social. *En*: Athenea Digital. 2006. Vol. 9. p. 78-99.

# La investigación en administración en Colombia\*

Rodrigo Posada Bernal\*\*

## Resumen

**Introducción.** Recientemente se ha finalizado una investigación auspiciada por la Asociación Colombiana de Facultades de Administración, y realizada por un grupo interdisciplinario de investigadores de diferentes universidades del país, titulada “La Investigación en Administración en Colombia. Condiciones para la generación, conocimiento, investigadores, institucionalización y producción científica”, la cual ha logrado impactar a los diferentes gremios investigadores en el saber específico de la administración. Los resultados de esta investigación no se pueden interpretar como un compendio epistemológico de las ciencias sociales ni específicamente de la práctica de la administración; su importancia se centra en varios aspectos que emanan desde la tipificación del investigador en estos saberes, hasta el cuestionamiento de la existencia de un estatuto científico de la administración. Un proceso investigativo exige la concurrencia de dos sujetos para poder generar conocimiento: un sujeto que adquiere el carácter de objeto, el cual es susceptible de estudiarse, y otro sujeto que tiene la intención y la capacidad de estudiar al objeto, con un cúmulo enorme de realidades, imaginarios e imprecisiones, que es quien le imprime a la investigación la dinámica personal. Estos dos sujetos actúan en el marco de un ambiente, de un entorno que dinamiza o retrasa su intencionalidad, y más aún, que desvirtúa o valida cualquier intento de investigación.

---

\* Artículo derivado de la investigación del mismo nombre, realizada entre los años 2009 y 2010 por el grupo de investigación de ASCOLFA. Gregorio Calderón Hernández, Germán Albeiro castaño Duque, Juan Pablo Arrubla Zapata, Liliana María Gutiérrez Vargas, Rodrigo Posada Bernal, Adriana Ruiz Berrío, Héctor Mauricio Serina Gómez y Jorge Andrés Vivares Vergara.

\*\* Economista Industrial, Magister en Ciencias de la Administración, Docente de la Corporación Universitaria Lasallista en la Facultad de Ciencias Administrativas y Agropecuarias.

**Objetivo.** Caracterizar el estado actual de la investigación en las facultades de administración de Colombia. **Material y método.** La propuesta se abordó desde dos perspectivas: la primera de ellas se centró en lo comprensivo del problema, en donde se trató de dar respuesta a un primer cuestionamiento relacionado con el pensamiento y las motivaciones para la acción investigativa de los investigadores; y la segunda giró alrededor de lo descriptivo de la situación estudiada, donde se pretendió dar respuesta a interrogantes como ¿Cuáles son las concepciones epistemológicas, ontológicas, praxeológicas, éticas y metodológicas de los investigadores vinculados a las facultades de administración? ¿Cómo se determina el desarrollo de políticas y el estado de la infraestructura científico-tecnológica para la investigación, con que cuentan las facultades de administración del país? ¿Cuáles son las tendencias metodológicas en las investigaciones realizadas en las facultades de administración? ¿Cómo se caracterizan las áreas de interés de investigación en las facultades de administración? Y ¿cuál es la producción académica fruto de los procesos investigativos?. **Resultados.** La investigación permitió caracterizar diferentes tópicos que intervienen en los procesos de generación del conocimiento en las facultades de Administración, lo cual posibilitó las siguientes caracterizaciones de este proceso: La existencia de una alta dependencia de la generación del conocimiento de aspectos derivados de problemas sociales y del desarrollo económico del país. Además, se pudo concluir que la generación de conocimiento en administración, como en cualquier disciplina del saber humano, se basa en investigaciones estructuradas en aspectos epistemológicos, ontológicos, praxeológicos, metodológicos, éticos y axiológicos, y en la legitimidad científica y social; adicionalmente, se pudo hacer una caracterización de los investigadores, basada en sus particularidades y en el ambiente donde desarrollan su actividad; finalmente, entre los resultados más relevantes se destacaron los que evidenciaron los fines formativos, los que dan respuesta a la realidad social nacional y los que presentan solución a problemas organizacionales o empresariales de las regiones. **Conclusión.** Se espera que los resultados obtenidos de la investigación sean útiles para las facultades de administración por cuanto se cuenta con información para tomar decisiones en relación con las temáticas de investigación; para los investigadores y académicos, pues cuentan con resultados que les permitirán conocer la realidad actual de su quehacer y les facilitarán reorientar su actividad investigativa; y para las entidades de política (MEN, ICFES, COLCIENCIAS) pues cuentan con una descripción de la realidad nacional en este campo disciplinar.

**Palabras Clave:** investigación, conocimiento, epistemología, investigadores, administración.

## Research on management in Colombia

### Abstract

**Introduction.** A research work sponsored by the Asociación Colombiana de Facultades de Administración has been recently finished. It was made by an interdisciplinary group conformed by researchers from several Colombian universities and was named “Research on management in Colombia. Conditions for the generation, the knowledge, the researchers, the institutionalization and the scientific production”, and it has been able to impact research guilds under scientific knowledge about management terms. The results of this research work can neither be taken as an epistemological compendium of social sciences, or as a specific abstract of the management practice. Its relevance lays on several aspects that cover several aspects, including the typing of researchers according to the kinds of knowledge related to the subject and a questioning of the very existence of a scientific statute for management. A research process demands two subjects to generate knowledge: A subject that assumes the character of object, which can be studied, and another subject intended and able to study the object, with a great accumulation of realities, imaginary and imprecise contents, giving the research a personal dynamism. These two subjects act within an environment that accelerate or decelerate the intention and, furthermore, refute or validate any research effort. **Objective.** To characterize the current status of management research in Colombian universities. **Materials and methods.** The issue was approached from two perspectives: The first was focused on the comprehension of the problem, trying to answer a first question related to the thought and the motivations for the investigative action assumed by researchers and the second was focused on the description of the situation studied,, trying to answer questions such as: What are the epistemological, ontological, praxeological, ethical and methodological conceptions of the researchers who work in the management schools? How is the development of policies and the status of the scientific and technological infrastructures determined? And what is the academic production that results from the research processes? **Results.** The research work was useful to characterize several topics that intervene on the knowledge generation processes that take place at management schools, making possible the following classifications within those processes: The presence of a great dependence between the generation of knowledge and aspects related to the

country's social problems and economic development. It could be also concluded that the generation of knowledge about management issues, as in any other discipline, is based on research works structured from epistemological, ontological, praxeological, methodological, ethical and axiological aspects, and also on the scientific and social legitimacy. Another characterization of researchers could be made, based on their particularities and the environments in which they develop their activities. Finally, among the most relevant results, those related to an informative intention, those that try to respond to the social reality of the country and those that are focused on solving organizational or corporative problems in the regions are remarked. **Conclusion.** It is expected that the results obtained from this research work are useful for administration schools because it provides information for making choices related to the topics that can be researched. It is also expected that those results are useful for researchers and academics, because the results will allow them to know the current reality of their line of work and the re-orientation of their research activities. Finally, it is expected to be useful for policy makers such as the National Education Ministry, ICFES and COLCIENCIAS, given the description of the current status of the discipline.

**Key words:** research, knowledge, epistemology, researchers, management

## Introducción

El desarrollo y la evolución de un campo profesional o disciplinar se encuentran estrechamente ligados a las capacidades de la comunidad que lo integra, para generar conocimiento nuevo y para aplicar dicho conocimiento a la solución de problemas que le son propios. La capacidad para generar conocimiento en un campo científico depende, a su vez, de los avances en la concepción y en los métodos de investigación que se correspondan con los fundamentos epistemológicos, praxeológicos y ontológicos de dicho campo del conocimiento.

La Administración es una ciencia social (Colciencias la clasifica entre las ciencias sociales aplicadas) que, por su relativa juventud, no ha terminado de definir su objeto, sus teorías propias y sus métodos para investigar, y corresponde a la comunidad académica fomentar este tipo de debates. A esta necesidad se suma la de conocer por parte de esta comunidad académica

los avances y desarrollos en términos prácticos de dicha generación del conocimiento: por qué se está investigando, qué se está investigando, quiénes están investigando, cómo se está aplicando ese conocimiento, entre otras cuestiones.

Aunque el conocimiento sobre Administración se puede generar desde muchas disciplinas (Economía, Sociología, Psicología, Derecho, etc.) y por lo tanto desde diversas comunidades académicas, especial interés tiene conocer cómo está ese proceso investigativo en la comunidad de Administración (no necesariamente administradores) que está constituida en su esencia por las facultades o escuelas de administración, comunidad que ha sido cuestionada en el pasado por su interés práctico, lo cual habría afectado intereses intelectuales y académicos<sup>1</sup>, al dejar en manos de otros actores esta generación de conocimiento, y actualmente sigue siendo cuestionada por su interés instrumental-funcional que sobredimensiona algunos métodos y análisis en detrimento de otros (precisamente aquellos que son más propios de las ciencias sociales): “la generación de conocimiento en administración tiene por delante una inmensa tarea disciplinaria y epistemológica: explicar las lógicas organizacionales y rituales administrativas, a partir de los paradigmas ya construidos de las ciencias humanas y sociales, tanto como del pensamiento matemático y la ética”<sup>2</sup>.

Es, pues, necesario conocer las áreas sobre las cuales se está investigando en administración, determinar si estas investigaciones realmente están generando nuevos conocimientos y determinar qué aspectos son los que dinamizan o entorpecen el desarrollo de esta labor investigativa. También es pertinente y necesario establecer el papel que las diferentes facultades de administración están desempeñando en el desarrollo de dichas investigaciones, pues dependiendo de las intencionalidades de estas facultades, el carácter investigativo es totalmente diferente en una u otra universidad.

## Materiales y métodos

La investigación fue realizada siguiendo un esquema definido desde su estructura inicial, que plantea varias fases en su desarrollo, tal como se explicita en el libro *La investigación en administración en Colombia*, sobre el cual se basó este artículo. Dicho esquema es el siguiente:

- **Fase descriptiva**

Una vez construido el referente teórico se elaboró un instrumento que permitió recabar información sobre la investigación en las facultades de

administración; se trató de un cuestionario cerrado que, con el mínimo posible de preguntas, permitió obtener información sobre todas las categorías planteadas en el problema: políticas, infraestructura (grupos, sistemas, procesos, investigadores, recursos y redes), proyectos o programas de investigación (campos en los que se investiga, perspectivas teóricas y metodológicas abordadas), producción (tipo de productos, visibilidad de la producción y medios para la difusión) y aplicación del conocimiento generado (uso pedagógico y formativo, aplicación social y aplicación empresarial). Se aplicaron las pruebas de validez y confiabilidad de los instrumentos empleados.

Esta fase se complementó con análisis de información secundaria como la información de los grupos de Colciencias, la producción registrada en revistas indexadas, la documentación que pueda suministrar cada facultad, las memorias y registros de Ascolfa, MEN e ICFES.

Para la obtención de la información de fuentes primarias (decanos, directores de departamentos, de programas y jefes de investigación) se recurrió al apoyo de Ascolfa en sus capítulos para lograr el compromiso de todas las facultades en la respuesta al cuestionario y el suministro de información adicional requerida; este cuestionario se aplicó vía Internet con soporte telefónico. La información de fuentes secundarias se recolectó a través de la web.

- **Fase comprensiva**

Considerando el tipo de información y la naturaleza de esta, que es requerida para responder al objetivo general, se recurrió a un enfoque cualitativo, tanto para obtener la información como para su procesamiento y análisis. Se emplearon dos técnicas: de una parte entrevista abierta sobre la temática, a un grupo de investigadores previamente seleccionado por el equipo de trabajo (con base en la trayectoria, visibilidad y reconocimiento), las entrevistas se grabaron y posteriormente se transcribieron en su totalidad; la segunda técnica se basó en la conformación de grupos foco, organizados en cuatro regiones del país (Medellín, Cali, Bogotá, Barranquilla) con la participación de investigadores de las facultades de la región y con guías de trabajo elaboradas como resultado del marco teórico. Para la interpretación se acudió a técnicas cualitativas como el análisis de contenidos (se utilizaron ayudas como el software Atlas Ti)<sup>3</sup>.

## Resultados

A continuación se describirán los principales resultados que arrojó la investigación en referencia.

- La investigación ha revelado aspectos importantísimos sobre las condiciones personales de los investigadores, cuáles son ideales y esperanzas frente a sus estudios realizados, qué esperan ellos de las diferentes instituciones y cómo la sociedad académica los percibe, de los cuales nos ocuparemos a continuación.
- La investigación realizada ha mostrado que la comunidad de investigadores estudiados presenta una alta heterogeneidad disciplinaria en su formación de pregrado, donde solo el 27,2% de los investigadores en administración tienen su formación base en este campo. Llama la atención el alto número de ingenieros que se han dedicado a investigar en tópicos administrativos, ya que el estudio reveló que el 26,2% de los investigadores en aspectos administrativos, son formados en carreras de ésta índole; por el contrario, investigadores formados en disciplinas de carreras como psicología, filosofía, sociología, derecho y ciencias exactas no tienen una participación predominante en esta comunidad.
- Adicionalmente, la formación en posgrado de los investigadores también llama la atención, ya que el 48% de éstos tienen formación en maestría, no todas con énfasis en investigación (maestría en ciencias), y el 35% tienen formación en doctorado. Esto evidencia que el 83% de los investigadores en administración se han formado para investigar, mientras que un 17% poseen especialización o el pregrado básico.
- Otro aspecto importante en la caracterización del investigador en administración es el que compete al relevo generacional. Al caracterizar a los investigadores por edad, se observó que existe un porcentaje muy pequeño de personas menores de 30 años dedicada a ésta actividad, con un 6,3%, mientras que el 38% de los investigadores se encuentran en el rango de 40 y 49 años. Este aspecto preocupa ya que aparentemente se presentará una brecha muy amplia en la presencia de personas con dedicación a la investigación. Es necesario que las universidades, el Estado y aun la empresa privada evalúen esta situación, pues los modelos de gestión, los postulados administrativos y los procesos de toma de decisiones organizacionales podrán quedarse, en un lapso relativamente corto, sin un sólido apoyo conceptual y académico, lo que podría

generar un estado de no pertinencia de los conceptos estudiados en las diferentes facultades de administración.

Adicionalmente, es una realidad que la localización geográfica de los investigadores se encuentra en relación directa con la ubicación de la institución que apoya su gestión investigativa; por esto no es extraño que regiones como Cundinamarca, con una participación del 38,37%, Valle del Cauca, con un 19,35% y Antioquia, con un 17,24%, lideren en el país con la presencia de investigadores en administración. Esto evidencia una alta concentración de investigadores en una región específica del país, que por razones obvias presenta un a hegemonía en el número de programas de administración.

Se puede percibir que en la mayoría de las universidades se ha implementado un estatuto docente que trata de estimular la acción de los docentes en las actividades investigativas. El estatuto actúa como un apalancador de las acciones investigativas, pues los investigadores ven en éste el respaldo decidido de las universidades. En este estatuto se plasman las políticas particulares de cada universidad, lo cual da seriedad y coherencia a los esfuerzos investigativos.

Uno de los objetivos principales de los estatutos docentes, en sus aspectos normativos sobre la investigación, se refiere a la estructuración de unas políticas claras y estimulantes sobre publicaciones, lo que en la realidad ha motivado a que muchos docentes emprendan la difícil actividad investigativa.

Puede evidenciarse que el estatuto que regula las actividades investigativas en las diferentes universidades es percibido como un elemento que dinamiza las practicas investigativas, generando una sensación de seguridad entre la comunidad de investigadores y, adicionalmente, normatiza la generación de ingresos a los investigadores por su producción como resultado de las diferentes investigaciones. Se ha realizado todo un esfuerzo mancomunado en las facultades para divulgar en los equipos de docentes estos estatutos, y se ha demostrado que por la existencia de estos estatutos, se han estructurado oportunidades académicas y económicas sumamente interesantes para los investigadores.

Evidentemente existe otro elemento muy significativo en cuanto a los estímulos para los investigadores, y es la publicación en revistas altamente clasificadas por Colciencias, ya que adicionalmente al prestigio que de estas se deriva, la remuneración de los investigadores que publican en dichas revistas es mayor.

Un aspecto sumamente importante en la publicación de los resultados de las investigaciones, y que resulta altamente motivador, es la visibilidad que los diferentes medios puedan tener; es decir, los investigadores se motivan mucho a realizar sus publicaciones, a estructurar sus artículos, dependiendo mucho de la forma como estas publicaciones puedan llegar al público, pues desde allí se identifican muchas connotaciones que determinan la calidad del investigador y la calidad de sus producciones. El solo hecho de publicar en un medio altamente reconocido, da estatus y posicionamiento al investigador.

Es indudable que la difusión es el elemento que prima sobre los incentivos, aún sobre los monetarios, y en estas publicaciones los libros juegan un papel sumamente importante; los libros no presentan ningún límite para los investigadores, lo único que puede limitar es el alcance y el contenido académico de estos; por consiguiente se puede determinar que en cuanto a los libros es el investigador quien pone los límites, desde su perspectiva y su alcance académico.

Dentro de la gama de estímulos que se pueden identificar en las diferentes universidades, surge una que ocupa un papel preponderante en el seno de los académicos investigadores, y se refieren a la posibilidad de alcanzar, con un amplio respaldo universitario los títulos de Doctores, en las diferentes disciplinas. Es una realidad que uno de los principales escollos en el proceso de incentivar a los docentes en la actividad investigativa es que no han sido formados para esta actividad, es decir, no han sido formados como investigadores, y cuando se desconoce una disciplina, cuando se desconoce un arte, es muy difícil que se logre sentir pasión éste.

Las diferentes universidades han asumido como política corporativa, la vinculación de docentes con su título de magíster o de doctorado, pues es desde allí donde germina la semilla de la pasión por la investigación; también es un hecho, que por la dificultad de vincular docentes con alguna de las dos formaciones mencionadas, las universidades han asumido la responsabilidad social y académica de formar a sus profesores, logrando compromisos serios y con cronogramas establecidos de formación.

Un elemento que es relevante entre los motivadores a los individuos para que asuman la investigación como un pilar de la academia, es la promoción o la posibilidad de participar en los diferentes eventos nacionales e internacionales que sobre los diferentes temas de investigación se im-

plementen; esto indudablemente tiene que ver con la visibilidad de las investigaciones y de sus resultados, y brinda la posibilidad de posicionar en el medio al investigador y lógicamente, a la respectiva facultad de administración. El conocimiento científico en cualquier área logra avanzar sistemáticamente a medida que los autores, pensadores o investigadores de dicho campo de conocimiento muestran sus productos a la sociedad, y ésta puede de alguna manera apropiarlos después de un proceso de crítica madura y seria.

También existe un elemento sustancial que se presenta como en una restricción a la investigación, y especialmente en administración, y es la carencia de una comunidad investigativa bien conformada, fuerte y que logre unir a todas las facultades de administración o a todos los investigadores, bajo una estructura seria de investigaciones. La existencia de una comunidad fuerte, interinstitucional e interdisciplinaria podría generar el ambiente que se requiere para que prevalezca y se desarrolle una comunidad investigativa motivada, respaldada y unida.

También existe un problema que posiblemente es uno de los que más han retrasado la investigación en administración, y es que desde muchas directivas universitarias se piensa que investigar en este tipo de saberes no requiere presupuesto, o requiere de un presupuesto muy pequeño, cosa que no es cierta. No solamente la investigación en áreas técnicas requiere de dinero, la investigación en administración es tan costosa como cualquier otra.

## Discusión

Los hallazgos que se han realizado en la presente investigación han permitido elaborar un perfil estructurado del investigador en administración, el cual se evidencia bajo las siguientes determinaciones, las cuales se tomarán textualmente del libro *La investigación en administración en Colombia*, el cual surgió como resultado de la investigación citada, en el cual se participó como coautor. Aprovechando las percepciones de los investigadores sobre visibilidad, impacto de sus resultados, rol del investigador y características de sus investigaciones reportadas en la encuesta (que se aplicó en la investigación), se construyó un perfil del investigador colombiano en administración empleando el método del análisis de conglomerados. La investigación permite identificar dos perfiles del investigador de acuerdo con las características antes mencionadas.

El perfil uno constituido por el 62% de los investigadores encuestados caracteriza a investigadores con predominio en el trabajo colectivo, en la conformación de grupos de trabajo interdisciplinarios y la participación en redes de investigación; también se caracterizan porque desde la formulación del proyecto vinculan a las fuentes y usuarios de la investigación, participan en mayor medida en convocatorias, realizan combinación de metodologías de investigación para formular los proyectos, dan prioridad al momento de la formulación a proyectos que puedan lograr aportes disciplinares; son investigadores que privilegian proyectos que generen nuevo conocimiento global sobre el tema, sean pertinentes socialmente y den solución a problemas organizacionales o empresariales. Además, impulsan semilleros, seminarios de investigadores y forman jóvenes investigadores, fomentan la investigación a partir de la tutoría de tesis doctorales y maestrías científicas. Asimismo, se caracterizan porque los resultados de sus investigaciones resuelven necesidades sociales, son utilizados para mejorar las actividades de docencia, extensión universitaria y para la formulación de nuevos programas académicos.

El perfil dos, constituido por el 38% de los investigadores encuestados, caracteriza a investigadores con predominio en el trabajo individual; en el momento de formular e implementar proyectos de investigación les es indiferente vincular usuarios de la investigación, realizan trabajos de investigación empíricos y tienen baja participación en convocatorias de proyectos de investigación. Adicionalmente, al momento de formular proyectos de investigación no se da preponderancia a los aportes disciplinares que se puedan lograr, a la generación del conocimiento y a la pertinencia social del proyecto, no fortalecen las actividades de formación de investigadores dentro de sus facultades. De igual forma, se caracterizan porque los resultados de sus investigaciones mejoran las actividades de docencia y extensión universitarias, pero éstos no tienen el alcance de resolver necesidades sociales y de formular nuevos programas académicos.

Como a todos los investigadores, la divulgación de sus investigaciones es algo que preocupa mucho en temas administrativos, y por consiguiente la investigación en referencia arrojó planteamientos muy interesantes al respecto, los cuales se sintetizan en las siguientes líneas:

El conocimiento científico en cualquier área logra avanzar sistemáticamente a medida que los autores, pensadores o investigadores de dicho

campo de conocimiento muestran sus productos a la sociedad, y ésta puede de alguna manera apropiarlos después de un proceso de crítica madura y seria.

Cada comunidad científica tiene sus propios espacios de divulgación, sus propios mecanismos de inserción del conocimiento, sus propios mecanismos de crítica y una manera especial de debatir su cotidianidad científica, pero es innegable que a pesar de ello, existen unos sistemas más integradores, más globales, más universales y neutros que demarcan procesos y productos a todas las comunidad científica, de tal manera que estas directrices permitan que todos los actores del conocimiento científico puedan actuar en forma parametrizada, es decir, que todos cuenten con los mismos medios y recursos de visibilidad de los resultados de sus investigaciones. En los recientes años se ha venido propiciando un esquema que privilegia la evaluación de la actividad científica, acción esta que ha trascendido la estructura académico- investigadora, en el afán de tener elementos para una rendición de cuentas a la sociedad, la misma que provee los recursos<sup>4</sup>. Los mecanismos de control que se pueden establecer hacia esta comunidad científica son de dos tipos: uno a través de una comunidad de expertos (pares académicos), quienes emiten sus juicios dentro de determinados criterios; y dos, a través de técnicas cuantitativas como la bibliometría<sup>5</sup>.

Colciencias, como el ente regulador de la investigación en Colombia y como generador de políticas de I+D+I, ha establecido algunos mecanismos que permiten que las investigaciones se visibilicen; entre estas se pueden citar las siguientes tres categorías que son de interés para la presente investigación: productos de nuevo conocimiento, productos de formación, productos de divulgación, circulación y uso<sup>6</sup>.

El primer grupo caracteriza a aquellos investigadores que están generando producción científica, tecnológica o de innovación; se considera visible si tiene productos como artículos de investigación, libros de investigación, capítulos de libros de investigación, productos o procesos tecnológicos patentados o registrados, productos o procesos tecnológicos usualmente no patentables o registrables, normas sociales, ambientales, de salud pública, basadas en resultados de investigación del grupo, empresas de origen universitario o empresarial generadas en un grupo I+D “spin off”.

El segundo grupo, producto de formación, se caracteriza por la manera como el investigador potencia la formación de capital intelectual; se con-

sidera visible el grupo si tiene los siguientes productos: tesis de doctorado y de maestría, trabajos de grado, apoyo a la creación de programa doctoral o de maestría, o apoyo a la creación de curso en un programa doctoral o de maestría.

El tercer grupo, productos de divulgación o extensión, orientados a la apropiación social del conocimiento. Allí se pueden incluir productos como: servicios técnicos, consultorías, cursos de extensión, productos de divulgación, cartillas, pósters, ponencias en eventos, literatura de circulación restringida, reportes internos, o textos.

Es necesario abandonar la idea de que el conocimiento existe de manera independiente de la sociedad en que circula, y examinar con más cuidado los procesos de comunicación o de comprensión pública de la ciencia que asumen que el significado del conocimiento existe antes de su uso. La sociología de la ciencia ha sabido mostrar cómo los contextos de descubrimiento o producción de conocimiento y los de legitimación o comunicación del mismo son inseparables<sup>7</sup>. De hecho, es en la interacción social de múltiples actores donde el conocimiento adquiere sentido.

La producción del conocimiento no es un problema que se pueda separar de los mecanismos para su divulgación, y la apropiación pública de la ciencia no puede ser entendida como un suplemento o actividad posterior y diferenciable de la producción misma de conocimiento. Podría decirse que la apropiación del conocimiento se inicia desde los mismos espacios donde desarrollan su trabajo los diferentes grupos de investigación, mediante seminarios de investigación o la misma conversación entre los pares. Londoño<sup>8</sup> afirma que este proceso “deriva finalmente a manera de un sedimento, en uno de los resultados hoy día de mayor reconocimiento del quehacer investigativo, el registro escrito del conocimiento en el formato definitivo de los libros y de los artículos que circulan anualmente en cientos de revistas y memorias de eventos”. Luego dicho conocimiento deberá llegar a la sociedad y ser apropiado para cobrar algún valor.

Es interesante ver también cómo la dinámica de los grupos de investigación, en especial los de alto reconocimiento, genera medios para apropiar socialmente el conocimiento. A partir de sus procesos de interacción y revitalización en los que participan diferentes personas e instituciones (estudiantes de posgrado, visitantes ocasionales, coinvestigadores, instituciones cofinanciadoras de proyectos) se propician espacios para la apropiación

social del mismo, pues, como encontró Londoño “de hecho, parece ser que la renovación reiterada de sus integrantes es un elemento clave para garantizar el éxito de los mismos”.

Vale la pena recordar que conocimiento que no se divulga no existe y conocimiento que no se aplica en beneficio de la sociedad carece de sentido social. Aquí cumplen un papel fundamental las universidades, pues al entrañar ellas múltiples fuentes y procesos de investigación tienen un importante papel al momento de formular e implementar estrategias para la apropiación social del conocimiento y sus múltiples matices y acepciones, por ejemplo, elementos de gestión estratégica de la investigación, retribución al entorno de los elementos construidos en su interior, usuarios internos y externos o el debate entre lo público y lo privado<sup>9</sup>.

La interacción mencionada implica que la universidad no es la única responsable por la apropiación social del conocimiento, sino que corresponde a procesos compartidos y por ello “... tanto la universidad como los diferentes sectores y actores de la sociedad, deben emprender de manera bidireccional y bilateral procesos de comunicación e interrelación”. Para abordar la visibilidad y la socialización del conocimiento producido en administración se debe considerar que para apropiarse primero se necesita transferir el conocimiento.

## Conclusiones

La investigación realizada ha mostrado en forma contundente lo que está sucediendo en los procesos investigativos en las diferentes facultades de administración en Colombia, y ha logrado tipificar un actuar que se encuentra plasmado de realidades, particularidades e imaginarios, que han definido una senda por la cual los investigadores han optado y las universidades han trazado su curso de acción, imprimiendo un carácter particular, el cual define la calidad de la investigación en todos sus aspectos.

Fue sumamente interesante para la presente investigación indagar, de una parte, sobre los sistemas de investigación de las universidades e identificar las políticas e infraestructuras de las diferentes facultades de administración, definiendo la estructura organizativa, el fomento a grupos y proyectos de investigación y la capacidad de financiación de las mismas, pues es desde la definición de estos aspectos desde donde se establece una política seria y acertada sobre investigación.

Un aspecto de gran relevancia fue la identificación de la forma como las diferentes facultades de administración asumen los procesos de visibilidad de las diferentes investigaciones, y de sus respectivos productos (artículos, ponencias, libros, etc.), pues al parecer los medios que en la actualidad se utilizan carecen de fuerza e impacto en el ámbito académico e investigativo, pues no es relevante ni genérico el impacto que se logra, con productos de altísima calidad y de gran innovación que nuestros investigadores generan; evidentemente este aspecto se traduce como un elemento que desanima el espíritu investigativo y que anima a los investigadores a buscar medios de visibilidad de alto reconocimiento científico en otros países. En cuanto a la rigurosidad para determinar la legitimidad científica, la investigación nos presentó los criterios académicos para la asignación de recursos para la investigación, la forma como se conciben en el seno de cada facultad y la manera como son entregados a cada grupo de investigación para desarrollar sus diferentes proyectos.

Para analizar la pertinencia social, la presente investigación indagó sobre la participación del sector productivo y social en la formulación de proyectos, la forma como se obtienen recursos externos, los mecanismos de transferencia del conocimiento producido, así como los aportes que han hecho las respectivas facultades para la solución de problemas sociales, económicos o productivos a partir de sus procesos investigativos. Pero más importante aún, para evaluar el uso dado a los resultados de las investigaciones, es necesario indagar las aplicaciones de sus productos en el desarrollo de las demás funciones académicas (docencia y extensión), la formación y promoción de sus talentos, la aplicación a solución de problemas regionales o nacionales de diversa índole, y por consiguiente tomar medidas que realmente permitan dar fortaleza a este uso, para generar estímulos reales a los investigadores, con una acción de reconocimiento a su labor.

Por último, según lo observado en la teoría se hace pertinente conocer las políticas y acciones para visibilizar y lograr la apropiación de dicho conocimiento tanto por parte de la comunidad científica como por el público en general.

### Referencias bibliográficas

1. DÁVILA LADRÓN DE GUEVARA, Carlos. A propósito de la administración científica. 2 ed. Bogotá: Universidad de los Andes, 1980. 94 p.

2. CRUZ KRONFLY, Fernando. Generar conocimiento es mirar de otro modo. En: Calderón, G. y Castaño, G .A. Investigación en Administración en América Latina: Evolución y resultados. Manizales: Universidad Nacional de Colombia, 2005. p. 35-38.
3. MARTÍNEZ MARTÍN, Miguel. Inteligencia y educación. Barcelona: Editorial Promociones y Publicaciones Universitarias, 1986. 200 p.
4. AGUILLO, Isidro y GRANADINO GOENECHEA, Begoña. Indicadores Web para medir la presencia de las universidades en la red. En: Revista de Universidad y Sociedad del Conocimiento. Abril 2006. Vol. 3, n° 1. p. 67-74.
5. DE FILIPPO, Daniela y FERNÁNDEZ, María Teresa. (1995). Bibliometría: importancia de los indicadores bibliométricos. Buenos Aires: RICYT, 2000. 10 p.
6. COLOMBIA. COLCIENCIAS. Colombia construye y siembra futuro. Política Nacional de Fomento a la Investigación y la Innovación. [En línea]. Bogotá: Colciencias, 2008. [Citado el octubre 17 de 2008] 68 p. Disponible en: <http://www.colciencias.gov.co/portalcol/downloads/archivosContenido/632.pdf>
7. BRANNIGAN, Augustine. The social basis of scientific discoveries. Cambridge: University press, 1981. 269 p.
8. LONDOÑO, Félix. Un análisis sobre la dinámica de los grupos de investigación en Colombia. En: Investigación y Desarrollo. Julio de 2005. Vol. 13, n° 1. p. 184-203.
9. ACEVEDO JARAMILLO, Manuel; et al. Un análisis de la transferencia y apropiación del conocimiento en la investigación de universidades colombianas. Julio de 2005. En: Investigación y Desarrollo. Vol. 13, no. 01. p. 128-157

# Capital natural, funciones ambientales y recurso hídrico en ganadería de leche: una reflexión analítica desde la teoría general de sistemas

Carlos Federico Álvarez Hincapié\*  
Víctor Hugo Borda Yepes\*\*

## Resumen

Este artículo de reflexión presenta elementos metodológicos para analizar, modelar y simular el efecto del recurso hídrico en la producción de ganadería de leche desde el enfoque del capital natural y las funciones ambientales. Se propone analizar una serie de variables a la entrada y salida de un sistema, utilizando como soporte teórico la teoría general de sistemas. Al analizar el sistema, se puede hacer una modelación matemática de diagramas de bloques, los cuales permiten construir un conjunto de ecuaciones. Con este conjunto de ecuaciones se puede proyectar una simulación, al utilizar la investigación de operaciones como herramienta de solución acerca de las funciones ambientales y el recurso hídrico en la producción de ganadería de leche.

**Palabras clave:** capital natural, ganadería de leche, teoría general de sistemas, investigación de operaciones, funciones ambientales, recurso hídrico.

\* M. Sc. Medioambiente y Desarrollo. Docente Corporación Universitaria Lasallista, grupos de investigación GAMA, DELTA. Estudiante doctorado en Ecología, Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, Grupos de investigación G. S. M., GEYMA.

\*\* Especialista en diseño y construcción de equipo agroindustrial. Grupo de Investigación y Transferencia de Tecnología Desarrollo sustentable de sistemas de producción ganadera -DESPROGAN. Universidad Nacional de Colombia, sede Palmira.

## Natural capital, environmental functions and water resources for milk cattle: an analytical reflection from the general systems theory abstract

### Abstract

This reflection article presents methodological elements to analyze, model and simulate the effect of water on the production of milk cattle from a natural capital and environmental functions focus. An analysis of some variables in the input and the output of a system is proposed, using the general systems theory as a theoretical basis. By this analysis, a mathematical model of blocks diagrams can be made, allowing the construction of a set of equations. With this set a simulation can be projected, by the use the operations research as a solution tool concerning the environmental functions and the water for milk cattle's production.

**Key words:** Natural capital, dairy cattle, general systems theory, operations research, environmental functions, water.

### Introducción

El capital natural inmerso en los ecosistemas provee servicios ambientales como el agua para el consumo, la industria, la pesca, la ganadería y la agricultura, a partir del desarrollo de funciones ambientales. Sin embargo, las actividades productivas no planificadas deterioran continuamente la base natural que sustenta estas funciones. Esto hace que los flujos y stocks del capital natural se vean disminuidos, poniendo en entredicho no solo la permanencia de las actividades productivas humanas, sino también la de la propia naturaleza. Hacemos referencia a la planificación como el proceso de toma de decisiones que integra diferentes variables (a más de las económicas), que revisa el contexto y la historia, y que se orienta a la sustentabilidad a largo plazo.

Por ejemplo, en la producción ganadera lechera, la decisión de deforestar un área para el establecimiento de pasturas puede fundamentarse económicamente para el aumento del hato productivo. Sin embargo, no con-

siderar las potenciales afectaciones al recurso hídrico debido a los cambios en las coberturas vegetales y el efecto en las condiciones micro climáticas o por la contaminación asociada a la aplicación desmedida de fertilizantes orgánicos (como la porquinasa) a las pasturas, se considera como una actividad no planificada.

En el contexto del crecimiento exponencial de la población humana y del cambio climático, es cada vez más imprescindible identificar las múltiples funciones de los ecosistemas (incluyendo la provisión de agua con características específicas de calidad asociada a contextos particulares y a usos determinados), para el reconocimiento del capital natural, de su estado y evolución.

El capital natural fue definido por Costanza y Daly<sup>1</sup> como el stock que genera un flujo de bienes y servicios útiles o renta natural. Sin embargo, Gómez-Baggethun y De Groot<sup>2</sup> señalan que el capital natural, además del stock de componentes (estructura del ecosistema), incluye los procesos e interacciones entre los mismos (funcionamiento del ecosistema), lo que determina su integridad y resiliencia ecológica. Por su parte, Aaronson, et al<sup>3</sup>. indican que el concepto de “capital natural” es una metáfora económica asociada a las reservas (“stock”) de recursos naturales y físicos consistentes en el capital natural renovable (especies y ecosistemas), en el capital natural no renovable (componentes del subsuelo como petróleo, carbón y diamantes), el capital natural reponible (como la atmósfera, el agua potable, los suelos fértiles) y el capital natural cultivado (como los cultivos y las plantaciones). La evaluación del capital natural debe desarrollarse a partir de medidas físicas, aun cuando la valoración monetaria y los mecanismos de mercado pueden ser útiles para determinar qué tanto y qué áreas del capital natural se deben restaurar de forma óptima y deseable<sup>4</sup>.

En esta reflexión presentamos inicialmente el concepto de capital natural y su relevancia para la producción ganadera, enfatizando en la importancia del recurso hídrico. Luego se introduce la teoría general de sistemas, los diagramas de bloques y la investigación de operaciones, como herramientas potenciales para abordar los sistemas productivos ganaderos. Finalmente, se esbozan líneas de trabajo futuras. En síntesis, se trata de una presentación conceptual que explora el análisis de componentes ambientales asociados al capital natural en relación con un sistema productivo. Los elementos esbozados en este artículo serán desarrollados en un caso práctico que se presentará en una futura publicación.

## Capital natural y producción ganadera

La producción ganadera requiere de funciones, bienes y servicios ambientales para su desarrollo, partiendo de los terrenos (sustrato) donde se implementa esta actividad. El establecimiento de pasturas de calidad para sostener los sistemas productivos asociados a la ganadería lechera implica la inversión en capital humano a partir de la transformación de hábitats naturales como los bosques de montaña, proceso que en Colombia es de vieja data. De hecho, en la zona andina se señaló, para el 2005, que el 62,31% de la región estaba dominado por ecosistemas transformados<sup>5</sup>. La toma de decisiones antrópicas sobre el territorio es pues la fuerza determinante sobre la provisión y flujos de capital natural en los agroecosistemas constituidos, lo cual influye en el desarrollo de las funciones ecosistémicas y sus productos para el sostenimiento de la vida. La figura 1 muestra una síntesis convencional de los factores de producción asociados a la ganadería de leche.

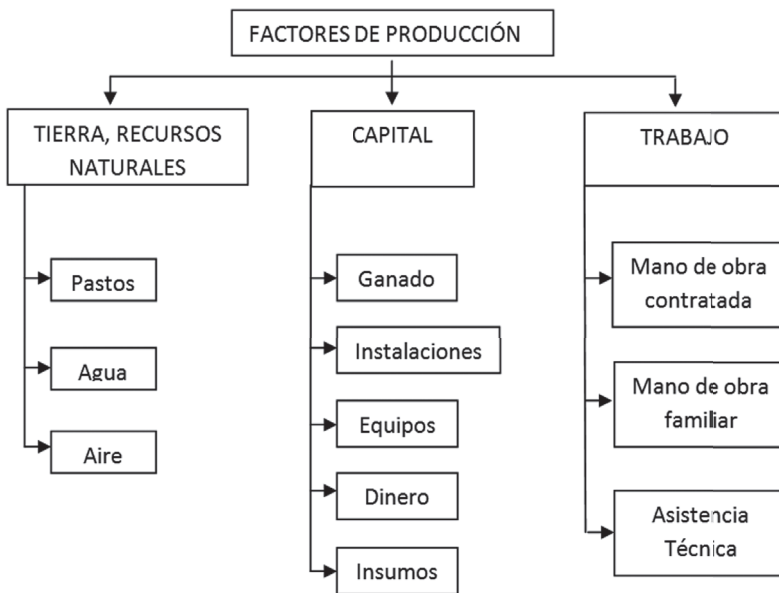


Figura 1. Factores de producción asociados a la producción lechera<sup>6</sup>.

Los procesos asociados a estos sistemas requieren considerables volúmenes de recurso hídrico, que adicionalmente debe tener unas condiciones de

calidad específicas para las diferentes actividades (incluyendo la limpieza de instalaciones, equipos y tanques, así como para la provisión de agua para el ganado). Esta puede verse afectada por la aplicación de fertilizantes orgánicos e inorgánicos, así como por las afectaciones a los cauces naturales y zonas de origen del recurso.

Ahora bien, una complejidad inherente a estos sistemas se asocia con su contexto, el cual incluye actividades como la aplicación de pesticidas y fertilizantes para cultivos como la papa y el tomate de árbol, así como la toma de decisiones humanas sobre los ciclos de transformación y uso del territorio. Igualmente, recibe impactos, producto de vertimientos humanos como combustibles o residuos domésticos. Los otros sistemas productivos que requieren y afectan a la vez el recurso hídrico imprimen, a su vez, una complejidad adicional a la comprensión y manejo de los entornos asociados a la producción ganadera.

### **Teoría general de sistemas y ganadería**

El capital natural nos lleva afrontar múltiples elementos e interacciones en la ganadería, por ejemplo, el recurso agua, el recurso suelo y el recurso humano. De ahí que sea necesario abordar una comprensión general de este sistema productivo a partir de la manera como los elementos se relacionan a través de funciones que generan unos bienes y servicios de uso humano, y de funciones que utilizan y modifican los ecosistemas. Por tal razón, una manera de entender la productividad ganadera partiendo de la identificación del capital natural es por medio de la teoría general de sistemas que nos permite tomar elementos de los recursos considerados para la producción ganadera, y tratar de encontrar qué tipo de relación matemática, física, química, biológica, psicológica o sociológica se presenta entre los elementos del sistema<sup>7</sup>.

En el contexto de la teoría general de los sistemas para la producción ganadera, se seleccionaron elementos que son repetitivos en la producción y que hacen parte de los diferentes recursos mencionados anteriormente. En este sistema se identificaron los elementos (a ser considerados como señales del sistema): toma de decisiones antrópicas, fuentes de agua y calidad de agua; y las relaciones: paisaje y ambiente. La teoría general de sistemas permite desarrollar modelos abstractos de la realidad (“máquinas no triviales”, con interacciones y componentes complejos), partiendo de la noción de “máquina trivial”, donde es posible relacionar las entradas y las salidas

del sistema a través de funciones<sup>8</sup>. Esto puede apreciarse en la figura 2, la cual expresa el ecosistema producción ganadera como función, la toma de decisiones antrópicas como entrada y la calidad de agua como salida.

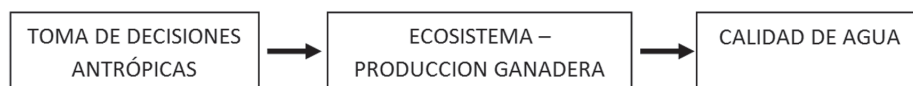


Figura 2. Sistema para la toma de decisiones antrópicas sobre la calidad de agua en la producción ganadera.

Fuente: construcción propia

En el sistema de la figura 2, se presenta de manera lógica que la toma de decisiones antrópicas sobre el ecosistema permite predecir una calidad de agua (en contexto con condiciones antrópicas y naturales acotadas). De esta forma, se pueden buscar herramientas matemáticas de modelación y simulación, que permitan entender cómo es la relación toma de decisiones antrópicas y calidad de agua en el ecosistema. Es importante anotar que el bloque general de la figura 2 es una síntesis de varios bloques en el sistema de producción ganadera. En cuanto a la cuantificación del capital natural, es posible emplear diferentes herramientas, tanto desde la valoración económica convencional, como desde la economía ecológica. Por ejemplo, es posible evaluar los cambios a través del tiempo de las coberturas vegetales (empleando sistemas de información geográfica), como un elemento subrogado de las dinámicas del capital natural. La evaluación de la transformación de las coberturas naturales puede desarrollarse desde el punto de vista biofísico (cambios de área), reconociendo el valor de restauración de las mismas, para obtener una línea base del valor del capital natural.

## Diagramas de bloque y sistema de producción

Una de las herramientas matemáticas que se puede utilizar para resolver el sistema de producción ganadera son los diagramas de bloques, los cuales presentan, a través de un formato de bloque, los efectos producidos por unas causas, que se pueden describir a través de herramientas matemáticas que relacionan causa-efecto por medio de funciones de transferencia. Además, el diagrama de bloques permite incluir influencias externas que no son causas y se pueden denominar perturbaciones que transforman las funciones de transferencia<sup>9</sup>.

El sistema de producción ganadera desarrollado por medio de los diagramas de bloques nos permite relacionar los elementos: toma de decisiones antrópicas, fuentes de agua y calidad de agua, utilizando como función de transferencia el paisaje y el ambiente, donde la toma de decisiones antrópicas transforma el paisaje, y causa un efecto sobre las fuentes de agua. Las fuentes de agua se transforman por las condiciones del ambiente en el cual están inmersas, generando una calidad de agua para la producción ganadera (así como para otros usos). Entonces, la calidad de agua estará definida por la toma de decisiones antrópicas sobre los ecosistemas (aprovechando el capital natural de los recursos suelo y agua). A manera de ejemplo, esto se puede apreciar en la figura 3.

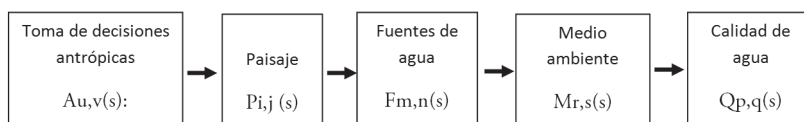


Figura 3. Diagrama de bloques sobre la producción ganadera, el paisaje y la calidad de agua.

Fuente: construcción propia

En síntesis, los diagramas de bloques permiten cuantificar el capital natural de los ecosistemas que son intervenidos por la actividad humana, la cual se desarrolla para generar bienes y servicios en la producción ganadera. Ahora, para resolver los diagramas de bloques, se necesita de un operador matemático que permita interpretar los valores obtenidos en el sistema de producción ganadera, lo que se explora en el siguiente apartado.

### Investigación de operaciones y sistema ganadero

Un operador que permite una solución matemática a los diagramas de bloques es la investigación de operaciones; con ella se puede investigar cómo se desarrollan las operaciones de los sistemas, qué tipo de soluciones matemáticas se pueden dar en la solución del sistema y qué operación permite realizar una interpretación aproximada a los resultados obtenidos en el sistema a través de su expresión matemática y dimensionalidad<sup>10</sup>.

Al aplicar la investigación de operaciones al sistema de producción ganadera, se obtiene una solución de ecuaciones que pueden tener el formato lineal o no lineal, estocástico o no estocástico, determinístico o aleatorio,

entre otros. Por estas razones, se pueden resolver las ecuaciones del sistema de producción ganadera combinando las diferentes formas matemáticas mencionadas. Una primera aproximación a la solución de ecuaciones del sistema de producción ganadera es acotarlo por medio de criterios: interpretación del número puro, dimensionalidad de número, relación con las funciones de transferencia paisaje y medioambiente. Por tal razón, se plantea un modelo dinámico entre la toma de decisiones antrópicas y la calidad de agua, que permita encontrar señales que muestren el efecto sobre dicha calidad en un sistema ganadero manejado por decisiones antrópicas sobre las fuentes hídricas y su entorno.

A partir de la figura 3, se puede describir el diagrama de bloques a través de ecuaciones (1) asociadas al sistema producción ganadera, con asignaciones de variables que se refieren a la evaluación del capital natural en un ecosistema intervenido por el hombre para generar unos bienes y servicios de producción. Por ejemplo:

$$A_{u,v}(s) \times P_{i,j}(s) \rightarrow F_{m,n}(s)$$

$$F_{m,n}(s) \times M_{r,s}(s) \rightarrow Q_{p,q}(s)$$

Donde:  $A_{u,v}(s)$ : Variable causa toma de decisiones antrópicas  $u,v$ ;  $F_{m,n}(s)$ : Variable causa fuentes de agua de procedencia  $m,n$ ;  $P_{i,j}(s)$ : Función de transferencia paisaje de procedencia  $i,j$ ;  $M_{r,s}(s)$ : Función de transferencia medio ambiente con procedencias  $r,s$ ;  $Q_{p,q}(s)$ : Variable efecto calidad del agua de procedencia  $p,q$ ;  $(s)$ : Término de temporalidad de las variables y funciones. Se recalca que esta es solo una de las posibles ecuaciones/funciones matemáticas a ser exploradas para la solución analítica del problema.

### Conclusiones: líneas de trabajo futuras

El concepto de capital natural es una herramienta poderosa para avanzar operativamente hacia la construcción de sustentabilidad, en donde la teoría general de sistemas puede aportar un marco de trabajo para el reconocimiento de los componentes e interacciones asociados al funcionamiento de la naturaleza y de los impactos de las actividades productivas (como la ganadería de leche), sobre el capital natural que permite el funcionamiento de la vida y de las actividades humanas.

El uso de herramientas como los diagramas de bloques y la investigación de operaciones puede resultar de utilidad para el análisis y modelamiento

del comportamiento de los sistemas productivos asociados a los ecosistemas naturales. El análisis de diferentes tipos de diagramas de bloques, con el desarrollo de modelos con diferentes asunciones, es un área de trabajo de interés para el estudio de los ecosistemas y agroecosistemas. Igualmente, es necesario avanzar en la construcción de modelos espacialmente explícitos, donde se pueda evaluar el comportamiento del capital natural en la forma de funciones, bienes y servicios ambientales en localidades con características específicas. Asimismo, se requiere del trabajo interdisciplinario para abordar holísticamente estos y otros sistemas productivos complejos, que dependen del ambiente para su desarrollo.

El conocimiento de información primaria asociada al comportamiento de los sistemas ecológicos y agroecológicos, así como el desarrollo de experimentos de campo (que permitan comprender mejor las interacciones, componentes y límites de los sistemas), se hace necesario para aportar a la toma de decisiones de manejo orientadas hacia la sustentabilidad.

## Agradecimientos

A la Corporación Universitaria Lasallista, por la financiación del proyecto CAA20+Ing (convocatoria interna de investigación 2008-2009) y a los estudiantes que participaron en el proceso de investigación. A Lina María Berrouet, Bernardo León Hoyos, Blanca Cardona, Claudia Cruz y a los revisores anónimos por sus aportes.

## Referencias bibliográficas

1. COSTANZA, Robert y DALY, Herman. Natural Capital and Sustainable Development. En: *Conservation Biology*. 1992. Vol. 6. p. 37-46.
2. GÓMEZ-BAGGETHUN, Erik y DE GROOT, Rudolf. Capital natural y funciones de los ecosistemas. Explorando las bases ecológicas de la economía. En: *Ecosistemas*, 2007. Vol. 16, no. 3. p. 4-14.
3. ARONSON, James; MILTON, Suzanne J. y BLIGNAUT, James N. Restoring natural capital: definitions and rationale. En: ARONSON, James; MILTON, Suzanne J. y BLIGNAUT, James N (Eds.) *Restoring natural capital. Science, business and practice*. Society for Ecological Restoration Internacional. Washington D.C. : Island Press, 2007. p. 3-8.
4. FARLEY, Joshua y BROWN, Erica J. Restoring natural capital: an ecological economics assessment. En: ARONSON, James; MILTON, Suzanne J. y BLIGNAUT, James N (Eds.) *Restoring natural capital. Science, business and practice*. Society for Ecological Restoration Internacional. Washington D.C.: Island Press, 2007. 17-27.

5. ROMERO, Milton; CABRERA, Edersson y ORTIZ, Néstor. Informe sobre el estado de la biodiversidad en Colombia 2006-2007. Bogotá D. C., Colombia: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt, 2008. p. 78.
6. MUÑOZ CORREA, Edgar. Fincas lecheras competitivas. En: Despertar lechero. 2003. No. 21. p. 125-144.
7. VON BERTALANFFY, Ludwig. Teoría general de los sistemas. Fundamentos, desarrollo, aplicaciones. México: Fondo de Cultura Económica, 2006. 37 p.
8. VON FOERSTER, Heinz. Sistémica elemental. Medellín, Colombia. Fondo editorial Universidad EAFIT, 2007. 81 p.
9. UMEZ-ERONINI, Eronini. Dinámica de sistemas y control. México: Internacional Thomson Control. 2001, p. 3-28.
10. HILLIER, Frederick y LIEBERMAN, Gerald J. Introducción a la Investigación de operaciones. 3ª Ed. México: McGraw-Hill, 1982. p. 1-13.

# Composición de la leche de cabra y factores nutricionales que afectan el contenido de sus componentes\*

Oswaldo Bedoya Mejía\*\*

Ricardo Rosero Noguera\*\*\*

Sandra L. Posada\*\*\*\*

## Resumen

La composición nutricional de la leche caprina difiere de las otras especies y se caracteriza por sus altos tenores de grasa y proteína, así como por su mayor digestibilidad, sin embargo, la calidad composicional de la leche no sólo depende de la especie o de la raza de los animales, sino que también se ve influenciada en gran medida por el tipo de dieta que se les suministra; en este sentido la cantidad y tipo de fibra, el nivel de proteína, el tamaño de partícula, la adición de grasas o aceites vegetales y la relación forraje-concentrado son los principales actores que intervienen a escala nutricional sobre la producción y calidad de la leche. No obstante, se ha observado en diversas investigaciones que los caprinos son menos susceptibles que los bovinos a los factores antes mencionados, y que son más eficientes en la conversión del alimento y su utilización para producción láctea.

**Palabras clave:** Composición, nutrición, producción.

Goat milk's composition and nutrition factors that affect the contents of its components

## Abstract

The nutritional composition of goat's milk is different from those of other species and it is characterized by its

\* Esta revisión hace parte del marco teórico para el proyecto "Utilización de recursos forrajeros frescos y ensilados, y su impacto sobre la industria láctea caprina" financiado por el Ministerio de Agricultura y desarrollo rural, ASOCABRA y la Universidad de Antioquia.

\*\* Industrial Pecuario, Magíster en Ciencias Animales. Docente Corporación Universitaria Lasallista. Grupo de investigación en producción, desarrollo y transformación agropecuaria y Grupo GRICA de la Universidad de Antioquia. Facultad de Ciencias Agrarias.

\*\*\* Zootecnista MS, PhD. Docente de la Universidad de Antioquia. Grupo GRICA de la Universidad de Antioquia. Facultad de Ciencias Agrarias.

\*\*\*\* Zootecnista MS, (c) PhD. Docente de la Universidad de Antioquia. Grupo GRICA de la Universidad de Antioquia. Facultad de Ciencias Agrarias.

high fat and protein contents, and also by its higher digestibility. However, its compositional quality not only depends on the species or the breed, but is also highly influenced by the diet used on the animals. Under these terms, the quantity and type of fiber, the protein level, the addition of fat or vegetable oils and the forage-concentrate ratio are the most important factors that nutritionally intervene on the milk's production and quality. It has been observed in several research works, however, that goats are less susceptible than cattle to those factors and they are also more efficient in the food conversion and its use for milk's production.

**Key words:** Goat, milk, fat, protein, fiber, production.

## Introducción

Los sistemas de producción caprinos en Colombia se encuentran generalmente en manos de pequeños productores que manejan de forma tradicional los apriscos, lo cual se ve reflejado finalmente en la productividad y competitividad del sector caprino en nuestro país. En este sentido es importante aclarar que uno de los puntos de mayor relevancia en la productividad de cualquier sistema pecuario es la alimentación, ya que el manejo nutricional puede ayudar a mejorar la composición de la leche con efectos verificables en un corto período de tiempo, aumentando o disminuyendo la concentración de los principales componentes de la leche y generando un aumento en la calidad del producto, y por ende, un avance en la rentabilidad del sistema<sup>1</sup>.

La composición de la leche de cabra difiere en ciertos aspectos fundamentales de las demás leches de origen pecuario; sin embargo, los niveles de producción y el grado de tecnificación del sector caprinocultor, así como la pobre cultura de consumo de sus productos, no han permitido un desarrollo significativo de la industria láctea caprina; no obstante, es necesario conocer la composición básica de la leche de cabra y los factores nutricionales que tienen mayor impacto sobre ésta, con el fin de identificar posibles estrategias en la alimentación del ganado caprino que permitan la toma de decisiones oportunas para favorecer la productividad y la eficiencia de los apriscos.

En este sentido, la cantidad y tipo de fibra, el consumo de materia seca, el nivel de proteína en la dieta, el tipo de suplementación, la selectividad, el nivel energético de la dieta, el tamaño de partícula y las características

organolépticas del alimento son los principales factores nutricionales involucrados en la producción y composición de la leche<sup>2-4</sup>.

El objetivo de este trabajo es discutir diferentes aspectos nutricionales relacionados con la producción y composición de la leche de cabra.

## Composición de la leche de cabra

El conocimiento de los componentes de la leche de cabra es fundamental para el desarrollo de la industria caprina, ya que finalmente de la calidad nutricional que tenga el producto, dependerán en gran medida el rendimiento, la productividad y la aceptación por parte del consumidor.

La composición de la leche de cabra es diferente a la del ganado ovino, bovino y a la leche humana (tabla 1), pero puede variar por múltiples factores, entre ellos, tipo de alimentación, medioambiente, manejo, sistema productivo, etapa de lactancia e, inclusive, estado sanitario de los animales<sup>5</sup>. Sin embargo, el estudio de cada componente y el conocimiento de los valores promedio de cada uno de ellos permiten una mejor comprensión alrededor de la producción de leche caprina.

Tabla 1. Composición promedio de los nutrientes básicos en leche de cabra, oveja, vaca

Composición	Cabra	Oveja	Vaca	Humana
Grasa %	3.8	7.9	3.6	4
Sólidos no Grasos %	8.9	12	9	8.9
Lactosa %	4.1	4.9	4.7	6.9
Proteína %	3.4	6.2	3.2	1.2
Caseína %	2.4	4.2	2.6	0.4
Albumina, globulina %	0.6	1	0.6	0.7
N no proteico %	0.4	0.8	0.2	0.5
Cenizas %	0.8	0.9	0.7	0.3
Calorías/100 ml	70	105	69	68

Fuente: Park (2006)

## Lactosa y oligosacáridos

Al igual que en la leche de las hembras bovinas y ovinas, la lactosa es el mayor carbohidrato presente en la leche de cabra, y su valor promedio se encuentra en el orden del 4.1%, menor que el valor reportado en bo-

vinos, que puede estar por el 4.7%<sup>6</sup>. La lactosa es sintetizada a partir de glucosa en la glándula mamaria con la participación activa de la proteína -lactoalbúmina y favorece la absorción intestinal de calcio, magnesio y fósforo, y la utilización de la vitamina D. Sin embargo, la importancia de este carbohidrato radica en el mantenimiento del equilibrio osmótico entre el torrente sanguíneo y las células alveolares de la glándula mamaria durante la síntesis de la leche, razón por la cual es un componente que varía según el nivel de producción láctea y no por efecto directo del tipo de dieta suministrada<sup>7</sup>.

Por otro lado, los oligosacáridos de la leche caprina, al igual que la lactosa, fueron recientemente reportados<sup>8</sup> al encontrar que las cantidades de oligosacáridos que están presentes en la leche de caprinos fluctúan en un rango de 250 a 300 mg/L, lo cual representa 4 ó 5 veces más que los valores encontrados en la leche de vaca, pero menos que los presentes en la leche humana. (tabla 2).

Tabla 2. Cantidad total de oligosacáridos y lactosa en leche de cabra, vaca, oveja y humana

Origen	Oligosacáridos (g/L)	Lactosa (g/L)
Leche caprina	0.25 - 0.30	45
Leche bovina	0.03 - 0.06	46
Leche ovina	0.02 - 0.04	48
Leche humana	0.5-0.8	68

Fuente: Martínez Ferez *et al.*, (2004).

### Proteína de la leche de cabra

La leche contiene cientos de tipos de proteínas, la mayoría de ellas en muy pequeñas cantidades. Estas pueden ser clasificadas de varias formas, de acuerdo con sus propiedades físicas o químicas, así como también con sus funciones biológicas. Entre las principales proteínas presentes en la leche de los mamíferos se encuentran la  $\alpha$ s1-CN,  $\alpha$ s2-CN, B-CN,  $\beta$ -CN y las k-Caseínas, indispensables para el aprovechamiento industrial de los productos lácteos; se encuentran valores promedio de proteína en la leche de cabra de 4,5%, superiores a los valores para ganado bovino (3,3%), pero inferiores a los del ganado ovino (5,8%)<sup>9</sup>. Por otra parte, las inmunoglobulinas presentes en la leche de cabra son muy similares a las observadas en

la leche de vaca, y se encuentran siempre en mayores cantidades durante las fases iniciales de la lactancia, principalmente en el calostro<sup>10</sup>.

### Grasa de la leche de cabra

El componente lipídico es reconocido como el más importante de la leche en términos de costo, de nutrición y de características físicas y sensoriales del producto. Dentro del componente lipídico, los triglicéridos representan cerca del 98%, pero en la leche de cabra también se encuentran algunos lípidos simples como los diacilgliceroles y los ésteres de colesterol, así como fosfolípidos y compuestos liposolubles como los esteroides y el colesterol<sup>11</sup>.

Los lípidos en la leche de cabra se encuentran de manera abundante en forma de glóbulos con un tamaño de menos de 3  $\mu\text{m}$ , lo cual permite una mayor digestibilidad y una mayor eficiencia en el metabolismo lipídico comparado con la leche de vaca<sup>12</sup>; en este sentido la grasa de la leche caprina no contiene aglutinina, que es una proteína encargada de concentrar los glóbulos grasos para generar estructuras más complejas y de mayores dimensiones, y por esta razón los glóbulos permanecen dispersos y pueden ser atacados más fácilmente por las enzimas digestivas<sup>13</sup>.

Adicionalmente, la concentración de los ácidos grasos en la leche de cabra difiere bastante de la leche bovina (tabla 3), lo cual puede impactar positiva o negativamente la calidad del producto. Sobre este aspecto se ha reportado que en la leche de cabra los ácidos grasos libres de cadena corta y media como el C6:0 y el C9:0 son responsables en parte del llamado "Sabor Caprino" que suele ser tan particular en la leche de los pequeños rumiantes, y en el mismo sentido algunos autores afirman que cuando la tasa de lipólisis en la leche es muy alta, en ella puede aparecer un sabor desagradable del cual el ácido butírico C4:0 es directamente responsable<sup>14,15</sup>.

En la actualidad existe un gran interés por aumentar la proporción de ácidos poli insaturados y el ácido linoleico conjugado (CLA) cuyo principal isómero, el ácido ruménico (C18:2 cis9, trans11) con alrededor del 85% de los isómeros, está relacionado con efectos anti-aterogénico, anti-carcinogénico, anti-inflamatorio, inmunoestimulante y de modulación de la resistencia a la insulina. El t10, c12-CLA con alrededor del 2% de los isómeros del CLA, posee propiedades beneficiosas anti-carcinogénicas y anti-obesidad<sup>16</sup>. El método más extendido para aumentar el contenido de

CLA en la leche consiste en añadir aceites o granos oleaginosos ricos en ácidos grasos poliinsaturados (AGPI) a la ración. La cantidad y el tipo de complemento de AGPI influye en el metabolismo lipídico ruminal y en la producción de CLA en la leche. Además, la composición lipídica de la leche de cabra es fundamental para su rendimiento en quesos, para la textura, sabor y olor de los derivados<sup>17,18</sup>.

Tabla 3. Valores Mínimos y Máximos del Contenido de Ácidos Grasos (%) en leche de vaca y cabra.

Ácidos Grasos	Vaca		Cabra	
	MIN	MAX	MIN	MAX
C4:0	2.9	5.3	1.97	2.44
C6:0	1.3	3.2	2.03	2.70
C8:0	1	1.7	2.28	3.04
C10:1	2.1	3.6	0.19	0.38
C12:0	0.2	0.4	3.87	6.18
C14:0	8.5	13	7.71	11.2
C14:1	0.8	1.4	0.17	0.20
C15:0	0.9	1.6	0.46	0.85
C16:0	24.5	31.6	23.2	34.8
C18:0	19	24.01	5.77	13.2
C18:2 (CLA)	1.50	1.52	0.32	1.17

Adaptada de Park (2006).

### Ácido linoleico conjugado

El nombre genérico CLA es un término colectivo que abarca todos los isómeros del ácido linoleico que contienen un doble enlace conjugado con el sistema<sup>19</sup>. El creciente interés por aumentar las concentraciones de CLA en la leche y en otros productos de origen animal se debe principalmente a sus propiedades anti mutagénicas y anti cancerígenas, a su capacidad de generar respuesta inmune a la arteriosclerosis, y a su participación en la prevención de la obesidad y de la diabetes<sup>20</sup>. Estas razones y la percepción que actualmente se tiene de la importancia de una alimentación sana y que ayude a conservar la salud hacen que la presencia de CLA en los productos lácteos genere un valor agregado que los consumidores están dispuestos a asumir<sup>21</sup>.

## Vitaminas y minerales

La leche de cabra, comparada con la leche de vaca, contiene mayor cantidad de vitamina A (2.074 unidades internacionales por litro frente a 1.560), lo cual ocurre debido a que los caprinos convierten todo el caroteno en vitamina A, por lo que resulta una ausencia de caroteno en la leche y, por lo tanto, un color más blanco que el de la leche de vaca, y adicionalmente la leche de cabra es una fuente rica de riboflavina, que actúa como factor de crecimiento, y de niacina, que alcanza hasta un 350% más de niacina que la leche de vaca<sup>22</sup>.

La tabla 4 muestra las cantidades de cada una de las vitaminas presentes en la leche de cabra, comparada contra la leche bovina.

Tabla 4. Contenido de Vitaminas en la leche de cabra y vaca (cantidad en 100 g).

Componente	Cabra	Vaca
Vitamina A (IU)	185	126
Vitamina D (IU)	2.3	2.0
Tiamina (mg)	0.068	0.045
Riboflavina (mg)	0.21	0.16
Niacina (mg)	0.27	0.08
Ácido Pantoténico (mg)	0.31	0.32
Vitamina B6 (mg)	0.046	0.042
Ácido Fólico (g)	1.0	5.0
Biotina (g)	1.5	2.0
Vitamina B12 (g)	0.065	0.357
Vitamina C (mg)	1.29	0.94

Adaptado de Park (2006)

El contenido mineral en la leche de cabra es mayor que en la leche humana; la leche de cabra contiene cerca de 134 mg de Ca y 121 mg de P por cada 100 gr de leche, y puede llegar a presentar hasta un 13% más de calcio que la leche bovina pero no es una buena fuente de otros minerales como hierro, cobalto y magnesio. En la tabla 5 pueden observarse los valores reportados para las cantidades de minerales presentes en la leche de cabra y de vaca.

Tabla 5. Contenido de Minerales en la leche de cabra y vaca (cantidad en 100 gr).

Componente	Cabra	Vaca
Ca (mg)	134	122
P (mg)	121	119
Mg (mg)	16	12
K (mg)	181	152
Na (mg)	41	58
Cl (mg)	150	100
S (mg)	28	32
Fe (mg)	0.07	0.08
Cu (mg)	0.05	0.06
Mn (mg)	0.032	0.02
Zn (mg)	0.56	0.53
I (mg)	0.022	0.021

Fuente: Park (2006)

## Factores nutricionales que afectan la composición de la leche caprina

La composición de la leche es el resultado de varios factores extrínsecos e intrínsecos del animal, entre ellos, el factor nutricional es el de mayor impacto sobre la composición láctea; en este sentido, el consumo de materia seca, los carbohidratos estructurales y no estructurales presentes en la ración, el tamaño de partícula, el uso de aditivos, pro bióticos y suplementos energéticos, así como la interacción entre cada uno de estos elementos son los principales puntos que afectan la composición de la leche en el plano nutricional.

El contenido graso de la leche de cabra es el componente más sensible a los cambios nutricionales en la dieta de los animales; mientras que el contenido proteico, además de ser modificado por la dieta, su mayor efecto depende del componente genético; de igual forma, las concentraciones de lactosa y minerales en la leche son apenas influenciadas directamente por el tipo de dieta. Por lo tanto, el efecto de la dieta sobre la composición de la leche se ve reflejado básicamente en el componente graso, el cual es fundamental para optimizar el rendimiento del producto y mejorar la calidad organoléptica del mismo, de tal forma que se hace indispensable conocer y analizar cada uno de los componentes de la ración que influyen sobre la interacción *alimento-composición láctea*.

## Efecto de la fibra y carbohidratos no estructurales sobre la composición de la leche

Varios autores afirman que cuando se evalúa el efecto de las características físico-químicas del alimento sobre el contenido de la leche caprina, es necesario recalcar que en los rumiantes el modelo de fermentación ruminal depende básicamente de la cantidad y calidad de la fracción fibrosa de la dieta. En este sentido, el suministro de dietas ricas en carbohidratos no estructurales, con inadecuadas relaciones forraje-concentrado o los alimentos fibrosos en forma de pellet, pueden favorecer una disminución en la producción de acetato y butirato en el rumen, de igual forma, la composición química de los diferentes forrajes utilizados para la alimentación caprina tienen un marcado efecto sobre la producción y la composición de la leche<sup>23-25</sup>.

En este sentido, algunos autores evaluaron la producción y composición de la leche de cabras Saanen alimentadas con tres dietas diferentes: heno de alfalfa, silo de maíz y heno de avena; aunque en este trabajo se encontró diferencia significativa ( $P < 0,05$ ) para el consumo de materia seca como respuesta posiblemente a la composición bromatológica de cada uno de los forrajes evaluados, no se encontró diferencia ( $P > 0,05$ ) para las variables de producción y composición de la leche, y se encontraron valores muy similares en todos los tratamientos, con valores promedio para producción, porcentaje de grasa, proteína, lactosa y sólidos totales de 2,5 kg/día, 2,8%, 2,9%, 4,2% y 10,1%, respectivamente. Estos resultados, aunque no son diferentes estadísticamente, sí presentan una leve tendencia a mejorar cuando los animales fueron alimentados con heno de avena, el cual fue consumido en menor medida que el silo de maíz ( $P < 0,05$ ), posiblemente por tener un mayor porcentaje de FDN (38% contra 31%, respectivamente), lo cual demuestra que un alto contenido de carbohidratos estructurales impactan en la calidad nutricional de la leche de cabra y en el consumo de alimento<sup>26</sup>.

En otro estudio fueron alimentadas cabras de la raza la mancha con morera, sorgo y pasto estrella, y se encontraron diferencias significativas para la producción de leche ( $P < 0,01$ ) a favor de los animales que consumieron pasto estrella, pues alcanzaron producciones de 1.600 gr de leche por animal/día con valores porcentuales de grasa y proteína de 3.65 y 3.58%, respectivamente. Sin embargo, la cantidad de grasa y proteína fue mayor ( $P < 0,01$ ) para los animales que consumieron morera, que alcanzaron valores porcentuales de 4,23 y 3,68%, respectivamente. La mayor producción de leche en los animales que consumieron estrella pudo deberse al mayor

nivel de consumo de forraje, que estuvo por el orden de 3,45 Kg de forraje verde por animal/día, contra 3,23 Kg en los animales alimentados con morera, lo que demuestra que la producción láctea guarda una estrecha relación con el consumo de alimento y la adecuada recuperación de reservas corporales<sup>27</sup>. La calidad nutricional de la leche depende de factores asociados a la composición bromatológica de los forrajes. En este sentido, la hemicelulosa y celulosa son los carbohidratos estructurales que pueden ser aprovechados por las bacterias ruminales para producir ácidos grasos volátiles y transformarlos en ácido acético para aumentar el contenido graso en la leche<sup>28</sup>. Sin embargo, en este estudio se observó algo diferente, ya que el pasto estrella con respecto a la morera presentó el mayor contenido de hemicelulosa y celulosa (30,68 y 32,33%) pero las cabras alimentadas con ese forraje fueron las menos productoras de grasa. Los autores explican sus resultados basados en que la lignina en los pastos tiene una importante participación en la formación de mayores cantidades de ácido acético en el rumen, y consecuentemente se puede producir más cantidad de grasa láctea. Teniendo en cuenta la mayor concentración de lignina en la morera (12,52% contra 10,64% en el pasto estrella), se explica la mayor producción de grasa en la leche de las cabras alimentadas con este material.

De igual forma, en un estudio realizado con cabras de la raza granadina alimentadas con alfalfa en dos presentaciones distintas (heno y granulada) con el objetivo de conocer el efecto de la presentación del alimento sobre la composición láctea, se reportan datos similares que demuestran la relación directa entre el nivel de consumo y la producción de leche; sin embargo, al comparar el efecto que tiene la forma de presentación de la fibra sobre la composición de la leche, los autores no encuentran diferencias significativas ( $P > 0,05$ ) para la cantidad de grasa y proteína en la leche. En este sentido, los autores confirman que mientras el nivel de fibra sea el mismo, la presentación del alimento no afecta directamente la calidad composicional de la leche en los caprinos<sup>29</sup>.

### Efecto de la concentración proteica de la dieta sobre la producción y composición de la leche

Al evaluar el efecto de dos fuentes proteicas (heno de *gliricidia sepium* y heno de leucaena) sobre la composición de la leche en cabras mestizas alpina, y aunque no hubo diferencia significativa ( $P > 0,05$ ) en la producción y composición de la leche al comparar ambas fuentes, se observó

una tendencia mayor en los valores registrados para los animales alimentados con leucaena<sup>30</sup>; sin embargo, en este estudio no reportan la calidad nutricional de los componentes de la dieta, lo cual limita la explicación de los resultados encontrados; no obstante, podría pensarse en el efecto que pudo haber tenido el porcentaje de fibra o de proteína de la leucaena sobre la composición láctea; en este sentido algunos autores evaluaron diferentes niveles de proteína en la dieta de cabras alpinas para conocer su efecto sobre la digestibilidad del alimento y la producción y composición de la leche; los animales fueron alimentados con una dieta a base de silo de maíz (47%) y concentrado comercial (53%), con niveles crecientes de proteína bruta (11,5; 13,5; 15,5 y 17,5%); los resultados encontrados en este trabajo mostraron un efecto del nivel de proteína sobre la cantidad de gramos de proteína bruta en la leche (77,6, 80,0, 80,1, 91,3 g/día), pero no demostraron ninguna diferencia estadística ( $P>0,05$ ) para los niveles de producción de leche (2,717, 2,723, 2,761, 3,081 Kg/día) con un aumento de 364 gramos entre las dietas con 11,5 y 17,5% de proteína bruta; y de grasa en la leche (78,2, 76,0, 78,4, 88,4 g/día)<sup>31</sup>.

### Efecto de la relación forraje-concentrado

Por otra parte, la dieta de las cabras dedicadas a la producción de leche incluye generalmente el consumo de alimento concentrado, el cual, al ser suministrado en pequeñas cantidades, no impide que la formación de ácido acético sea predominante en rumen y que sea suministrado a la glándula mamaria, maximizando la producción de grasa en la leche; en este sentido, las dietas que incluyen concentrado presentan un efecto directo sobre los carbohidratos fibrosos al reemplazarlos por carbohidratos no estructurales, los cuales se fermentan completamente y de una manera más rápida; como consecuencia, se aumenta la producción total de ácidos grasos volátiles (AVG) y disminuye la relación acético-propiónico<sup>32</sup>; este cambio en el nivel ruminal estimula la producción de leche, debido al aumento de precursores lácteos como la glucosa, pero, un exceso en el suministro de alimentos concentrados puede reducir el nivel de ácido acético y aumentar el propiónico, generando una disminución en la calidad composicional de la leche<sup>33</sup>.

Cuando la relación forraje-concentrado es menor a 60:40, se afecta la producción de saliva, que actúa como amortiguador en el rumen, y ante la falta de un neutralizador natural en el organismo se presenta una caída en

el valor del pH ruminal. Ante la acidificación del rumen, la digestión de la celulosa se reduce porque las bacterias que la digieren son sensibles a un pH ruminal bajo. Por otra parte, este medio favorece el crecimiento de bacterias ácido-lácticas que acidifican aún más el ambiente ruminal, se reduce el crecimiento bacteriano, causan desórdenes en el apetito y cuando el tiempo es prolongado pueden presentarse problemas podales o laminitis.

En un trabajo realizado en Brasil se evaluó el efecto de diferentes relaciones forraje-concentrado sobre el desempeño productivo y la composición nutricional de la leche en cabras de la raza Saanen durante 151 días de lactancia; las relaciones forraje-concentrado utilizadas fueron 40:60, 50:50, 60:40, 70:30 y 80:20. Los resultados obtenidos en este trabajo encontraron diferencia significativa ( $P>0,05$ ) para producción de leche, influenciada por los tratamientos, especialmente en la dieta con un mayor contenido de energía y una mayor ingesta de materia seca (relación forraje-concentrado 40:60 con 2.95 Mcal/kg en base seca y un consumo de 2.67 Kg/día de materia seca ó 4,40% de peso vivo) con lo que se alcanzó mayor rendimiento de leche (3,41 kg/día). No hubo diferencias significativas ( $P>0,05$ ) entre los tratamientos para la composición de nutrientes de la leche en cuanto a los porcentajes de grasa (3,52, 3,08, 3,28, 3,21 y 3,23%), proteína (2,91, 2,81, 2,78, 2,69 y 2,79%), lactosa (4,53, 4,17, 4,41, 4,45 y 4,41%) y sólidos totales (11,89, 10,92, 11,37, 11,25 y 11,34%); sin embargo, al analizar la cantidad en gramos/día de cada uno de los nutrientes, se observó un efecto negativo en función del porcentaje de forraje<sup>34</sup>.

De igual forma, la literatura reporta un trabajo en el cual se evaluó el efecto de la utilización de silo de maníocoba (*Manihot glaziovii*) en relaciones forraje-concentrado 30:70, 40:60, 50:50 y 60:40 sobre la composición y el perfil de ácidos grasos en la leche de cabras Moxotó, y al igual que en el estudio anterior no se encontró diferencia significativa ( $P>0,05$ ) para los porcentajes de grasa, proteína y lactosa, que estuvieron en valores promedio de 3,79, 3,97 y 4,66%, respectivamente; sin embargo, sí se pudo observar un efecto sobre algunos ácidos grasos, en particular el mirístico (C14:0) que aumentó de 6,15 a 7,85% a medida que disminuía la cantidad de concentrado, y el ácido linolénico (C18:3) que aumentó de 0,76 a 2,13% cuando la cantidad de silo fue mayor a la del concentrado en la dieta<sup>35</sup>.

Otros autores evaluaron un total de 60 cabras adultas alimentadas con dos suplementos (concentrado comercial y concentrado con follaje de

quinchoncho) y dos sistemas de amamantamiento para determinar el reinicio de actividad ovárica e intervalo parto-concepción en explotaciones caprinas semi-intensivas, y aunque no se determinó el efecto de la dieta sobre la composición de la leche, sí se identificó estadísticamente la producción láctea, y se encontró diferencia significativa ( $P < 0,05$ ) entre los animales que consumieron concentrado comercial y los que consumieron forraje (734,5 gr/día vs 656,5 gr/día respectivamente)<sup>36</sup>.

De igual forma otros investigadores evaluaron el efecto en la sustitución del concentrado comercial a base de maíz y soja por dietas con harina de cacao y torta de semilla de palma sobre la composición y el costo de producción de la leche, utilizando cabras de la raza Saanen durante los primeros 60 días de lactancia; el concentrado suministrado a los animales correspondía al 64% de la dieta, mientras que el 36% restante era forraje verde. Los niveles de sustitución del concentrado fueron de 0, 15 y 30%. Para este trabajo los autores no encontraron diferencias significativas ( $P > 0,05$ ) entre las características físico-químicas de la leche, lo cual puede explicarse en gran medida porque las dietas sustitutas presentaban un porcentaje de TDN similar al alimento concentrado comercial, de tal forma que el aprovechamiento de los nutrientes no se modificó drásticamente y esto permitía mantener la composición de la leche<sup>37</sup>.

### Utilización de grasas en la dieta

La inclusión de grasas en la dieta de los rumiantes buscando aumentar el consumo de energía y la producción de leche, tiene un efecto impredecible en el porcentaje de grasa en la leche, pero en general los efectos son negativos, debido a que las grasas utilizadas en la ración suelen cubrir físicamente las partículas de fibra disminuyendo la adhesión de las bacterias celulolíticas encargadas de la digestión de la fibra y la producción de acetato<sup>38</sup>.

Varios autores han evaluado el efecto de suministrar diferentes fuentes lipídicas sobre la calidad composicional de la leche. En este sentido se evaluó el efecto del aceite de algodón y girasol sobre la composición de la leche en cabras mestizas Moxotó con diferentes porcentajes de inclusión en la dieta (0% de aceite; 3% aceite de algodón; 5% aceite de algodón; 3% aceite de girasol; 5% aceite de girasol). Los resultados encontrados evidenciaron una caída en la producción de leche para todos los tratamientos que contenían aceite (1,132, 1,101, 1,034, 1,072 Kg/día), con una diferencia

significativa ( $P < 0,05$ ) respecto al tratamiento control (1,054 Kg/día), destacándose el menor nivel de producción en los animales alimentados con el 5% de aceite de algodón. Estos resultados no concuerdan con los encontrados por Mir *et al.*, (1999) quienes alimentaron cuatro cabras de la raza Saanen con cuatro niveles de inclusión de aceite de canola (0%, 2%, 4% y 6%) y no observaron disminución en la producción láctea<sup>39</sup>.

Otros autores también evaluaron el efecto de los aceites vegetales sobre la composición de la leche, pero comparando diferentes fuentes lipídicas (arroz canola y soja) contra una dieta control sin adición de aceite, y aunque no hallaron diferencia significativa ( $P < 0,05$ ) entre los tratamientos para la cantidad de grasa en la leche, sí pudieron determinar diferencias ( $P < 0,01$ ) para el porcentaje de sólidos totales a favor de los animales suplementados con aceite (11,86; 11,62 y 11,73 % para arroz, canola y soja, respectivamente) contra los animales que no recibían suplementación (10,84%); De igual forma encontraron diferencia significativa ( $P < 0,05$ ) en las concentraciones de ácido linoleico conjugado en la leche de los animales que consumieron dietas suplementadas por aceite vegetal (1,43, 1,10, 1,70% para arroz, canola y soja, respectivamente) contra los animales que no recibían suplementación (0,91%)<sup>40</sup>.

En un trabajo realizado con cabras de la raza Saanen suplementadas con diferentes fuentes lipídicas (semilla de faveleira (*Cnidocolus phyllacanthus*), torta de faveleira y torta de algodón) no se encontró diferencia significativa ( $P > 0,05$ ) para la producción de leche corregida al 4% de grasa entre los diferentes tratamientos, ni tampoco al compararlos contra un grupo control sin adición de lípidos en la dieta. Sin embargo, se observó un mayor consumo de materia seca ( $P < 0,05$ ) en los animales que no eran suplementados, indicando una mayor eficiencia en la producción de leche cuando los animales reciben una fuente lipídica que aumenta la densidad energética de la dieta. Por otro lado, la composición nutricional de la leche presentó diferencias significativas ( $P < 0,05$ ) para grasa y sólidos totales a favor de los animales suplementados con torta de algodón y torta de faveleira (3,39 y 11,53; 3,48 y 11,43 %, respectivamente), lo que evidencia el efecto positivo de las fuentes lipídicas sobre la calidad nutricional de la leche<sup>41</sup>.

## Consideraciones finales

La composición nutricional de la leche de cabra difiere bastante de la de otros animales de interés zootécnico, y se caracteriza por presentar algunas

características de orden nutracéutico que le permiten presentarse como un producto beneficioso para el consumo humano. En este sentido es importante que los productores puedan tomar medidas para mejorar la composición nutricional de la leche y comercializar los productos generando valor agregado; por ello es importante reconocer que la composición nutricional de la leche de cabra puede ser influenciada por diferentes factores que hacen parte de la dieta, entre ellos, la cantidad de fibra y la relación entre forraje y concentrado son los que generan mayores cambios, principalmente en el componente graso de la leche.

### Referencias bibliográficas

1. SALVADOR, A. y MARTÍNEZ, G. Factores que Afectan la Producción y Composición de la Leche de Cabra: Revisión Bibliográfica. En: Rev. Fac. Cs. Vets. UCV. 2007. Vol. 48, no. 2. p. 61-76.
2. PARK, Y. W. Goat milk—chemistry and nutrition. En: Park Y.W, Haenlein G.F.W. (Eds.), Handbook of Milk of Non-bovine Mammals. Blackwell Publishing Professional, Oxford, UK/Ames, Iowa, 2006. p.34–58.
3. LUDEÑA, F.; *et al.* Physical-chemical and microbiological characterization of goat's milk and its conservation by means of the activation of the lactoperoxidase system. En: Mosaico Cient. 2006. Vol. 3, no. 1. p. 17 - 25
4. SANZ SAMPELAYO, M.R.; *et al.* Influence of type of diet on the fat constituents of goat and sheep milk. En: Small Ruminant Research. 2007. Vol. 68. p. 42-63.
5. PARK, Y.W. Goat milk—chemistry and nutrition., Op cit., p. 34 – 58
6. SILANIKOVE, M., *et al.* Recent advances in exploiting goat's milk: Quality, safety and production aspects. En: Small Ruminant Research. 2010. Vol. 89. p.110-124.
7. LUDEÑA, Op. cit., P. 17-25
8. MARTÍNEZ FÉREZ, A. Obtención de oligosacáridos de leche de diferentes especies por tecnología de membranas. Tesis Doctoral. Universidad de Granada. 2004.
9. PARK, Y. W., *et al.* Physico-Chemical characteristics of goat and sheep milk. En: Small Ruminant Research. 2007. Vol. 68. p. 88-113
10. PARK, Y.W. Goat milk—chemistry and nutrition.; Op. cit. p. 34 – 58
11. PARK, Y.W, *et al.* Physico-Chemical characteristics of goat and sheep milk, Op. cit. p. 88-113
12. HAENLEIN, G. Goat milk in human nutrition. En: Small Ruminant Research. 2004. Vol. 51. p. 154–163.

13. RODDEN, D. Dairy goat composition. [En línea]. California, Estados Unidos: Davis, 2004. [Citado el 16 de noviembre de 2004]. Disponible en <http://drinc.ucdavis.edu/html/milkg-1.shtml>.
14. HAENLEIN, Op. cit., p. 154-163
15. EKNAES, Margrate, *et al.* Changes in body reserves and milk quality throughout lactation in dairy goats. En: Small Ruminant Research. May 2006. Vol. 63, no. 1. p. 1-11
16. KÖHLER OSMARI, E. Produção e Qualidade do Leite em Cabras ½ boer-Saanen, em Lactação, Suplementadas com Diferentes Volumosos. Dissertação apresentada, como parte das exigências para obtenção do título de mestre em Zootecnia. Universidade Estadual de Maringá. Centro de ciências agrárias. 2007.
17. CHILLIARD, Y. y FERLAY, A. Dietary lipids and forages interactions on cow and goat milk fatty acid composition and sensory properties. En: Reproduction Nutrition and Development. 2004. Vol. 44. p. 467-492
18. CHILLIARD, Y.; *et al.* A review of nutritional and physiological factors affecting goat milk lipid synthesis and lipolysis. En: Journal of Dairy Science. 2003. Vol. 86. p. 1751-1770.
19. PARODI, P. W. Cows' milk fat components as potential anticarcinogenic agents. En: Journal of Nutrition. 1997. Vol. 127. p.1055-1060.
20. KHANAL R. C. y OLSON K. C. Factors Affecting Conjugated Linoleic Acid (CLA) Content in Milk, Meat, and Egg: A Review. En: Journal of Nutrition. 2004. Vol. 3 p. 82-98.
21. PRANDINI, A.; *et al.* Different level of conjugated linoleic acid (CLA) in dairy products from Italy. En: Journal of Food Composition and Analysis. 2007. Vol. 20. p. 472-479.
22. PARK, Y. W. Goat milk—chemistry and nutrition.; *op cit.*, p. 34 – 58
23. SANZ SAMPELAYO, M. R.; *et al.* Influence of type of diet on the fat constituents of goat and sheep milk; *Op. cit.*, p. 42-63
24. ALLEN, M. S. Relationships between fermentation acid production in the rumen and the requirement for physically effective fiber. En: Journal of Dairy Science. 1997. Vol. 80. p. 1447.
25. ROJAS, H.; BENAVIDES, J. E y FUENTES, M. Producción de leche de cabras alimentadas con pasto y suplementadas con altos niveles de morera. En: J. E. Benavides ed. "Árboles y arbustos forrajeros en América Central". 1994. Vol. II. Serie técnica, Informe técnico No. 236. Turrialba, Costa Rica. CATIE. 305-320.
26. RIBEIRO, L. R.; *et al.* Produção, composição do leite e constituintes sanguíneos de cabras alimentadas com diferentes volumosos. En: Arq. Bras. Med. Vet. Zootec. 2008. Vol.60, no. 6. p. 1523-1530.

27. HERRERA L. R.; *et al.* Variación bromatológica de la leche de cabras La mancha alimentadas con diferentes forrajes. En: *Agronomía Mesoamericana*. 2009. Vol. 20, no. 2. p. 381-390.
28. ROJAS, Op. Cit. p. 305-320
29. SANZ SAMPELAYO, M. R.; *et al.* Efecto de la forma física de presentación de la fracción forraje de la dieta y de la fuente proteica utilizada sobre la producción y composición de la leche de cabra de raza granadina. En: *Invest. Agr.: Prod. Sanid. Anim.* 1998. Vol. 13. p. 31-44.
30. GERMANO, R.; *et al.* Utilización de *Gliricidia (gliricidia sepium)* y *Leucaena (leucaena leucocephala)* en la alimentación de las cabras en lactación. Bananeiras, Brasil: SEOC, 2002. 6 p.
31. MOREIRA, C. E., *et al.* Produção de leite em cabras alimentadas com diferentes níveis de proteína na dieta: consumo e digestibilidade dos nutrientes. En: *Revista Brasileira de Zootecnia*. Vol. 35, no.3. 2006. p. 1162-1168.
32. CHURCH, C. D. El Rumiante, fisiología, digestión y nutrición. Zaragoza, España: Editorial Acribia, 1993. p.641
33. VAN SOEST, P. Nutritional Ecology of the Ruminant. 2ª edición. New York, Estados Unidos: Cornell University, 1982. p. 476
34. ALAVARSE ZAMBOM, M. Desempenho e qualidade do leite de cabras Saanen alimentadas com diferentes relações volumoso:concentrado, no pré-parto e lactação. Dissertação apresentada para obtenção do título de mestre em Zootecnia. Universidade Estadual de Maringá. Centro de ciências agrárias. 2003.
35. GERMANO, R.; *et al.* Características químicas e sensoriais do leite de cabras Moxotó alimentadas com silagem de manicoba. En: *Revista Brasileira de Zootecnia*. 2008. Vol. 37, no. 4. p. 694-702.
36. SÁNCHEZ, C.; *et al.* Comportamiento reproductivo de cabras alimentadas con distintos concentrados y sistemas de amamantamiento de las crías. En: *Revista Científica*. 2010. Vol. 20. p.170 – 175.
37. SILVA, H.; *et al.* Características físico-químicas e custo do leite de cabras alimentadas com farelo de cacau ou torta de dendê. *Arq. Bras. En: Med. Vet. Zootec.* Vol. 58, no.1. 2006. p. 116-123.
38. CHILLIARD, Y.; *et al.* A review of nutritional and physiological factors affecting goat milk lipid synthesis and lipolysis, Op. cit., p. 1751-1770.
39. FERREIRA FERNANDEZ, M. Qualidade do leite de cabras mezticas moxotó suplementadas com diferentes fontes e níveis de oleos vegetais. Dissertacao apresentada ao programa de Pós-Graduação em Zootecnia. Universidade Federal da Paraíba. Centro de ciências agrárias, 2007.

40. MAIA, F. J.; *et al.* Inclusão de fontes de óleo na dieta de cabras em lactação: produção, composição e perfil dos ácidos graxos do leite. En: Revista Brasileira de Zootecnia. 2006. Vol. 35, no. 4. p. 1504-1513.
41. SOBRAL SILVA, G. Efeito da suplementação lipídica sobre desempenho e perfil metabólico de cabras Saanen em lactação. Dissertação apresentada para obtenção do título de mestre em Zootecnia. Universidade Federal de Campina Grande. Centro de saúde e tecnologia rural, 2008.

# Análisis de la legislación sanitaria y ambiental para empresas del sector avícola y sugerencias para su aplicación\*

Victoria Eugenia Cano Díaz\*\*

Luz Marina Roldán Aristizábal\*\*\*

Rafael Ochoa Velásquez\*\*\*\*

Luz Adriana Gutiérrez Ramírez\*\*\*\*\*

## Resumen

Los problemas sanitarios vividos en el país en los años 50 estimularon el desarrollo industrial del sector avícola, al mostrar la necesidad de tecnificar el manejo de las aves para brindarles mejores condiciones de alojamiento, alimentación y prevención de enfermedades, hecho que apalancó a la industria avícola como uno de los sectores más importantes y dinámicos de la economía nacional actual. Aunque en el ámbito interno la industria avícola ha tenido un desempeño destacable frente al resto del aparato industrial y agrícola, la competencia foránea se viene dando cada vez con mayor intensidad.

La inserción de Colombia en el mercado internacional de productos avícolas presenta restricciones y amenazas, representadas principalmente en las diferencias existentes en los costos de producción, en los estándares productivos y en el estatus sanitario, aspectos en los cuales el país muestra desventajas.

A fin de contribuir a mejorar la competitividad del sector avícola colombiano, el presente trabajo analiza la

\* Monografía realizada en la Especialización de Gerencia Agropecuaria Corporación Universitaria Lasallista 2011.

\*\* Candidata a Especialista en Gerencia Agropecuaria CUL, Ingeniera Agroindustrial.

\*\*\* Candidata a Especialista en Gerencia Agropecuaria CUL, Medica Veterinaria Zootecnista.

\*\*\*\* Candidato a Especialista en Gerencia Agropecuaria CUL, Zootecnista.

\*\*\*\*\* MSc en Biotecnología, Bióloga, Docente tiempo completo Corporación Universitaria Lasallista.

normativa sanitaria y ambiental vigente, propone cambios para actualizarla o complementarla y finalmente presenta un resumen en forma de listas de chequeo, separadas por temas y tipo de explotación, que permite su fácil comprensión y aplicación. De esta manera, pretende que los productores avícolas implementen los estrictos controles exigidos en cuanto a bioseguridad, vacunación, construcción de granjas y manipulación de alimentos a los que se refieren las normas sanitarias y aprovechen los recursos naturales sin causar un problema ambiental, y beneficien tanto a la población animal como a la humana, según se especifica en la normativa ambiental vigente. Esto sólo es posible si los avicultores se comprometen e interiorizan la norma no como una exigencia, sino como la posibilidad de mejorar la competitividad en el mercado nacional y en el internacional.

**Palabras clave:** avicultura, leyes sanitarias, medioambiente.

### Analysis of the sanitary and environmental laws for poultry companies and suggestions for their applications

#### Abstract

The sanitary problems experienced by Colombia in the 50's stimulated the industrial development of poultry, given the necessity of introducing technology to the bird's handling in order to improve their lodging, feeding and health conditions. This fact leveraged the sector, and it became one of the most important and dynamic in the national economy. Even though poultry has been nationally remarkable under performance terms if compared to the rest of the industrial and livestock sectors, foreign competition has been gaining more intensity every day.

Colombia's inclusion in the international poultry market has some restrictions and threats, mainly represented by the differences of production costs, production standards and the sanitary status, aspects in which Colombia has disadvantages.

Aiming to contribute the competitiveness of the Colombian poultry sector, this work analyzes the sanitary and the current environmental laws, proposes changes to update or complete them and, finally, introduces some check lists as a brief. They are divided into topics and exploitation types, thus making them easier to understand and to apply. By doing this, the idea is that poultry producers can implement the strict controls demanded under biosecurity, vaccination, farming and food handling terms, included in the sanitary rules, and make a good use of natural resources avoiding environmental problems and be useful for both ani-

mal and human populations, according to current laws. This can only be achieved if poultry producers get committed and take law not as an imposition, but as the possibility of improving competitiveness in national and international markets.

**Key words:** Poultry, sanitary laws, environment.

## Introducción

La avicultura en Colombia tiene sus comienzos a partir de las primeras importaciones de aves, ocurridas entre los años 1920 y 1940; con estas importaciones prácticamente llegó la “pullorosis”, una enfermedad que fue ampliamente difundida por todo el país<sup>1</sup>.

En los años 50, reaparece la producción avícola y con ella el virus del New Castle, enfermedad que según reportes encontrados mató cerca de 12 millones de aves de una población total de 18 millones de aves<sup>2</sup>.

La situación sanitaria padecida en el país estimuló el desarrollo industrial del sector y de sus actividades relacionadas; surgió así la necesidad de tecnificar el manejo de las aves para brindarles mejores condiciones de alojamiento, alimentación y prevención de enfermedades; asimismo, se fortalecieron otros sectores directamente relacionados en el mejoramiento de la producción avícola como los laboratorios de diagnóstico de enfermedades, de producción y distribución de vacunas y medicamentos, fábricas de alimentos concentrados y fábricas de equipos e implementos, entre otros.

En la década de los 60 se inicia la tecnificación de la industria avícola, con la aparición de la industria incubadora, la industria del pollo, la industria del huevo y la industria de los alimentos concentrados; pero es en los 90 donde adquiere una posición privilegiada. En la última década se ha evidenciado que la producción avícola ha evolucionado sustancialmente, debido a los avances tecnológicos, al empleo de economías de escala y a la optimización de la capacidad de albergue en los galpones y la reducción en el tiempo de engorde<sup>3</sup>.

La apertura del mercado doméstico ha estimulado al sector avícola para competir con las importaciones de carne de pollo. La competencia vía precios ha ocasionado reducciones a favor del sector avícola, permitiendo que la carne de pollo sea más asequible incluso para los consumidores de bajos niveles de ingresos<sup>4</sup>.

Al incursionar en el campo industrial, el sector se reforzó con la creación de la Federación Nacional de Avicultores de Colombia (FENAVI) en 1983, año en el cual quedó como una organización gremial<sup>5</sup>. Este sector es uno de los más importantes de la economía nacional; es, en su cadena productiva, el eslabón más dinámico de la industria agropecuaria.

En el mercado pecuario, el consumo de pollo y derivados se ha convertido en la principal fuente de proteína de origen animal, en la dieta de los hogares; sin embargo, la actividad avícola se ha desarrollado con un escaso cumplimiento de la normativa sanitaria y ambiental, probablemente por la pobre difusión de las leyes, por el frecuente cambio en las mismas, por la falta de control y seguimiento por parte de las autoridades, por lo poco específica que es la norma o simplemente porque los productores no son conscientes de su importancia y las consideran un gasto para su operación<sup>6</sup>.

Las normas fueron creadas para mejorar procesos productivos, ambientales y sanitarios en las granjas avícolas del país, buscando estándares que mejoren la calidad de vida de las aves, del personal que labora en la granja, de las personas que se encuentran cercanas a la explotación y de los consumidores finales de los productos y subproductos avícolas; pero a pesar de esto se continúa considerando que la normativa es sólo para las grandes empresas y que no incumbe al pequeño productor<sup>7-9</sup>. Se debe pensar no en los gastos incurridos por cumplir con la normativa, sino en la inversión que se está realizando, para mejorar las condiciones sanitarias y ambientales de la granja, de la región y del país.

Es por esto que es de suma importancia que todo productor y transformador conozca y aplique la normativa sanitaria y ambiental, ya que ésta tiene como fin último garantizar la sanidad y sostenibilidad de la granja, así como la calidad e inocuidad de los productos; además, el incumplimiento de la normativa puede tener repercusiones graves que amenazan el desarrollo productivo del sector, disminuyen la competitividad en el mercado nacional e internacional y ocasionan sanciones económicas, cierre temporal o cierre definitivo de la explotación.

Para contribuir a la solución de la situación descrita, se desarrolló una propuesta en la cual se explican las normativas más importantes y algunos aspectos que se consideran relevantes para determinar los niveles de calidad de una planta avícola.

## Norma sobre vacunación avícola

Esta norma fue establecida por la resolución 811 de 1992<sup>10</sup>; en ella se exige un plan de vacunación para toda explotación avícola y se deroga la resolución 957 de 1986 del ICA<sup>11,12</sup>. En el artículo primero se establece como de obligatorio cumplimiento la vacunación para las aves domésticas de Colombia contra las siguientes enfermedades: Marek, New Castle, bronquitis infecciosa, viruela, enfermedad infecciosa de la bolsa, encefalomiелitis aviar, Mycoplasmosis aviar y artritis viral; es importante anotar que la vacuna contra la viruela es de uso obligatorio para todo tipo de aves: reproductores, comerciales para carne y comerciales para huevo. Regularmente este tipo de enfermedad se presenta más en aves adultas.

## Norma sobre control técnico

Esta fue expedida por resolución 1476 de 1976 a toda tipo de explotación avícola, y se reglamenta la resolución 261 de 1975, sobre el control de la Salmonellosis en las aves de corral<sup>13</sup>. En el artículo 8 se sugiere que para el transporte de aves y sus productos se requiere guía de movilización expedida por la respectiva regional del ICA; se exige en el vehículo una remisión donde se detalle el envío, con el sello de la granja de origen; este debe contener el nombre de la granja y el número del registro ICA; además, un formato de inspección veterinaria, donde el Médico Veterinario (M.V) o Médico Veterinario Zootecnista (M. V. Z) certifique que las aves se encuentran en condiciones apropiadas de salud.

En esta misma norma se encuentra la resolución 1698 de 2000 por la cual se dictan disposiciones sobre productores de alimentos para animales con destino al autoconsumo<sup>14,15</sup>; esta se aplica para todos aquellos avicultores que fabriquen el alimento para sus aves pero que no los comercialicen a terceros. En el artículo 3, el ICA solicita al productor de alimentos para autoconsumo, información sobre las instalaciones, equipos, personal técnico y descripción de los procesos de producción que está en capacidad de desarrollar y de esta manera recibir el registro. La resolución no especifica qué aspectos se deben incluir en la información de instalaciones, equipos, personal técnico y descripción de los procesos. Para cumplir a cabalidad el ítem, se debe tener información sobre todo el proceso de producción, tipo de muestreo de materia prima y producto terminado, forma de almacenamiento, limpieza de la planta y calibración de equipos, entre otros.

En el artículo 4 se determina que una vez cumplidos los requisitos, el ICA o las personas naturales o jurídicas oficiales o particulares, debidamente acreditadas ante el mismo, realizarán visita técnica de inspección a las instalaciones de la planta de producción. El ICA expedirá mediante resolución motivada el registro como productor de alimentos para animales con destino al autoconsumo, el cual tendrá vigencia indefinida. Teniendo claridad sobre estos aspectos el artículo 7 obliga a los productores de alimentos para animales con destino al autoconsumo a mantener las debidas condiciones microbiológicas, físicas y químicas para la elaboración de los productos; se sugiere especificar que el lugar de producción debe ser construido de tal forma que pisos, paredes y techos no sean focos de contaminación ni de almacenamiento de animales y que la planta cuente con una delimitación de zonas que no permita contaminación cruzada. Además, se debe garantizar el control de calidad de materias primas, de producto en proceso y de producto terminado.

### **Normas sobre medidas sanitarias, registro, prevención y control**

Esta norma es regida por la ley 1255 de 2008 en la cual se declara de interés social y como prioridad sanitaria la creación de un programa que preserve el estado sanitario de país libre de Influenza Aviar, así como el control y erradicación de la enfermedad del Newcastle<sup>16</sup> en el territorio nacional, además de otras medidas encaminadas a fortalecer el desarrollo del sector avícola nacional<sup>17,18</sup>. Esta resolución aplica para todos los avicultores.

En la misma norma, se expide la resolución 587 de 1973 por la cual se dictan medidas para el control de la enfermedad de Marek en las aves de corral<sup>19</sup>, aplicadas a todas las plantas de incubación del país, donde se deberán vacunar las aves de un día contra la enfermedad de Marek. En el caso de una violación a esta resolución o sus reglamentos se sancionarán mediante resolución motivada y en la forma prevista en la resolución 133 de 1971.

Para la prevención de la enfermedad de Newcastle se expide la resolución 1937 de 2003 por la cual se establecen medidas sanitarias para la prevención y el control de esta en el territorio nacional<sup>20</sup>, aplicada para todos los avicultores comerciales de Colombia.

Asimismo, en el artículo 2 se establece con carácter obligatorio la vacunación contra la enfermedad de Newcastle en todo tipo de aves del país, a partir de la vigencia de esta resolución. En la situación que se presentase

una mortalidad generada como consecuencia de problemas sanitarios, los animales afectados deberán ser eliminados siguiendo las normas medioambientales vigentes y presentes en artículo 6. Los métodos de eliminación para estos animales son: cooker, hornos incineradores, fosa séptica, ensilaje de mortalidad, compostaje; y enterramiento; este último solo se permite en casos de absoluta gravedad y como mecanismo de contingencia<sup>21</sup>.

Para el caso que estos residuos se comercialicen, el artículo 8 prohíbe la movilización o comercialización de cama, gallinaza, pollinaza y empaques de alimento o materia prima, sin previo tratamiento o proceso que minimice el riesgo sanitario o evite la transmisión de agentes patógenos.

En esta misma norma se rige la construcción de nuevas granjas en el país, condicionadas por la resolución 2896 de 2005. En el artículo 4 de esta resolución se establece que cada galpón debe alojar aves de una misma edad.

En el artículo 5 se indica que cada galpón debe estar dotado de una poceta de desinfección en sus entradas; para cumplir a cabalidad esta norma, se proponen dos pocetas: una con agua para un primer lavado y otra con una solución desinfectante, para un segundo lavado, ubicadas en cada una de las entradas que se utilicen de los galpones. Además, toda nueva granja avícola debe contar con un área suficiente para el procesamiento de residuos generados por actividades avícolas tales como gallinaza, pollinaza y mortalidad (artículo 8).

En el artículo 9 se determina la importancia de contar en la granja avícola como mínimo con un sistema para la eliminación técnica de la mortalidad y de desechos<sup>22</sup>, así como disponer de duchas, vestier y ropas que garanticen condiciones óptimas de desinfección a la entrada de la granja. Debe también disponer a la entrada, de arcos de desinfección, rodiluvios y pediluvios para vehículos y visitantes o cualquier otro sistema que permita una adecuada desinfección; por lo tanto, para la buena ejecución de las actividades en la granja esta debe contar con asesoría profesional de un médico veterinario o médico veterinario-zootecnista o zootecnista, con tarjeta profesional (artículo 11).

## Normas de bioseguridad

Esta normativa se expide en resolución 1183 de 2010 por medio de la cual se establecen las condiciones de bioseguridad que deben cumplir las granjas avícolas comerciales en el país para su certificación<sup>23-25</sup>. Esta resolu-

ción aplica para todos los avicultores comerciales de Colombia y los obliga a certificarse como granjas bioseguras.

El artículo 4 exige que la granja cuente con procedimientos operativos estandarizados y documentados con sus respectivos registros acerca de ingreso de personas y vehículos, tratamiento del agua, desinfección de instalaciones, equipos y utensilios, disposición de la mortalidad, control de plagas e insectos, tratamiento de la gallinaza/pollinaza, y programa de vacunación.

Es necesario, entonces, que la granja cuente con un cerco perimetral en buen estado que impida el libre tránsito de personas y vehículos y minimice el ingreso de animales a ella; que cuente con un sistema permanente de desinfección de los vehículos que ingresan a la granja; además, libre de malezas, escombros, basuras o cualquier material de desecho. Debe contar con cámara de desinfección para los objetos personales que necesariamente tengan que entrar a la granja, ubicada al ingreso de la misma o en la zona de transición entre la zona limpia y la zona sucia.

La granja debe estar señalizada en cada área y los galpones deben tener mallas que impiden el ingreso de otras aves a estos.

El almacenamiento del alimento se hace en áreas delimitadas sobre estibas para aquellas que no utilizan tolvas o silos.

La granja cuenta con áreas independientes para el almacenamiento de medicamentos, plaguicidas y sustancias de limpieza y desinfección.

La gallinaza/pollinaza tratada es movilizada fuera de la granja con un sistema que asegure la no dispersión de la misma fuera del vehículo que la transporta.

Para que el ítem se cumpla debidamente se deben tener en cuenta algunas acciones como información completa sobre productos, dosis, procedimientos permitidos, manejo, frecuencia de uso, medición de aceptación y rotación de los productos, frecuencia del tratamiento, responsable del proceso, fechas de realización del proceso, temperaturas alcanzadas, etc.

Todas las zonas deben estar señalizadas: área de duchas, oficina, compost de mortalidad, área de tratamiento de gallinaza/pollinaza (compost/sanitización), galpones, nombre de la granja, bodegas (alimento y químicos), clasificadora, comedor. Puede utilizarse un cajón y atomizar un producto desinfectante, cajón metálico con luz ultravioleta, gases de desinfección, etc.

Artículo 7: Las cajas de cartón utilizadas en el transporte de las aves de un día de edad son eliminadas mediante cualquier procedimiento contemplado en la normativa ambiental vigente.

### Normativa de inocuidad

La normativa de inocuidad está regida por ley 9 de 1979; por la cual se dictan medidas sanitarias<sup>26</sup> para todas las explotaciones avícolas y plantas de beneficio; el artículo 30 de la misma ley obliga a incinerar en el lugar de origen todo residuo sólido que sea infectocontagioso; sin embargo, esta ley se flexibiliza al uso de compost, en el caso de que la planta no cuente con el recurso para incinerar; además de lo amigable que es el compost con el medioambiente.

Para el mejoramiento también de los aspectos que refieren a inocuidad, el artículo 34 de la misma ley recomienda la inspección ante-mórtem de las aves, la cual debe llevarse a cabo en la zona de recepción del matadero; para mejorar este aspecto se recomienda modificar este procedimiento, haciendo la inspección ante-mórtem en la granja, hasta 48 horas antes del despacho para matadero, certificada por escrito por el M. V. o M. V. Z.

La norma sobre inocuidad también la rige el decreto 3075 de 1997, en el cual se reglamenta parcialmente la ley 09 de 1979 y se dictan otras disposiciones<sup>27</sup>, encaminadas especialmente a las condiciones y operaciones de saneamiento que deben tener los mataderos o lugares destinados al sacrificio y a las empresas destinadas a procesar huevos. En el artículo 4, los mataderos se consideran fábricas de alimentos; por lo tanto, para que en ellos se desarrolle un buen funcionamiento es de vital importancia que cumplan todas las indicaciones de diseño, construcción, buenas prácticas de manufactura y manipulación de alimentos; para esto, deben ser construidos en lugares alejados de focos de contaminación, y con paredes, techos y pisos que garanticen fácil limpieza, y que impidan el almacenamiento de basuras, microorganismos y nidos de animales.

El artículo 8 incluye el diseño que debe contener la planta de producción: localización y accesos, diseño y construcción; disposición de residuos líquidos, abastecimiento de agua, disposición de residuos sólidos e instalaciones sanitarias. Para el logro de este artículo se deberán diseñar y construir áreas separadas que no permitan la contaminación cruzada y que, además, tengan una secuencia de acuerdo con el proceso del producto, que faciliten la limpieza y la desinfección.

Es importante también Implementar un programa de manejo de residuos sólidos que permita alejar este fluido del proceso productivo; dentro de la planta de proceso solo se debe utilizar agua potable; además, se debe contar con tanque de abastecimiento que almacene el agua necesaria para un día proceso.

El artículo 9 del mismo decreto no es claro con respecto al material que se debe emplear para los pisos, drenajes, paredes y techos; se recomienda que sea en materiales no porosos y pisos con una pendiente del 2%; los drenajes deben ubicarse uno por cada 40 metros cuadrados y tapados con rejillas. Utilizar recubrimientos epóxicos o poliméricos que garantizan fácil limpieza y desinfección. Unir pisos y paredes con media canoa redonda para evitar acumulación de mugre.

En cuanto a los equipos y utensilios, el artículo 11 exige que sean en acero inoxidable, y garantizar en ellos un nivel adecuado de desinfección.

Para que las fábricas de alimentos sean certificadas, el decreto 60 de 2002 promueve la aplicación del sistema de análisis de peligros y puntos de control crítico –HACCP<sup>-28</sup>. Este decreto aplica para aquellas empresas de alimentos nombradas en el caso anterior (plantas de sacrificio – mataderos o plantas procesadoras de huevo) y se deriva del artículo 25 del decreto 3075 de 1997. Este decreto es certificable por el Instituto Nacional de Vigilancia de Medicamentos INVIMA, cuenta con vigencia de dos años y consiste en la implementación de un plan completo para garantizar la inocuidad de los alimentos, basado en siete pasos que conllevan a identificar permanentemente los puntos críticos ( procesos o procedimientos que se apliquen al alimento que puedan contaminarlo y/o cambiar su composición) que se pueden presentar dentro del proceso productivo de un alimento, y controlarlos. Lo que este decreto reglamenta también se encuentra explícito en los artículos 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39 y 40 de la resolución 4287 de 2007.

## Reglamento interno

La resolución 4287 de 2007 establece el reglamento técnico sobre los requisitos sanitarios y de inocuidad de la carne y productos cárnicos comestibles de las aves de corral destinadas para el consumo humano, y las disposiciones para su beneficio, desprese, almacenamiento, transporte, comercialización, expendio, importación o exportación;<sup>29</sup> en esta resolución

se contemplan con exactitud todos los aspectos contenidos dentro del decreto 3075 del mismo año y el decreto 60 que separa el plan HACCP de las buenas prácticas de manufactura en el año 2002, donde, además de garantizar la inocuidad del alimento, vigila todo el proceso de sacrificio con registros permanentes y confiables que son verificados por el Instituto de Vigilancia de Alimentos y Medicamentos, INVIMA, y que agrega de forma extraordinaria el punto crítico de control específico del sacrificio de las aves y la aparición nula de materia fecal en las canales de éstas.

En los artículos 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25 se especifica la importancia de la delimitación de las zonas; se recomiendan, para el cumplimiento de los ítems, zonas completamente diferenciadas y diseñadas para evitar contaminación cruzada. Las áreas deben estar separadas y en su respectivo orden de proceso: recepción y sacrificio, escaldado y desplume, evisceración, enfriamiento y empaque de productos y de menudencias, almacenamiento bajo refrigeración o congelación, despachos, y separado de lo anterior, oficinas, cafetería, vestier, baños y área de disposición de residuos.

En los artículos 25, 26, 27, 28, 29 30, 31, 32 se determinan los procedimientos operativos estandarizados de saneamiento; estos puntos no están definidos en la resolución, por lo tanto, se aclara que corresponden a los procedimientos que se redactan con base en un ciclo PHVA (planear, hacer, verificar y analizar), que contiene una lista de chequeo, diligenciada con una periodicidad definida, posterior a una capacitación completa de todo el personal, ejecutando el proceso de manera rigurosa con sus respectivos registros y acciones correctivas en caso de que se requiera. En ellos se incluyen: disposición de residuos líquidos y sólidos, procedimiento de control de plagas, procedimiento de limpieza y desinfección.

Los artículos 41, 42, 43, 44 de la misma normativa determina procedimientos para el control de procesos, sin especificar que cada lugar de sacrificio y/o expendio debe tener procedimientos de verificación para tolerancia, cero en materia fecal, *E.coli* dentro de los parámetros, *Salmonella* dentro de los parámetros, que contengan periodicidad de la muestra, resultados y registro de acciones correctivas y preventivas, por lo tanto para dar cumplimiento a la norma es importante definir el procedimiento para tomar el muestreo, con fechas o periodicidad, laboratorio que realice el análisis y forma de obtener la toma.

El decreto 1500 de 2007 se expide para toda explotación avícola, y establece el reglamento técnico a través del cual se crea el Sistema Oficial de Inspección, Vigilancia y Control de la Carne, productos cárnicos comestibles y derivados cárnicos destinados para el consumo humano y los requisitos sanitarios y de inocuidad que se deben cumplir en su producción primaria, beneficio, desposte, desprese, procesamiento, almacenamiento, transporte, comercialización, expendio, importación o exportación<sup>30</sup>.

Este decreto exige que para la inspección ante-mórtem el inspector oficial verifique la información recibida de la producción primaria (granja). Aquí el decreto no es claro sobre qué información debe remitir la granja. Se propone un formato, firmado por el respectivo M. V. o M. V. Z., la edad de las aves, tiempo de ayuno, condiciones sanitarias, suministro de medicamentos (vía de aplicación, duración del tratamiento y tiempo de retiro).

El decreto tampoco explica qué hacer en caso de que las aves no pasen la inspección ante-mórtem. Se propone que en caso de que la inspección ante-mórtem (que la realiza el inspector oficial del Invima a la llegada de los animales a la planta de beneficio) dé como resultado la detección de enfermedades infecto-contagiosas, el ICA deba ser avisado de inmediato para que proceda a la toma de muestras y sugiera la forma de eliminación de los animales.

## **Normas seguridad alimentaria**

Los programas de seguridad alimentaria con fines comerciales o de autoconsumo o cualquier programa enfocado hacia la distribución de aves en el ámbito nacional se reglamentan por la resolución 2101 de 2007<sup>31</sup> que se aplica para toda entidad de naturaleza gubernamental o no gubernamental, que planea la distribución de aves con fines de seguridad alimentaria o comercial. Para este caso, sólo podrán ser entregadas gallinas ponedoras entre 15 y 16 semanas de edad.

El artículo 2 especifica los requisitos que debe cumplir la granja proveedora, entre los que se incluyen: registro actualizado de la granja ante el ICA, caracterización de la granja en el sistema SICAV (Sistema Integrado de Caracterización de Granjas Avícolas) y certificado expedido por el ICA sobre el estatus sanitario de la granja de levante.

La granja deberá cumplir las condiciones mínimas de bioseguridad establecidas en la normativa vigente, pero la resolución no especifica qué es

el SICAV, ni dónde se realiza este procedimiento; es por esto que la granja debe ser certificada como biosegura según la resolución 1183 de 2010; el SICAV es una información que la tiene ya diligenciada FENAVI en su base de datos, y para darle cumplimiento a la norma se debe completar la información expedida por el ICA tal cual como se presenta a continuación:

- Manejo de gallinaza y mortalidad: Deberá tener implementado el manejo de residuos orgánicos de conformidad con la legislación vigente:
- Gallinaza y pollinaza: sanitización, compostación.
- Mortalidad: cooker, fosa séptica, compostación.
- Casos de emergencia sanitaria: enterramiento o incineración.
- La oferta de aves no debe exceder la capacidad ocupada.
- Monitoreo trimestral contra laringotraqueitis, Newcastle e influenza aviar, demostrable en períodos no inferiores a un año.

### **Normativa medioambiente: uso de recursos**

En el decreto 3100 de 2003 se reglamenta la tasa retributiva por la utilización directa del agua como receptor de los vertimientos puntuales y se toman otras determinaciones<sup>32</sup>. La tasa retributiva es el valor que se debe pagar por kilogramo de sustancia contaminante vertida en el recurso y puede ser mínima en caso de que esta carga esté dentro de los límites permisibles y la determina el Ministerio de Medio de Ambiente.

Esta norma aplica para todas las empresas que sacrifiquen aves y que, además, realicen procesos de producción tendentes a la utilización de agua<sup>33</sup>.

Estas empresas deben tener instaladas trampas de grasa y filtros para el manejo de sustancias peligrosas, para que estos desechos no se conviertan en vertimiento a los afluentes de agua.

Se requiere tener un programa de manejo de residuos líquidos que cuente con procedimiento de toma de muestras del agua resultante del proceso productivo y que es depositada a las fuentes, y un análisis físico químico que muestre los porcentajes de productos físicos y productos químicos que esta agua arrastra y lleva a los afluentes de los ríos.

Teniendo estos resultados se puede relacionar la carga contaminante para evaluar cuál será la tasa retributiva que se pague al Estado por el uso del agua y el depósito de sustancias contaminantes que además deben ser mínimas, según los límites permisibles detallados en el decreto.

En el decreto 1713 de 2002, por el cual se reglamentan la ley 142 de 1994, la ley 632 de 2000 y la ley 689 de 2001, en relación con la prestación del servicio público de aseo, así como el decreto-ley 2811 de 1974 y la ley 99 de 1993 en relación con la Gestión Integral de Residuos Sólidos<sup>34</sup> para todas las explotaciones avícolas del país, se obliga, en los artículos 3, 4 y 6, a todos los distritos y municipios del país a prestar el servicio público de aseo a toda su población, incluyendo zonas marginadas. En el caso de las zonas rurales que carecen de estos servicios queda la duda: ¿qué solución habría para la disposición final de residuos? Para el cumplimiento del ítem se recomienda, como posible acción, reglamentar las fosas de enterramiento para residuos ordinarios (pequeños rellenos sanitarios), para los habitantes de las zonas rurales, especificando dimensiones, retiro de fuentes de agua, manejo y cierre, entre otros.

### Uso de productos químicos

Esta norma la rige la ley 55 de 1993 y la ley 101 de 1993 (artículo 65) por medio de la cual se aprueba el “Convenio # 170 y la recomendación número 177 sobre la seguridad en la utilización de los productos químicos en el trabajo” adoptados por la 77<sup>a</sup> Reunión de la conferencia general de la OIT, de Ginebra de 1990<sup>35</sup>, y es aplicada para todas las empresas y las explotaciones avícolas en Colombia; en el caso de estas últimas sólo aplican los artículos 8, 10, 11, 14 y 15.

En el artículo 11 se determina la responsabilidad de los empleadores en la transferencia de productos químicos: los empleadores deberán capacitar a los trabajadores sobre los riesgos que atañe la utilización de productos químicos y de todas las precauciones de seguridad que se deben tomar. Es importante tener en cuenta los recipientes en los que se re-ensaven productos: deberán marcarse con el producto que se encuentre y rasgar la anterior etiqueta.

En el artículo 14 se aplica a la responsabilidad de los empleadores y a la eliminación los productos químicos peligrosos que no se necesiten más; los recipientes que han sido vaciados, pero que pueden contener residuos de productos químicos peligrosos, deberán ser manipulados o eliminados de manera que se eliminen o reduzcan al mínimo los riesgos para la seguridad y la salud, así como para el medioambiente, de conformidad con la legislación y la práctica nacionales.

### Referencias bibliográficas

1. RIVERA GARCIA, Oscar. Historia de la Industria Avícola Colombiana. 1 ed. Bogotá: Deltapres Comunicaciones, 2003. 500 p.
2. *Ibíd.*
3. COLOMBIA. SUPERINTENDENCIA DE SOCIEDADES, GRUPO DE ESTADISTICA. Sector Avícola Colombiano. Bogotá: La Superintendencia, 2007. 26 p.
4. *Ibíd.*
5. *Ibíd.*
6. MORA SORIANO, José Daniel. Avicultura en Colombia. Medellín: Universidad Nacional de Colombia - Facultad de Ciencias Agropecuarias. 7 p.
7. ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE SANIDAD ANIMAL. Enfermedades de la Lista de la OIE. [en línea]. Paris, France: OIE, 2011. [Citado el 12 de febrero de 2011]. Disponible en: <[www.oie.int/es/sanidad-animal-en-el-mundo/enfermedades-de-la-lista-de-la-oie-2011](http://www.oie.int/es/sanidad-animal-en-el-mundo/enfermedades-de-la-lista-de-la-oie-2011)>.
8. \_\_\_\_\_. Animal health situation. [en línea]. Paris, France: OIE, 2011. [Citado el 12 de febrero de 2011] Disponible en: <[http://web.oie.int/wahis/public.php?page=country\\_status&year=2010](http://web.oie.int/wahis/public.php?page=country_status&year=2010)>.
9. VILLA ORTEGA, Humberto. Actualización de la normatividad ambiental aplicable al sector avícola colombiano. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. 8 p.
10. COLOMBIA. INSTITUTO COLOMBIANO AGROPECUARIO. Resolución 811 (Marzo 3 de 1992). Por la cual se establece plan de vacunación avícola y se deroga la resolución 957 de 1986. Bogotá: El Instituto, 1986. 4 p.
11. \_\_\_\_\_. \_\_\_\_\_. Resolución 1476 (Septiembre 10 de 1976). Por la cual se reglamenta la Resolución 261 de 1975, sobre el control de la Salmonellosis en las aves de corral. Bogotá: El Instituto, 1975. 5 p.
12. \_\_\_\_\_. \_\_\_\_\_. Resolución 1056 (Abril 17 de 1996): Por la cual se dictan disposiciones sobre el control técnico de los insumos pecuario y se derogan las resoluciones 710 de 1981, 2218 de 1980 y 444 de 1993. Bogotá: El Instituto, 1993. 24 p.
13. \_\_\_\_\_. \_\_\_\_\_. Resolución 1698 (Junio 27 de 2000). Por el cual se dictan disposiciones sobre productores de alimentos para animales con destino al autoconsumo. Bogotá: El Instituto, 2000. 7 p.
14. \_\_\_\_\_. \_\_\_\_\_. Resolución 150 (Enero 21 de 2003). Por la cual se adopta el reglamento técnico de fertilizantes y acondicionadores de suelos para Colombia. Bogotá: El Instituto, 2003. 18 p.
15. \_\_\_\_\_. \_\_\_\_\_. Resolución 968 (Marzo de 2010). Por medio de la cual se modifica la resolución 150 de 2003. BOGOTA. 5p

16. \_\_\_\_\_. Ley 1255 (Noviembre 28 de 2008). Por el cual se declara de interés social nacional y como prioridad sanitaria la creación de un programa que preserve el estado sanitario de país libre de influenza aviar, así como el control y erradicación de la enfermedad del Newcastle en el territorio nacional y se dictan otras medidas encaminadas a fortalecer el desarrollo del sector avícola nacional. Bogotá: El Instituto, 2008. 8p.
17. \_\_\_\_\_. Resolución 587 (Diciembre 27 de 1973). Por la cual se dictan medidas para el control de la enfermedad de Mark en las aves de corral. Bogotá: El Instituto, 1973. 3p.
18. \_\_\_\_\_. Resolución 1937 (Julio 22 de 2003). Por la cual se establecen medidas sanitarias para la prevención y el control de la enfermedad de Newcastle en el territorio nacional. Bogotá: El Instituto, 2003. 5 p.
19. \_\_\_\_\_. Resolución 375 (Febrero 27 de 2004). Por la cual se dictan las disposiciones sobre Registro y Control de los Bioinsumos y Extractos Vegetales de uso agrícola en Colombia. Bogotá: El Instituto, 2004. 34 p.
20. \_\_\_\_\_. Resolución 2896 (Octubre 10 de 2005). Por la cual se dictan disposiciones sanitarias para la construcción de nuevas granjas avícolas en el territorio nacional. Bogotá: El Instituto, 2005. 4 p.
21. \_\_\_\_\_. Resolución 3654 (Septiembre 28 de 2009). Por medio de la cual se adopta el programa para el control y erradicación de la enfermedad de Newcastle en el territorio nacional. Bogotá: El Instituto, 2009. 5 p.
22. \_\_\_\_\_. Resolución 1183 (Marzo 25 de 2010). Por medio de la cual se establecen las condiciones de Bioseguridad que deben cumplir las granjas avícolas comerciales en el país para su certificación. Bogotá: El Instituto, 2010. 7 p.
23. COLOMBIA. MINISTERIO DE SALUD. Ley 9 (Enero 24 de 1979). Por la cual se dictan medidas sanitarias. Bogotá: El Ministerio, 1979. 82 p.
24. \_\_\_\_\_. Decreto 3075 de 1997. Por el cual se reglamenta parcialmente la Ley 09 de 1979 y se dictan otras disposiciones. Bogotá: El Ministerio, 1997. 47 p.
25. \_\_\_\_\_. Decreto 60 (Enero 18 de 2002). Por el cual se promueve la aplicación del sistema de análisis de peligros y puntos de control crítico - Haccp en las fabricas de alimentos y se reglamenta el proceso de certificación. Bogotá: El Ministerio, 2002. 7 p.
26. COLOMBIA. MINISTERIO DE LA PROTECCIÓN SOCIAL. Resolución 4287 (Noviembre 21 de 2007). Por la cual se establece el reglamento técnico sobre los requisitos sanitario y de inocuidad de la carne y productos cárnicos comestibles de las aves de corral destinadas para el consumo humano y las disposiciones para su beneficio, desprese, almacenamiento, transporte, comercialización, expendio, importación o exportación. Bogotá: El Ministerio, 2007. 43 p.
27. \_\_\_\_\_. Decreto 1500 (Mayo 4 de 2007). Por el cual se establece el reglamento técnico a través del cual se crea el Sistema Oficial de Inspección,

- Vigilancia y Control de la Carne, Productos Cárnicos Comestibles y Derivados Cárnicos Destinados para el Consumo Humano y los requisitos sanitarios y de inocuidad que se deben cumplir en su producción primaria, beneficio, desposte, desprese, procesamiento, almacenamiento, transporte, comercialización, expendio, importación o exportación. Bogotá: El Ministerio, 2007. 41 p.
28. COLOMBIA. INSTITUTO COLOMBIANO AGROPECUARIO. Resolución 2101 (Julio 27 de 2007). Por la cual se reglamentan los programas de seguridad alimentaria con fines comerciales o de autoconsumo o cualquier programa enfocado hacia la distribución de aves Nivel Nacional. Bogotá: El Ministerio, 2007. 6 p.
  29. \_\_\_\_\_. \_\_\_\_\_. Resolución 2833 (Octubre 29 de 2007). Por la cual se modifica la Resolución 2101 de 2007. Bogotá: El Ministerio, 2007. 3 p.
  30. COLOMBIA. MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL. Decreto 3100 (Octubre 30 de 2003). Por medio del cual se reglamentan la tasa retributiva por la utilización directa del agua como receptor de los vertimientos puntuales y se toman otras determinaciones. Bogotá: El Ministerio, 2003. 12 p.
  31. \_\_\_\_\_. \_\_\_\_\_. Decreto 1713 (Agosto 6 de 2002). Por el cual se reglamenta la Ley 142 de 1994, la Ley 632 de 2000 y la Ley 689 de 2001, en relación con la prestación del servicio público de aseo, y el Decreto Ley 2811 de 1974 y la Ley 99 de 1993 en relación con la Gestión Integral de Residuos Sólidos. Bogotá: El Ministerio, 2002. 3 p.
  32. \_\_\_\_\_. \_\_\_\_\_. Decreto 3100 (Octubre 30 de 2003). Por medio del cual se reglamentan la tasa retributiva por la utilización directa del agua como receptor de los vertimientos puntuales y se toman otras determinaciones Op. cit., 12 p.
  33. \_\_\_\_\_. \_\_\_\_\_. Decreto 1713 (Agosto 6 de 2002). Por el cual se reglamenta la Ley 142 de 1994, la Ley 632 de 2000 y la Ley 689 de 2001, en relación con la prestación del servicio público de aseo, y el Decreto Ley 2811 de 1974 y la Ley 99 de 1993 en relación con la Gestión Integral de Residuos Sólidos., Op. cit., 3 p.
  34. *Ibíd.*
  35. COLOMBIA. MINISTERIO DEL TRABAJO Y SEGURIDAD SOCIAL. Ley 55 (Julio 2 de 1993). Por medio de la cual se aprueba el “Convenio # 170 y la recomendación numero 177 sobre la seguridad en la utilización de los productos químicos en el trabajo” adoptados por la 77<sup>a</sup>. Reunión de la conferencia general de la O.I.T., ginebra, 1990. Bogotá: El Ministerio, 1993. 32 p.



# Antioxidantes: importancia biológica y métodos para medir su actividad

Julian Londoño Londoño

## Resumen

La actividad antioxidante es la capacidad de una sustancia para inhibir la degradación oxidativa (por ejemplo, la peroxidación lipídica), de tal manera que un antioxidante actúa, principalmente, gracias a su capacidad para reaccionar con radicales libres y, por lo tanto, recibe el nombre de antioxidante terminador de cadena. Sin embargo, es necesario distinguir también entre actividad estabilizadora de radicales libres o anti-radicalaria (en inglés, scavenger) y actividad antioxidante. La primera está determinada completamente por la reactividad de un antioxidante frente a radicales libres, lo cual puede ser caracterizado por la velocidad de esa reacción. Por su parte, la segunda mide la capacidad para retardar la degradación oxidativa. Por lo tanto, una alta actividad anti-radicalaria no siempre correlaciona con una alta actividad antioxidante; en particular, algunos compuestos fenólicos sintéticos presentan alta reactividad frente a radicales libres, pero muestran moderada actividad antioxidante.

De hecho, hasta ahora, no existen métodos mundialmente unificados para medir capacidad antioxidante, en parte, debido a la disparidad de condiciones en las cuales se desarrollan estas metodologías, además de la complejidad de los sistemas y de la diversidad de matrices que necesitan ser evaluadas.

---

\* PhD. Químico Farmacéutico, Docente, Programa de Ingeniería de Alimentos, Facultad de Ingenierías, Corporación Universitaria Lasallista.

Grupo de Investigación en Ingeniería de Alimentos – GRIAL.

En general, el objetivo de este trabajo es presentar una revisión actualizada de los conceptos fundamentales de los antioxidantes, abarcando desde los radicales libres de importancia biológica, hasta los sistemas de defensa antioxidante y los métodos para medir esta actividad.

**Palabras clave:** antioxidantes, métodos, estrés oxidativo, radicales libres.

## Antioxidants: biological relevance and methods to measure their activity

### Abstract

Anti oxidative activity is the capability of a substance to inhibit the oxidative degradation (lipid peroxidation, for instance), in such a way that an antioxidant acts, mainly, thanks to its capability to react with free radicals and, therefore, it is called a chain terminator antioxidant. It is, nonetheless, necessary to differentiate between the stabilization activity of free radicals, or scavenging, and antioxidant activity. The first is completely determined by the reactivity of an antioxidant before free radicals, and can be characterized according to the velocity of such reaction. The second measures the capability to retard the oxidative degradation. Therefore, a high scavenging does not necessarily correlates a high anti oxidative activity. Particularly, some phenolic synthetic compounds are highly reactive before free radicals, but have a moderated anti oxidative activity. As a matter of fact, there are not standardized measurement methods for anti oxidative capability so far, partly due to the disparity of the conditions under which these methods are developed, plus the complexity of the systems and the diversity of matrices to be evaluated. The objective of this work is to present an updated revision of the anti oxidant's main concepts, from the biologically pertinent free radicals to the anti oxidant defense systems and the methods for measuring this activity.

**Key words:** antioxidants, methods, oxidative stress, free radicals.

### Introducción

Los antioxidantes fueron comunes en la industria química y de alimentos durante los siglos XIX y XX. En la industria química se habían estu-

diado los antioxidantes, un grupo de compuestos caracterizados por su capacidad de oxidarse en lugar de otras sustancias presentes en el medio de reacción. Su uso varió, pasando de aditivos en la vulcanización del caucho hasta conservantes de alimentos. Sin embargo, fue solo hasta los años 60 cuando algunos estudios revelaron la importancia de los antioxidantes en la salud, con publicaciones acerca del efecto de los flavonoides, el ácido ascórbico y el estrés oxidativo en el cáncer<sup>1</sup>. La expansión en la investigación de los antioxidantes se vería en las décadas subsiguientes, en donde varios investigadores se dedicaron a estudiar el efecto protector de los antioxidantes en diferentes patologías, intentando entender sus mecanismos y blancos moleculares<sup>2</sup>. En cuanto los hallazgos se difundían, el mercado crecía. Para los años 90 el uso de los antioxidantes se había popularizado en los Estados Unidos de América, de tal manera que la mitad de la población consumía suplementos dietarios, un tercio tomaba multivitamínicos y alrededor de una octava parte de la población consumía periódicamente suplementos de vitaminas E y C<sup>3</sup>.

La suplementación con antioxidantes está fundamentada en estudios epidemiológicos y clínicos que demuestran la estrecha relación entre factores como: dieta, estilo de vida, exposición a radiación, metales, pesticidas, tóxicos, y algunos medicamentos; con la aparición y desarrollo de enfermedades como cáncer, diabetes, aterosclerosis, desórdenes neurodegenerativos y envejecimiento. Todas estas condiciones patológicas están asociadas a un estado conocido como “estrés oxidativo”, es decir, un aumento en las especies oxidantes (principalmente Especies Reactivas del Oxígeno—EROs) y/o una disminución en los mecanismos de detoxificación de ellas.

Las ERO, según su propio nombre, presentan una reactividad más alta que el oxígeno molecular. Algunas de ellas pueden ser radicales libres, es decir, moléculas o fragmentos moleculares que contienen uno o más electrones desapareados en orbitales atómicos o moleculares. Este electrón desapareado confiere un grado considerable de reactividad al radical libre logrando además que pueda existir de forma independiente por cortos períodos de tiempo<sup>4</sup>.

De estas especies reactivas, las más frecuentes y entre ellas las más relevantes en los sistemas biológicos son: el anión superóxido ( $O_2^{\cdot-}$ ), el radical hidroxilo ( $HO^{\cdot}$ ) y los radicales formados en la oxidación de ácidos grasos poliinsaturados (alcoxilo ( $alKO^{\cdot}$ ) y alquilperoxilo ( $alKOO^{\cdot}$ )). Entre

las ERO no radicales se encuentran el peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ) y el ácido hipocloroso ( $HOCl$ ).

Por otra parte, además de las ERO, existen también especies reactivas del nitrógeno (ERN) como el óxido nítrico ( $NO^*$ ) radical del dióxido de nitrógeno ( $NO_2^*$ ), y formas no radicales, como el anión del peroxinitrito ( $ONOO^-$ ), el ácido peroxinitroso ( $ONOOH$ ), el anión del nitrosoperoxicarbonato ( $ONOOCO_2^-$ ), el catión nitronium ( $NO_2^+$ ), y el trióxido del dinitrogeno ( $N_2O_3$ ), los cuales, junto con las ERO se generan continuamente en cantidades pequeñas en procesos celulares normales como la señalización celular, la neurotransmisión, la relajación del músculo, el peristaltismo, la agregación de las plaquetas, la modulación de la presión arterial, el control del sistema inmune, la fagocitosis, la producción de la energía celular, la regulación del crecimiento celular, la síntesis de componentes biológicos importantes y el metabolismo de xenobióticos<sup>5,6</sup>.

A escala biológica, una de las principales fuentes de radicales libres son las enzimas; algunas de ellas producen radicales como intermediarios catalíticos; esto ocurre generalmente para las enzimas que metabolizan xenobióticos, los cuales son oxidados o reducidos por intercambio de un solo electrón para formar radicales intermediarios<sup>7</sup>. Las más importantes enzimas del metabolismo de xenobióticos son:

- Citocromo P450: es una enorme y diversa superfamilia de hemoproteínas que actúan principalmente como función monoxigenasa.
- Peroxidasas, en particular prostaglandina H sintasa, y en poco grado la metamioglobina.
- Flavoproteínas: en particular las que se involucran en la cadena transportadora de electrones con función oxidasa.

Entre los radicales endógenos que actúan como intermediarios del metabolismo celular se encuentran: los derivados de coenzimas, por ejemplo la oxidación de un solo electrón del  $NAD(P)H$  puede producir  $NADP^*$ ; radicales derivados del glutatión ( $GSH$ ), radical til ( $GS^*$ ). Este proceso ocurre cuando el  $GSH$ , la molécula tiolada más concentrada y soluble en la célula, reacciona con el radical anión superóxido ( $O_2^*$ ) o el radical hidroxilo ( $HO^*$ ); este es un mecanismo de protección natural contra radicales más reactivos; y finalmente los radicales derivados de ácidos grasos poliinsaturados, donde estos últimos son blancos muy sensibles para la iniciación de una reacción en cadena mediada por radicales<sup>8</sup>.

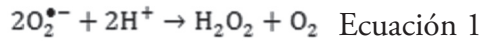
Otra fuente relevante de producción de radicales libres en el plano biológico es la respiración celular. El oxígeno molecular (también llamado oxígeno triplete ( $^3\Sigma_g O_2$ )), que mantiene la vida de todos los organismos aerobios, resulta ser tóxico, pero su reactividad en sistemas biológicos es de una tasa bastante lenta. Sin embargo, puede llegar a ser altamente tóxico gracias a uno de los conceptos más atractivos en la toxicología moderna como es la activación metabólica, que afirma “que algunas sustancias altamente tóxicas no lo son por sí mismas, pero su toxicidad puede llegar a ser bastante alta debido a que son metabólicamente transformadas en uno o más intermediarios altamente reactivos que pueden reaccionar con componentes celulares”. Tal es el caso del estado molecular del oxígeno, el cual no es tóxico ya que su propia reactividad es baja en condiciones fisiológicas, pero resulta bastante tóxico si es activado metabólicamente a la forma singulete. Esta activación metabólica resulta del hecho de que, en sistemas biológicos, la reducción de  $O_2$  a  $H_2O$  en la cadena transportadora de electrones se da por la transferencia de un electrón para formar radicales o especies moleculares reactivas<sup>9</sup>.

## Especies reactivas de importancia biológica

### Radical superóxido ( $O_2^{\cdot-}$ ) e hidroperoxilo ( $HO_2^{\cdot}$ )

El anión superóxido es formado por la reducción univalente del oxígeno molecular en estado triplete  $^3O_2$  que llena uno de los orbitales  $\pi^*2p$  con la adición de un electrón que tiene un spin inverso. Es considerado la ERO “primaria” y puede interactuar de nuevo con otras moléculas para generar una ERO “secundaria”, frecuentemente por procesos enzimáticos o catalizado por metales. El  $O_2^{\cdot-}$  puede ser protonado para dar dióxido de hidrógeno, peridroxilo, hidrodioxilo o radical hidroperoxilo ( $HO_2^{\cdot}$ ). La generación de  $O_2^{\cdot-}$  se da a partir de radiólisis del oxígeno molecular, fotólisis del agua y por más radicales orgánicos formados en células aeróbicas como lo son ( $NAD^{\cdot}$ ), ( $FpH^{\cdot}$ ), radicales semiquinona, radical piridinio catión o por hemoproteínas. Igualmente, es producido por leucocitos fagocíticos como producto inicial de la explosión respiratoria al consumir  $O_2$ . El radical  $O_2^{\cdot-}$  no reacciona directamente con los polipéptidos, los azúcares, o los ácidos nucleicos, y su capacidad de peroxidizar los lípidos es polémica<sup>10,11</sup>.

El superóxido se agota al experimentar una reacción de dismutación catalizada por la enzima superóxido dismutasa (SOD), de acuerdo con **Ecuación 1**.



### Peróxido de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ )

Algunos sistemas biológicos que generan  $\text{O}_2^{\bullet-}$  producirán  $\text{H}_2\text{O}_2$  por dismutación. El  $\text{H}_2\text{O}_2$  es la segunda especie molecular en los pasos de la reducción univalente del oxígeno molecular. Esto corresponde a la ocupación del segundo orbital  $\pi^*2p$  antienlazante. El  $\text{H}_2\text{O}_2$  no es un radical, ya que todos sus orbitales contienen dos electrones con spins antiparalelos. Este también es el más estable y el menos reactivo de los productos de la reducción del oxígeno molecular. Es un producto generado por diferentes oxidasas, principalmente oxidasas peroxisomales, y algunas enzimas mitocondriales. En condiciones biológicas, el  $\text{H}_2\text{O}_2$  es un oxidante débil que puede oxidar grupos tiol de proteínas o grupos acilo poliinsaturados en lípidos. Sin embargo, la reacción del  $\text{H}_2\text{O}_2$  con hierro ( $\text{Fe}^{2+}$ ) u  $\text{O}_2^{\bullet-}$  genera un radical más reactivo, el radical hidroxilo ( $\text{HO}^{\bullet}$ ). Además, el peróxido de hidrógeno puede reaccionar con cloruro ( $\text{Cl}^-$ ) en presencia de mieloperoxidasas para generar ácido hipocloroso ( $\text{HClO}$ ) y puede formar puentes de hidrógeno estables y complejos con los pares de bases de ácidos nucleicos lo que genera alta reactividad sobre el ADN<sup>12</sup>.

### Radical hidroxilo ( $\text{HO}^{\bullet}$ )

Los principales procesos que producen radical hidroxilo son:

- Radiólisis (rayos X, rayos gamma), sonólisis, fotólisis del agua empleando una longitud de onda alrededor de 350 nm y fotólisis del  $\text{H}_2\text{O}_2$  con luz UV.
- Reducción univalente del peróxido de hidrógeno  $\text{H}_2\text{O}_2$  por:
  - $\text{O}_2^{\bullet-}$  en la reacción de Haber Weiss.
  - $\text{Fe}^{2+}$  (o otros iones metálicos tales como  $\text{Cu}^{2+}$ ) en la reacción de Fenton.
  - $\text{NO}^{\bullet}$
- Por descomposición fotolítica de alquilhidroperóxidos.

El radical hidroxilo ( $\text{HO}^{\bullet}$ ) es una de las especies químicas más reactivas producida en organismos vivos; es tan altamente reactiva que el sitio de formación es el mismo sitio de reacción. El  $\text{HO}^{\bullet}$  solo se difunde cerca de 5 a 10 diámetros moleculares antes de reaccionar. Esta reacción tiene una

tasa de velocidad extremadamente alta con proteínas, lípidos, ácidos nucleicos, y ácidos orgánicos; y relativamente alta con estructuras aromáticas y alifáticas ( $10^7$  a  $10^9 \text{ M}^{-1}\text{s}^{-1}$ )<sup>13</sup>.

El radical inicia reacciones en cadena por abstracción de un átomo de H, pero también es un poderoso oxidante que fácilmente captura electrones para formar  $\text{HO}^\bullet$ . Aún más, el  $\text{HO}^\bullet$  puede añadirse a anillos aromáticos y olefinas o se puede dimerizar para formar  $\text{H}_2\text{O}_2$ . Los mayores blancos donde pueden provocar daños los efectos del radical hidroxilo en sistemas biológicos son los ácidos nucleicos, las proteínas y los ácidos grasos poliinsaturados<sup>14</sup>.

### Radical peroxilo $\text{ROO}^\bullet$

Un radical típico derivado del oxígeno formado en sistemas vivos son los radicales peroxilo ( $\text{ROO}^\bullet$ ). Este tipo de radicales son especies altamente energéticas con un potencial de reducción en un rango de +0.77 a +1.44V, dependiendo del grupo sustituyente (R). El radical más simple del peroxilo es el radical dioxil (hidroperoxil  $\text{HOO}^\bullet$ ).

Las características interesantes de los radicales peroxilo están en la diversidad de reacciones biológicas en las cuales participan. La detección y la medida de la peroxidación lipídica son citadas con más frecuencia como evidencia para apoyar la implicación de las reacciones del radical peroxilo en procesos deletéreos. Los radicales peroxilo están implicados, al igual que el  $\text{HO}^\bullet$ , en el rompimiento del ADN y modificación de las proteínas<sup>15</sup>.

### Radical $\text{NO}^\bullet$

El óxido nítrico ( $\text{NO}^\bullet$ ) es un radical abundante que actúa como una molécula oxidativa biológicamente importante, actúa como señalizador en una gran variedad de procesos fisiológicos, incluyendo la neurotransmisión, la regulación de la presión arterial, mecanismos de defensa, relajación del músculo liso y regulación inmune. Esta pequeña molécula contiene un electrón desapareado en el orbital  $2\pi^*$  antienlazante y es, por lo tanto, un radical. El  $\text{NO}^\bullet$  es generado en los tejidos biológicos por la enzima óxido nítrico sintetasa, que metaboliza la conversión de arginina a citrulina con la concomitante formación de  $\text{NO}^\bullet$ <sup>16</sup>.

Las células del sistema inmune producen el anión superóxido y el óxido nítrico durante los procesos inflamatorios. Bajo estas condiciones, el óxido

nítrico y el anión superóxido pueden reaccionar para producir cantidades significativas de una molécula mucho más activa, el anión peroxinitrito ( $\text{ONOO}^-$ ), el cual puede causar fragmentación del ADN y oxidación lipídica<sup>17</sup>.

El  $\text{NO}^\bullet$  puede ser convertido a otra variedad de especies reactivas del nitrógeno tales como catión nitroso ( $\text{NO}^+$ ) o anión nitroxilo ( $\text{NO}^-$ )<sup>18</sup>

La exposición a radicales libres de una variedad de fuentes ha hecho que los organismos desarrollen una serie de mecanismos de defensa que incluyen: 1) remoción catalítica de radicales libres por enzimas como catalasa (CAT), superóxido dismutasa (SOD), glutatión peroxidasa (GPx). 2) unión de proteínas a metales prooxidantes como hierro y cobre (transferrina, ceruloplasmina). 3) protección contra daño, como las proteínas de choque térmico y 4) estabilización de radicales libres con donadores de protones o electrones como glutatión (GSH), vitamina E (tocoferol), vitamina C (ácido ascórbico), bilirrubina y ácido úrico.

## Sistemas de defensa enzimático

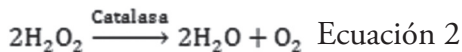
### Superóxido dismutasa (SOD)

Es la enzima que cataliza la dismutación de  $\text{O}_2^{\bullet-}$  a especies menos reactivas ( $\text{O}_2$  y  $\text{H}_2\text{O}_2$ ). En células de mamíferos existen dos tipos de SOD descritas: la enzima Cu-Zn localizada en el citosol y la enzima Mn principalmente en mitocondria. Aunque esta última enzima está bajo control de procesos reguladores inducidos, por ejemplo, por interleuquina 6 y los glucocorticoides, ambas enzimas catalizan la reacción de dismutación con la misma eficiencia<sup>19</sup>.

### Catalasa

El peróxido de hidrógeno es producido por una reducción divalente del oxígeno molecular o por dismutación del  $\text{O}_2^{\bullet-}$ . El peróxido de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) parece ser un buen candidato para explicar algunas de los efectos producidos por las especies reactivas del oxígeno. De hecho, el  $\text{H}_2\text{O}_2$  es una molécula estable, no es un radical, y se puede difundir a través de membranas biológicas. La catalasa (CAT) es una enzima presente en las plantas, animales y bacterias aeróbicas; está localizada en los peroxisomas y es muy eficiente en la conversión de peróxido de hidrógeno a agua y a oxígeno molecular. Cada molécula de esta enzima es capaz de convertir 6

millones de moléculas de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> a agua y oxígeno por cada minuto. La reacción catalítica utiliza dos moléculas de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> sin utilización de otro tipo de sustrato, tal como se muestra en la **Ecuación 2**<sup>20, 21</sup>.



La CAT ha sido utilizada como agente terapéutico para tratar procesos en los que el H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ha sido involucrado como el mayor agente deletéreo, tal como lesión inflamatoria, y xeroderma pigmentoso.

## Antioxidantes no enzimáticos

### Vitamina E

Este es el nombre genérico de una familia homogénea de compuestos que tienen en su estructura una porción hidroquinona metilada en mayor o menor grado y una cadena isoprenoide. El α-tocoferol, el componente más abundante de la vitamina E, es bien conocido y representa la mayor posibilidad de prevención de la peroxidación de membrana por estabilización de radicales peroxilo. La vitamina E tiene un grupo hidroxilo fenólico responsable de su actividad estabilizadora de radicales libres y una cadena (C<sub>16</sub>H<sub>33</sub>) que favorece su inserción en la región lipídica de la bicapa. En sistemas biológicos, una molécula de vitamina E permite proteger 10.000 moléculas de ácidos grasos insaturados<sup>22</sup>.

Como se muestra en la figura 1A, la vitamina E puede reaccionar con radicales lipídicos peroxilo, para formar vitamina E radical que es poco reactiva como para reaccionar con ácidos grasos poliinsaturados, actuando en la reacción de peroxidación lipídica como terminador de cadena. La vitamina E radical producida es estable porque el electrón desapareado del átomo de oxígeno puede ser deslocalizado dentro de la estructura del anillo aromático<sup>23</sup>.

### Vitamina C (Ácido ascórbico)

La vitamina C es un antioxidante que actúa en medios acuosos, como el líquido pleural, el fluido ocular y el espacio intersticial. Actúa en combinación con otros antioxidantes primarios como la vitamina E y los carotenoides, así como en conjunto con las enzimas antioxidantes. La vitamina C coopera con la Vitamina E regenerando el α-tocoferol desde el radical α-tocoferilo en membranas y lipoproteínas. La mayoría de plantas y animales sintetizan ácido ascórbico a partir de la glucosa; sin embargo, los

humanos son incapaces de sintetizarlo y requieren obtenerlo de la dieta. El ácido ascórbico es requerido como un cofactor para la actividad enzimática, y su deficiencia dietética causa una enfermedad conocida como escorbuto.

Como se aprecia en la figura 1B, la donación de un electrón por el ácido ascórbico produce el radical semidihidroascorbil, que puede ser nuevamente oxidado para dar dihidroascorbato. El ácido ascórbico es el único antioxidante endógeno en plasma que puede proteger contra el daño peroxidativo inducido por radicales peroxilo<sup>24</sup>.

### Carotenoides

El  $\beta$ -caroteno ha sido referido como una provitamina A, debido a su capacidad de ser metabolizado en animales a la vitamina A. El  $\beta$ -caroteno se divide para formar dos moléculas de retinaldehído, una fracción de menor importancia se oxida irreversiblemente a ácido retinoico; la cantidad restante es reducida a retinol. El papel biológico de los carotenoides no está limitado solamente a la producción de retinoides o a la protección del aparato fotosintético de plantas contra el daño de la luz; también se ha demostrado que: previene el daño por fotosensibilidad en bacterias, animales y humanos; disminuye el daño genético y las transformaciones malignas; inhibe la inducción tumoral provocada por los rayos UV y agentes químicos y disminuye las lesiones premalignas en humanos. Su principal mecanismo de estabilización de radicales libres (figura 1C) está determinado por su capacidad para estabilizar el oxígeno singlete y convertirlo nuevamente a su forma menos reactiva (triplete) a expensas de una activación intramolecular<sup>25</sup>.

### Flavonoides

Los flavonoides son compuestos fenólicos con amplia distribución en plantas. Estructuralmente consisten de dos anillos bencénicos (anillos A y B) unidos por un heterociclo piránico (anillo C). Biosintéticamente son de origen mixto, pues el anillo A proviene de la ruta de la malonilcoenzima A, mientras que los anillos B y C provienen de la ruta del ácido shikímico. Para su estudio sistemático, los más de 4000 flavonoides descritos hasta ahora se han clasificado en varias clases de acuerdo con las variantes estructurales que presenta el anillo C. De acuerdo con esto, los flavonoides se clasifican en varios grupos: flavonas, flavonoles, flavanonas, flavanoles, antocianidinas, catequinas, epicatequinas, auronas e isoflavonoides<sup>26</sup>.

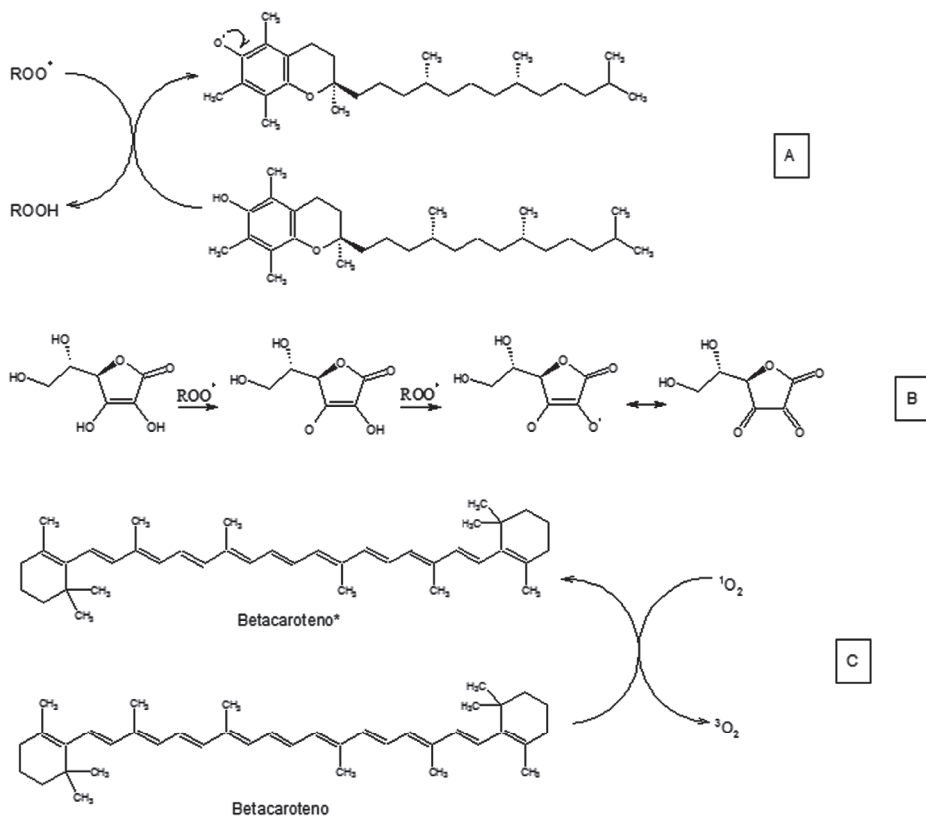


Figura 1. Mecanismo propuesto para la estabilización de radicales libres por la vitamina E ( $\alpha$ -tocoferol) (A); vitamina C (ácido ascórbico) (B); y betacaroteno (C).

Las cantidades de flavonoides y polifenoles en alimentos y plantas incluidas en la dieta humana (frutas, vegetales, té, vino, café, cacao) son mucho más altas que las cantidades de otros antioxidantes como las vitaminas C y E, lo cual hace de estos compuestos los principales antioxidantes adquiridos en la dieta<sup>27</sup>.

Los flavonoides han mostrado una fuerte actividad antioxidante en sistemas *in vitro*, principalmente gracias a su bajo potencial de oxidación lo que les confiere capacidad de estabilizar radicales libres donando electrones o átomos de hidrógeno<sup>28</sup>. Sin embargo, a pesar de su fuerte actividad *in vitro*, se ha visto que su efecto *in vivo* es limitado por varios factores, entre ellos la baja absorción, la baja biodisponibilidad y la alta tasa de depuración<sup>29</sup>.

En general, la controversia es grande, pero se acepta que una dieta rica en frutas y vegetales con alto contenido de polifenoles está asociada con una menor incidencia de enfermedades cardiovasculares, infarto, cáncer y otras enfermedades crónicas. De hecho, 7 de 12 estudios epidemiológicos que evaluaron el riesgo de enfermedades cardiovasculares reportan un efecto protector de los flavonoides<sup>30,31</sup> atribuido principalmente a su actividad antioxidante, puesto que el hecho común de estas patologías es un desbalance oxidativo<sup>32, 33</sup>.

En la figura 2 se presenta un resumen general de los mecanismos de oxidación. En el recuadro superior se esquematiza el proceso condensado de respiración celular, en donde el oxígeno molecular es convertido inicialmente a anión superóxido, luego a peróxido de hidrógeno, después a radical hidroxil y finalmente oxidado hasta agua.

En el esquema central se muestra que el metabolismo celular puede generar radicales libres tales como el anión superóxido y el radical hidroxilo. El anión superóxido puede sufrir dismutación catalizada por la enzima superóxido dismutasa para generar peróxido de hidrógeno, menos reactivo, pero igualmente tóxico para los tejidos, por lo cual es convertido a agua por acción de las enzimas catalasa o glutatión peroxidasa, esta última lleva a cabo la reducción del peróxido de hidrógeno a expensas de la oxidación del glutatión, el cual es regenerado por acción de la enzima glutatión reductasa que utiliza como cofactor el NADPH.

El peróxido de hidrógeno puede también ser convertido a radical hidroxilo mediante una reacción tipo Fenton catalizada por hierro. Una vez producido, el radical hidroxilo ataca proteínas, ácidos nucleicos y esencialmente ácidos grasos poliinsaturados, generando así radicales lipídicos que reaccionan rápidamente con oxígeno para producir radicales peroxilo, los cuales tienden a estabilizarse produciendo hidroperóxidos, que a su vez pueden ser descompuestos para generar fragmentos más pequeños (dienes conjugados) o bien, por la acción de metales de transición, generar de nuevo radicales peroxilo.

La estabilización de los radicales libres derivados de lípidos puede ser llevada a cabo por antioxidantes fenólicos como flavonoides y tocoferoles, los cuales estabilizan el radical libre generando en sí mismos radicales libres (fenoxilo y tocoferilo, respectivamente), que pueden ser estabilizados intramolecularmente por deslocalización o bien reaccionar con ácido ascórbico para regenerar el compuesto reducido.

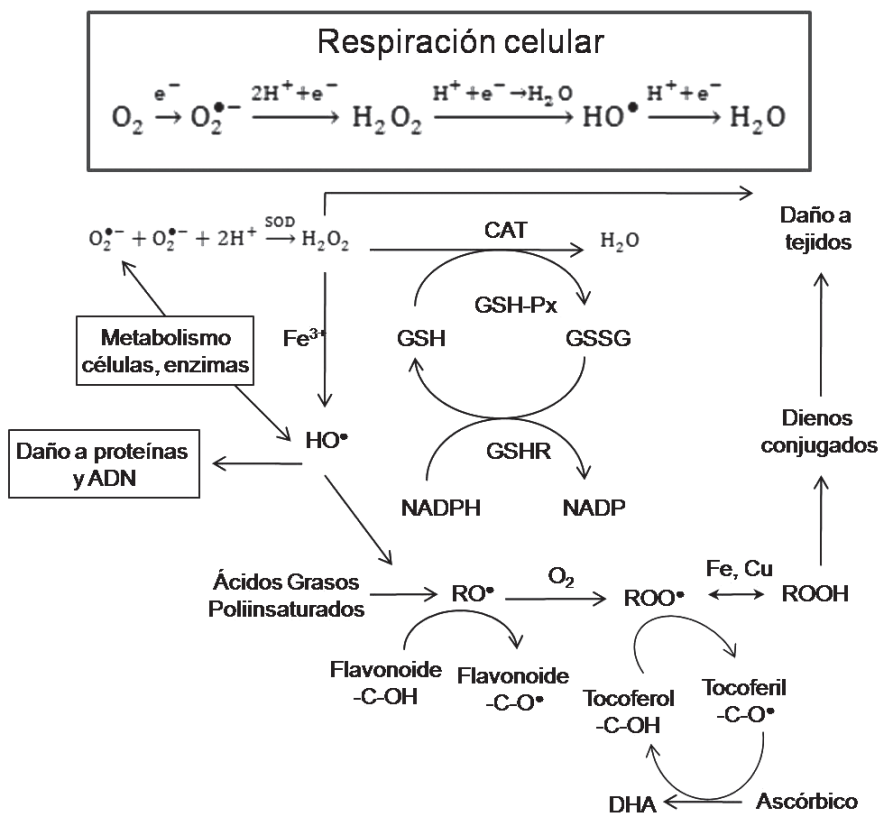


Figura 2. Resumen de las vías de producción de radicales libres y los principales sistemas antioxidantes, enzimáticos y no enzimáticos.

$O_2^{\bullet -}$ : radical anión superóxido,  $HO^{\bullet}$ : radical hidróxilo,  $RO^{\bullet}$ : radical alquilo,  $ROO^{\bullet}$ : radical peróxilo,  $ROOH$ : hidroperóxido, Fe: hierro, Cu: cobre, GSH: glutatión reducido, GSSG: glutatión oxidado, GSH-Px: glutatión peroxidasa, GSHR: glutatión reductasa, NADPH: Nicotinamida Adenina Dinucleótido Fosfato, CAT: catalasa, SOD: Superóxido Dismutasa.

### Métodos para medir actividad antioxidante

Por definición, la actividad antioxidante es la capacidad de una sustancia para inhibir la degradación oxidativa (por ejemplo, la peroxidación lipídica).

En las fuentes dietarias, la presencia de antioxidantes depende, entre otros factores, de la parte del alimento en cuestión. Por ejemplo, los monofenoles (tocoferoles principalmente) tienden a ser más abundantes en semillas donde hay grandes cantidades de grasas; por su parte los monoterpénos aromáticos son los principales componentes de las fracciones volátiles,

mientras que los polifenoles, con mayor polaridad, están presentes en frutas y constituyen una de las principales fuentes de antioxidantes dietarios.

A pesar de que los polifenoles están asociados con varios mecanismos, se cree que su principal modo de acción está relacionado con la alta reactividad hacia radicales libres. Sin embargo, debe distinguirse entre capacidad antioxidante y reactividad. Mientras que la capacidad antioxidante da información acerca de la duración del efecto antioxidante, la reactividad caracteriza solo la dinámica de inicio del efecto antioxidante a una concentración fija de compuesto<sup>34</sup>.

En el contexto de la inhibición de procesos de reacción en cadena mediados por radicales libres (por ejemplo peroxidación lipídica), un antioxidante actúa gracias a su capacidad para reaccionar con radicales libres y por lo tanto recibe el nombre de antioxidante terminador de cadena. Sin embargo, es necesario distinguir también entre actividad estabilizadora de radicales libres o anti-radicalaria (en inglés, scavenger) y actividad antioxidante. La primera está determinada completamente por la reactividad de un antioxidante frente a radicales libres, lo cual puede ser caracterizado por la velocidad de esa reacción. De otro lado, la actividad antioxidante mide la capacidad para retardar la degradación oxidativa. Por lo tanto, una alta actividad anti-radicalaria no siempre correlaciona con una alta actividad antioxidante, en particular, algunos compuestos fenólicos sintéticos presentan alta reactividad frente a radicales libres, pero muestran moderada actividad antioxidante, debido a la alta reactividad de los derivados fenoxil o semiquinona formados después de la estabilización de los radicales libres<sup>35</sup>. En conclusión, la actividad antioxidante está determinada por: 1) reactividad química del antioxidante, 2) capacidad del antioxidante para acceder hasta el sitio de reacción y 3) estabilidad de los productos formados después del proceso de estabilización de radicales libres.

La necesidad de establecer métodos unificados para medir capacidad antioxidante quedó manifestada por el Primer Congreso Internacional sobre Métodos Antioxidantes llevado a cabo en Orlando, Florida, EUA en junio del año 2004. El propósito de esta reunión fue discutir acerca de la forma en la cual se determina la capacidad antioxidante de alimentos, fitoterapéuticos, nutraceuticos y suplementos dietarios y proponer métodos analíticos que pudieran ser estandarizados como procedimientos de rutina, debido a que los métodos existentes presentan resultados inconsistentes,

no existe equivalencias entre unos y otros y la interpretación de las conclusiones, en algunos casos, va más allá del alcance de los resultados.

El argumento de esta propuesta se fundamenta en el auge cada vez más creciente en el tema de los antioxidantes. De hecho, se estima que el incremento en el número de publicaciones en esta área en los últimos 10 años fue de más del 340%, mientras que las publicaciones en las demás áreas incrementaron tan solo 39%. Esto está unido al incremento de productos con proclamas de efectos antioxidantes, lo cual impone la necesidad de tener métodos estandarizados que permitan: 1) dar una guía para una aplicación correcta del ensayo, 2) comparar entre alimentos o productos comerciales, 3) servir como una herramienta para el control de calidad, 4) proveer estándares para la regulación y las declaraciones de efectos en la salud<sup>36</sup>.

Pese a esto, hasta ahora, no existen métodos mundialmente unificados para medir capacidad antioxidante, en parte, debido a la disparidad de condiciones en las cuales se desarrollan estas metodologías, además de la complejidad de los sistemas y de la diversidad de matrices que necesitan ser evaluadas. Un método unificado para determinar capacidad antioxidante debería estar estandarizado y cumplir con los siguientes requisitos: 1) utilizar un radical biológicamente relevante, 2) ser un método simple, 3) utilizar un punto final definido y un mecanismo conocido, 4) emplear instrumentación fácilmente disponible, 5) tener buena reproducibilidad, 6) ser adaptable para medir antioxidantes lipofílicos/hidrofílicos y a diferentes radicales, 7) ser adaptable a formatos de tamizaje de alta capacidad para control de calidad de rutina en gran cantidad de muestras<sup>37</sup>.

Queda de manifiesto que ningún método reflejará por sí solo la “capacidad antioxidante total” de una muestra, puesto que este parámetro deberá expresar la capacidad de antioxidantes lipofílicos e hidrofílicos, reflejar y diferenciar los diferentes mecanismos antioxidantes y evaluar la reactividad del antioxidante frente a diferentes especies reactivas.

En la tabla 1 se resumen las características de los métodos más utilizados actualmente para medir capacidad antioxidante y más adelante se describen en detalle las particularidades de cada uno, haciendo énfasis en su principio de funcionamiento, ventajas y desventajas.

En general, existen varias aproximaciones para la clasificación de métodos para medir actividad antioxidante. Una de ellas se basa en clasificar los métodos como directos e indirectos<sup>38</sup>, mientras que otra los clasifica de acuerdo con el mecanismo mediante el cual sucede el proceso antioxidante.

En los métodos indirectos se estudia la habilidad del antioxidante para estabilizar algún radical libre, de hecho, se ha popularizado el uso de algunos radicales libres metaestables, coloreados, con fuerte absorción en el espectro visible, como herramienta para determinar actividad estabilizadora de radicales libres (Ej. DPPH, ABTS). Sin embargo, varios estudios han controvertido esta aproximación considerando que con estos métodos se puede medir solo la capacidad para donar hidrógenos, pero que, en muchos casos, no se correlacionan con la capacidad antioxidante. Por su parte, los métodos directos están basados en el estudio del efecto de un antioxidante sobre la degradación oxidativa de un sistema, de los cuales los más usados han sido: proteínas, ácidos nucleicos, plasma sanguíneo, grasas, lipoproteínas, membranas biológicas, entre otros; los lípidos constituyen el sistema más frecuente debido a la importancia de su oxidación en el desarrollo de enfermedades, así como en el deterioro de la calidad de los alimentos.

Tabla 1 Comparación de métodos para medir capacidad antioxidante basada en la instrumentación requerida, la relevancia biológica, el mecanismo antioxidante, el punto final, el método de cuantificación y la adaptabilidad para medir antioxidantes lipofílicos e hidrofílicos<sup>39</sup>.

Método	Instrumentación <sup>a</sup>	Relevancia biológica <sup>b</sup>	Mecanismo <sup>c</sup>	Punto final	Cuantificación <sup>d</sup>	Lipofílicos -hidrofílicos <sup>e</sup>
CARO	–	+++	TAH	Tiempo	ABC	+++
PATAR	++	+++	TAH	Fase de inducción	CE <sub>50</sub> , Fase de inducción	--
CRHF	---	--	TE	Tiempo	Absorbancia	---
ABTS	–	–	TE-TAH	Tiempo	Absorbancia	+++
DPPH	–	–	TE-TAH	Tiempo	Absorbancia CE <sub>50</sub>	–
Peroxidación lipídica – LDL	--	+++	TAH	Fase de inducción	Tiempo de inducción, dienos conjugados, SRAT	---

<sup>a</sup> De la más (+++) a la menos (---) especializada

<sup>b</sup> Del más (+++) al menos (---) relevante

<sup>c</sup> TAH: Transferencia de Átomos de Hidrógeno, TE: Transferencia de Electrones

<sup>d</sup> ABC: Área Bajo la Curva, CE<sub>50</sub>: Concentración efectiva 50, SRAT: Sustancias Reactivas con Ácido Tiobarbitúrico.

<sup>e</sup> Del más (+++) al menos (---) adaptable

### Métodos directos: inhibición de la peroxidación lipídica

Debido a la susceptibilidad conferida por su estructura química (enlaces dobles cis separados por un metileno alílico), los ácidos grasos poliinsaturados (AGPI) son blancos sensibles de los radicales libres, los cuales extraen fácilmente átomos de hidrogeno de los metilenos alílicos, de hecho, la oxidabilidad de los ácidos grasos insaturados depende linealmente del número de metilenos bis alílicos que estos contengan<sup>40</sup>. De manera general, la sucesión de eventos en la peroxidación lipídica pueden ser descritos como se muestra en la figura 3.

Ácido linoléico (C18:2) - AGPI

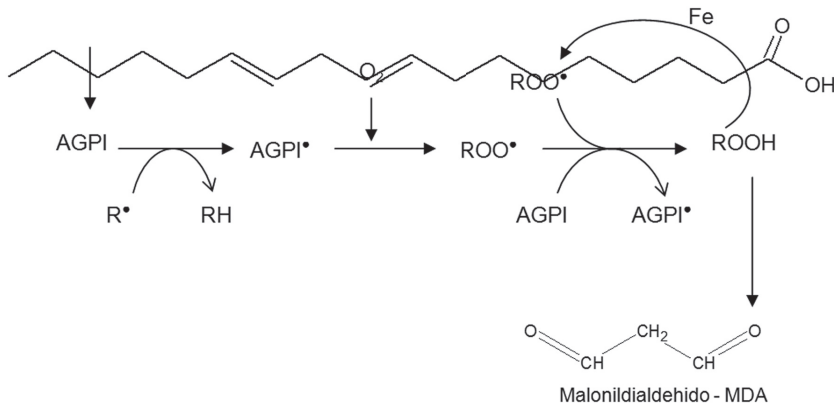
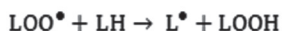
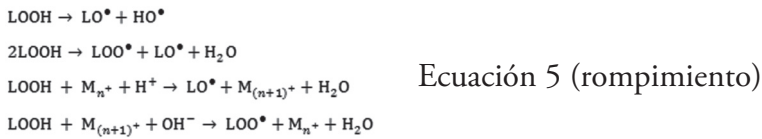


Figura 3. Representación esquemática de la peroxidación lipídica.  
 R• Radical libre, ROO• Radical alquil peroxil, ROOH hidroperóxido,  
 AGPI Acido Graso Poliinsaturado.

Las etapas que cursan en el proceso de peroxidación lipídica son caracterizadas por un primer paso llamado iniciación, representado en la ecuación 3, en donde el radical libre ataca al sustrato oxidable, seguido de una etapa rápida de propagación y rompimiento descrita en las ecuaciones 4 y 5, en la cual se da la reacción en cadena o lipoperoxidación propiamente dicha y finalmente una etapa de terminación como se muestra en la ecuación 6. Estas etapas son descritas con mayor detalle a continuación:





Ecuación 5 (rompimiento)



Ecuación 6 (terminación)

LH representa el sustrato oxidable, por ejemplo un lípido y X<sup>•</sup> el radical libre. La oxidación genera el radical alquilo (L<sup>•</sup>) que reacciona rápidamente con oxígeno para producir un radical más reactivo llamado peroxilo (LOO<sup>•</sup>).

Los radicales peroxilo son los propagadores de la reacción en cadena, pueden oxidar otros lípidos o moléculas susceptibles produciendo hidroperóxidos (LOOH), los cuales, en presencia de metales de transición (M) como hierro o cobre (incluyendo hierro de proteínas o hemoproteínas) se degradan para producir un amplio rango de compuestos entre alcoholes, aldehídos, alquil formiatos, cetonas y radicales libres incluyendo radical alcóxilo LO<sup>•</sup>. Los aldehídos más importantes producidos en la peroxidación lipídica son los 4 hidroxialquenes (principalmente 4-hidroxinonal y 4-hidroxihexanal) y el malondialdehído MDA<sup>41</sup>.

En este contexto, el papel exacto de los iones de metales de transición en la iniciación de la reacción en cadena de peroxidación lipídica es difícil de definir, pero se ha establecido que su mayor papel es catalizar la descomposición de los hidroperóxidos en reacciones de rompimiento más que participar en la abstracción de átomos de hidrógeno. De hecho, se ha establecido que en medio ácido estos metales de transición pueden descomponer los hidroperóxidos a radicales alcóxilo, mientras que en medio básico generan radicales peroxilo.

Finalmente en la reacción de terminación está involucrada la combinación de radicales para formar productos no radicalarios.

La forma de detección de un efecto antioxidante utilizando este sistema consiste en la determinación de la cinética de producción de dienos conjugados, los cuales pueden ser detectados a 234 nm y seguir así la evolución del proceso oxidativo desde sus etapas más tempranas. Sin embargo, entre las desventajas de esta forma de medición se encuentra que aun con lípidos simples, la medición espectrofotométrica de dienos conjugados es solo una

forma genérica de detección sin dar información de la estructura de los productos formados; adicionalmente, esta medición se dificulta cuando los sustratos son más complejos (tejidos, plasma, lipoproteínas) debido a las interferencias que podrían estar presentes<sup>42</sup>.

En general, la expresión de los resultados se basa en la determinación de la fase de inducción, es decir, el momento en el cual la velocidad de la oxidación incrementa; comúnmente la fase de inducción se determina como la intersección entre la tangente de la curva cinética en la fase de propagación y el eje del tiempo; sin embargo, esta forma gráfica de determinación genera un valor incierto el cual depende de la forma en como se monitorea la reacción y la sensibilidad del equipo usado<sup>43</sup>.

Otra alternativa utilizada como medición de punto final de la oxidación lipídica es el ensayo SRAT (Sustancias Reactivas al Ácido Tiobarbitúrico), también conocido por su sigla en inglés como TBARS (Thiobarbituric Acid Reactive Substances). Este método fue desarrollado hace más de 40 años y es ampliamente usado en la actualidad como un método para detectar peroxidación lipídica. Este procedimiento mide el malondialdehído (MDA) formado como producto principal de la degradación de hidroperóxidos generados por la oxidación de lípidos. Como se puede apreciar en la Figura 4, cada mol de MDA reacciona con dos moles de Ácido Tiobarbitúrico (TBA) para formar un producto de color rosa que puede ser medido espectrofotométricamente a 532–535 nm<sup>44</sup>. Se han utilizado diferentes sustratos en el ensayo SRAT, entre ellos: muestras de tejidos, ácido linoleico, microsomas, liposomas y lipoproteínas. Una de las principales críticas a este método radica en la posibilidad de falsos positivos debido a la complejidad de la matriz y por lo tanto, se ha propuesto la cuantificación cromatográfica de MDA como el mejor esquema para determinar peroxidación lipídica.

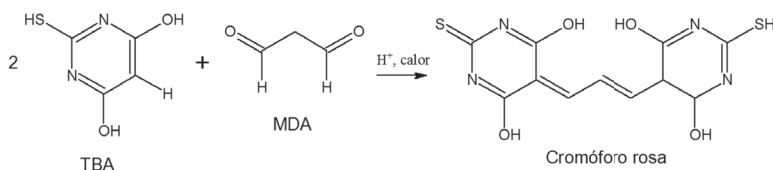


Figura 4. Fundamento del método SRAT mostrando la reacción del MDA (Malondialdehído) con Ácido Tiobarbitúrico (TBA) para producir un derivado de color rosa.

## Inhibición de la oxidación de lipoproteínas de baja densidad (LDL)

En el organismo, los lípidos (fosfolípidos, triglicéridos y colesterol), al no ser solubles en un medio acuoso como el plasma, se unen a proteínas específicas (apoproteínas, entre ellas AI, AII, B48, B100, CI, CII y CIII) formando las lipoproteínas. Las lipoproteínas son macromoléculas metabólicamente diferentes entre sí, con una determinada composición química, características de flotación por ultracentrifugación, movilidad electroforética y densidad. Este último parámetro ha servido para clasificarlas en orden decreciente como: lipoproteínas de alta densidad (HDL), lipoproteínas de baja densidad (LDL), lipoproteínas de densidad intermedia (IDL), lipoproteínas de muy baja densidad (VLDL) y quilomicrones (QM)<sup>45</sup>.

Específicamente, las LDL constituyen el 50% del total de lipoproteínas del plasma, tienen una vida media en sangre del orden de días y son la vía primordial de entrega de lípidos a las células. Su densidad es baja (1.019–1.063 g/mL), su tamaño es pequeño (18–28 nm) y está compuesta principalmente de colesterol (50%), fosfolípidos (22%) y ApoB100, lo que la hace un blanco susceptible de oxidación.

La oxidación de la LDL se ha propuesto como un proceso biológico que inicia y acelera el desarrollo de las lesiones arteriales debido a la acumulación de lipoproteínas oxidadas (oxLDL) en la íntima arterial<sup>46</sup>. De hecho, se cree que es poco probable que la oxidación de LDL ocurra en plasma debido a la presencia de altas concentraciones de antioxidantes y la baja disponibilidad de iones metálicos, los cuales se encuentran unidos a proteínas y, por lo tanto, es más probable que este proceso ocurra en un ambiente como la íntima arterial donde los antioxidantes pueden agotarse y las lipoproteínas se exponen a un estrés oxidativo.

En este sentido, se han propuesto varios mediadores celulares y bioquímicos de la oxidación de la LDL *in vivo*; existe gran controversia al respecto, pero se coincide en el papel que juegan algunas enzimas como la lipoxigenasa y las especies reactivas de nitrógeno, específicamente el óxido nítrico, un radical libre relativamente estable que normalmente no oxida la LDL a pH fisiológico, pero que puede contribuir a la oxidación de la lipoproteína interactuando con el anión superóxido para producir el peroxinitrito, un oxidante fuerte con reactividad similar al radical hidroxilo. El peroxinitrito promueve la peroxidación lipídica de la LDL *in vitro* y se ha demostrado que *in vivo* puede nitrar los residuos de tirosina de la

ApoB100, detectando altos niveles de nitrotirosina en lesiones ateroscleróticas humanas<sup>47,48</sup>.

En cuanto a la oxidación de LDL *in vitro*, se han descrito varios métodos para producir oxLDL, entre ellos, la oxidación mediada por células endoteliales<sup>49</sup> y sistemas libres de células con oxidación inducida por iones metálicos<sup>50</sup>, peroxinitrito<sup>51</sup>, mieloperoxidasa<sup>52</sup>, lipoxigenasa<sup>53</sup>. Sin embargo, debido a su simplicidad, la exposición de LDL a Cu<sup>2+</sup> durante 18–24 horas se ha convertido en un método ampliamente difundido para la oxidación de LDL *in vitro*, aunque su relevancia *in vivo* sea aun debatida debido a las concentraciones no fisiológicas de Cu<sup>2+</sup> empleadas.

Existe otra clasificación que describe los métodos para medir actividad antioxidante según sea su mecanismo de reacción, pues se conoce que los antioxidantes pueden estabilizar radicales libres siguiendo dos mecanismos, uno llamado Transferencia de Átomos de Hidrogeno (TAH) y otro denominado Transferencia de Electrones (TE), los cuales pueden ocurrir de forma paralela; ambos dan como resultado la estabilización del radical libre; sin embargo, el mecanismo que domina un sistema será determinado por la estructura química del antioxidante, su solubilidad, coeficiente de partición, Energía de Disociación de Enlace (EDE), Potencial de Ionización (PI) y condiciones del medio de reacción, como el pH<sup>54</sup>.

### Métodos basados en la transferencia de átomos de hidrógeno (TAH)

Los métodos TAH miden la capacidad de un antioxidante para estabilizar un radical libre mediante la transferencia de átomos de hidrógeno. Como se muestra en la ecuación 7, un sustrato oxidable (LH) es atacado por un radical libre (X<sup>•</sup>) generando una especie no radicalaria (XH) y un nuevo radical libre (L<sup>•</sup>). Por su parte, en la ecuación 8 se muestra cómo el antioxidante (AH) transfiere un átomo de hidrógeno para estabilizar el radical libre X<sup>•</sup> y generar la especie A<sup>•</sup>.



De esta forma, la reactividad de un antioxidante siguiendo un mecanismo TAH estará determinada por la EDE del grupo que contiene el hidrógeno a transferir. En el caso de los compuestos fenólicos se trata de un enlace ArO-H en donde una muy baja EDE implica que la reacción descrita por la ecuación 8 es termodinámicamente más favorable que aque-

lla descrita por la ecuación 7. En otras palabras, significa que un radical libre reaccionará más rápidamente con el antioxidante que con el sustrato oxidable. Adicionalmente, la especie  $A^{\bullet}$ , generada en el proceso de estabilización del radical libre, debe ser tan estable como para no reaccionar con el sustrato e iniciar nuevamente una reacción de oxidación, pero lo suficientemente reactiva como para estabilizar radicales libres en un proceso de terminación de cadena.

Se acepta que sustancias con valores de EDE alrededor de  $-10\text{Kcal/mol}$  y  $PI < -36\text{Kcal/mol}$  siguen mecanismos TAH. Las reacciones TAH son rápidas, independientes del pH y el solvente, pero sensibles a la presencia de metales y agentes reductores los cuales pueden generar una aparente mayor reactividad del antioxidante.

**Método CARO (Capacidad de Absorbancia de Radicales de Oxígeno), conocido en inglés como ORAC (oxygen radical absorbance capacity) y método PATAR (Parámetro Antioxidante Total de Atrapamiento de Radicales), conocido en inglés como TRAP (total radical-trapping antioxidant parameter)**

Estos métodos están basados en los trabajos de Wayner y Glazer<sup>55,56</sup> y perfeccionados por Cao<sup>57</sup>. En general, miden la inhibición de la oxidación inducida por radicales peroxilo y reflejan un mecanismo clásico de actividad mediada por antioxidantes terminadores de cadena mediante TAH<sup>58</sup>.

Como se muestra en la ecuación 9, el radical peroxilo es generado de una fuente como AAPH (2,2'-azobis (2-amidinopropano) dihidrocloruro), el cual sufre una descomposición térmica para producir nitrógeno molecular y radicales alquilo, que en presencia de oxígeno generarán radicales peroxilo, los cuales reaccionan con una sonda coloreada o fluorescente para formar un producto incoloro o no fluorescente, como se muestra en la ecuación 10. La capacidad antioxidante es determinada por la disminución en la velocidad de degradación de la sonda debido a la reacción de los radicales peroxilo con el antioxidante para generar un producto no radicalario, como se muestra en la ecuación 11. En CARO, generalmente se utiliza fluoresceína como sonda y la reacción suele llevarse por extensos períodos de tiempo (>30 minutos) para garantizar la estabilización de la reacción. Como se muestra en la figura 5, los cálculos para expresar los resultados se obtienen de la integración del Área Bajo la Curva (ABC) de decaimiento de fluorescencia calculando el valor de  $ABC_{\text{neto}} = ABC_{\text{con antioxidante}} - ABC_{\text{sin antioxidante}}$ ; se

obtiene así información con respecto a parámetros cinéticos como tiempo de inducción y velocidad inicial en un solo parámetro. Generalmente, el resultado se expresa en términos de equivalencia de Trolox (análogo de vitamina E), para lo cual se construye una curva con diferentes concentración y las respectivas ABC de Trolox, que genera una curva de calibración que permite interpolar el ABC de la muestra y expresar su capacidad antioxidante en términos de cantidad equivalente a Trolox.

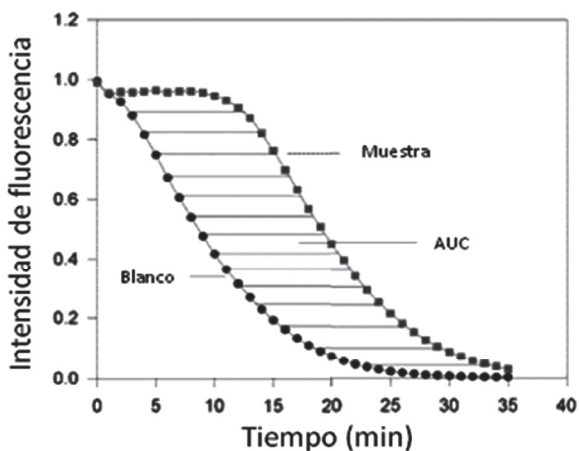
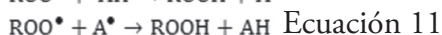
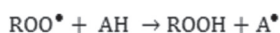
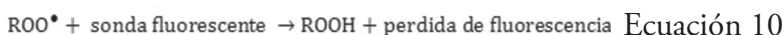


Figura 5. Curva de decaimiento de la fluorescencia por oxidación con radicales peroxil en un típico ensayo CARO donde se observa el efecto de un antioxidante (muestra) visto como el aumento en el Área Bajo la Curva (ABC) de decaimiento de fluorescencia.

### Métodos basados en la transferencia de electrones (TE)

Estos métodos determinan la capacidad de un antioxidante para transferir un electrón y reducir un compuesto. Describen reacciones más lentas que las TAH y por esto los cálculos de actividad antioxidante se basan en porcentajes de disminución en los productos más que en cinéticas de reacción. La reactividad relativa de un antioxidante en un método TE está basada, fundamentalmente, en la desprotonación y por lo tanto es gober-

nada por el Potencial de Ionización (PI)<sup>59</sup>, de tal manera que los valores de PI disminuyen con el aumento del pH, reflejando el incremento en la capacidad electrodonante con la desprotonación y por lo tanto, compuestos con  $PI > -45$  Kcal/mol siguen un mecanismo predominantemente tipo TE. En general, se ha correlacionado el potencial redox con un mecanismo tipo TE<sup>60</sup>.

Los métodos TE son bastante sensibles a ácido ascórbico y ácido úrico, dos sustancias reconocidas por mantener el estado redox en plasma, además pueden detectar el poder reductor de polifenoles. Como en los métodos TAH, los metales pueden generar interferencia causando variabilidad e inconsistencias en los resultados.

CRHF (Capacidad para Reducir el Hierro Férrico), conocido en inglés como FRAP (Ferric Reducing Antioxidant Power)

El método CRHF fue desarrollado originalmente por Benzie y Strain para medir el poder reductor del plasma<sup>61</sup>; sin embargo, posteriormente fue adaptado para medir actividad antioxidante de productos fitoterapéuticos y nutraceuticos<sup>62</sup>. Como se muestra en la figura 6, la reacción mide la reducción de 2,4,6-Tripiridiltriazina Férrica (TPTZ) a un producto coloreado y detecta compuestos con potenciales redox  $< 0.7$  V. Se cree que el poder reductor está correlacionado con el grado de hidroxilación y conjugación en polifenoles; sin embargo, CRHF no puede detectar compuestos que actúan por mecanismo TAH, subestimando el potencial antioxidante de mezclas que contengan, por ejemplo, tioles.

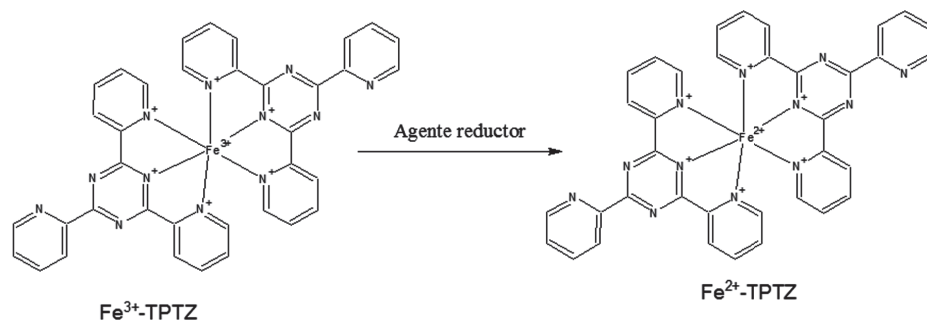


Figura 6. Fundamento del método CRHF, mostrando la reducción de 2,4,6-Tripiridil-Triazina Férrica (TPTZ).

Se ha argumentado que la capacidad para reducir el hierro se correlaciona poco con la estabilización de radicales libres; sin embargo, la oxidación o reducción de radicales para formar iones puede detener la oxidación en cadena y por lo tanto el poder reductor reflejaría la capacidad de un compuesto para regular el estado redox del plasma o tejidos. El método CRHF sigue un mecanismo típicamente TE y, por lo tanto, en combinación con otros métodos puede ser útil para distinguir el mecanismo dominante de diferentes antioxidantes. Adicionalmente, como los metales reducidos son propagadores de reacción en cadena de peroxidación lipídica por el rompimiento de hidroperóxidos a radicales alcoxilo, esto podría ser interesante para evaluar si altos valores CRHF correlacionan con la tendencia de algunos antioxidantes para actuar como prooxidantes bajo algunas condiciones<sup>63</sup>.

### Métodos que combinan mecanismos TAH y TE

Algunos métodos ampliamente usados como el ABTS y el DPPH se fundamentan en la estabilización de radicales libres sintéticos metaestables, cuya reacción con un antioxidante genera un cambio que puede ser detectado instrumentalmente. Sin embargo, se ha mostrado que estos radicales pueden ser estabilizados tanto por mecanismos TAH como TE y, por lo tanto, los patrones de reactividad y el mecanismo son difíciles de interpretar cuando no se conoce la estructura química del antioxidante evaluado.

#### a) Método ABTS (azinobis 3-etilbenzotiazolina-6-acido sulfónico)

Este método fue reportado inicialmente por Miller y colaboradores<sup>64</sup>, y se fundamenta en la capacidad de un antioxidante para estabilizar el radical catión coloreado ABTS<sup>•+</sup>, el cual es formado previamente por la oxidación del ABTS (2,2'-azinobis (3-etilbenzotiazolina-6- acido sulfónico)) (Figura 7) por metamioglobina y peróxido de hidrógeno. Los resultados son expresados como equivalentes de Trolox o TEAC (por su nombre en inglés, Trolox Equivalent Antioxidant Capacity).

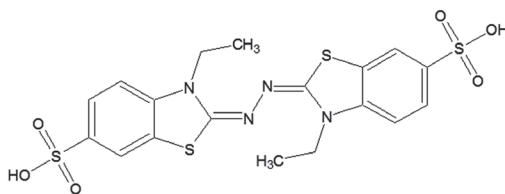


Figura 7. Estructura química del ABTS

Entre las ventajas de este método está que los valores de TEAC de una amplia gama de alimentos están reportados<sup>65</sup> lo que permite establecer comparaciones; adicionalmente puede ser usado en un amplio rango de pH y fuerza iónica, además de que el ABTS<sup>•+</sup> es soluble tanto en medio acuoso como orgánico y permite la evaluación de antioxidantes hidrofílicos y lipofílicos. Entre las desventajas están que el ABTS<sup>•+</sup> debe ser generado previamente, que no es un radical fisiológico y que la cinética de reacción con algunos antioxidantes suele ser bastante lenta y, por lo tanto, el punto final de medición debe fijarse de manera arbitraria.

### b) Método DPPH (Difenil Picril Hidrazilo)

Este ensayo fue propuesto originalmente por Brand–Williams<sup>66</sup>. El DPPH<sup>•</sup> (figura 8) es uno de los pocos radicales orgánicos estable, presenta una fuerte coloración violeta, es comercialmente disponible y no tiene que ser generado *in situ* como el ABTS<sup>•+</sup>. El ensayo se fundamenta en la medición de la capacidad de un antioxidante para estabilizar el radical DPPH<sup>•</sup>; esta medición puede hacerse espectrofotométricamente siguiendo el decaimiento de la absorbancia a 517 nm. La reacción de estabilización se considera que transcurre principalmente mediante un mecanismo TE, con un aporte marginal de TAH<sup>67</sup>.

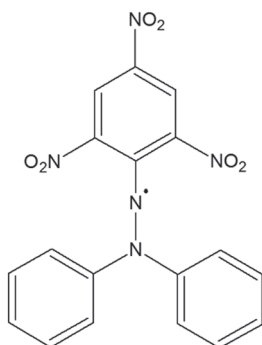


Figura 8. Estructura química del radical libre metaestable DPPH

Los resultados se suelen expresar como EC<sub>50</sub>, es decir, la concentración de antioxidante necesaria para estabilizar un 50% del DPPH<sup>•</sup>. Sin embargo, han surgido otros parámetros como la eficiencia anti-radicalaria (EA) basada en la cinética de la reacción y que involucran, además de la concentración de antioxidante, el tiempo necesario para ejercer su efecto.

Entre las ventajas de este método están su simplicidad y el bajo requerimiento instrumental; sin embargo, entre las desventajas están la dificultad de interpretar los resultados cuando se tienen sustancias cuyo espectro de absorción se solapa con el del radical; adicionalmente el DPPH<sup>•</sup> es un radical estable, centrado en nitrógeno, que dista mucho de parecerse a las especies reactivas de importancia biológica; de hecho muchos antioxidantes que reaccionan rápidamente con radicales peroxilo no lo hacen así con DPPH<sup>•</sup>, debido al impedimento estérico que representa la estructura química que rodea al radical, lo cual hace que sustancias pequeñas generalmente muestren una mayor actividad.

## Otros métodos para determinar actividad antioxidante

### a) Voltametría cíclica

La voltametría cíclica es un procedimiento reportado recientemente como una herramienta promisoría para evaluar actividad antioxidante<sup>68, 69</sup>. En este método, la muestra es introducida en una celda con un sistema de tres electrodos: electrodo de trabajo (por ejemplo carbono vítreo), electrodo de referencia de plata/cloruro de plata (Ag/AgCl) y electrodo auxiliar (platino). El potencial es aplicado bidireccionalmente al electrodo de trabajo a una velocidad constante (100 mV/s, generalmente), detectando el flujo de corriente (voltamograma cíclico). El poder reductor de una muestra está compuesto por dos parámetros: el pico de potencial ( $E_p$ ) y la corriente anódica (CA). El  $E_p$  se mide como el potencial en la mitad de la corriente de cada onda anódica y cuando es calculado de esta forma se expresa como ( $E_{1/2}$ ). En general un bajo valor de  $E_{1/2}$  significa una mayor capacidad de la sustancia para donar electrones al electrodo de trabajo. Por su parte, la CA correlaciona con la concentración de la sustancia que está siendo evaluada; adicionalmente, la reversibilidad del proceso de óxido-reducción se puede determinar por la aparición de picos anódicos y catódicos, y es un buen antioxidante aquel que presenta procesos anódicos irreversibles<sup>70</sup>. Los estudios de voltametría cíclica aplicados a mezclas complejas no permiten la determinación de antioxidantes individuales pero dan información valiosa acerca de la cantidad de grupos funcionales responsables de los picos en el voltamograma<sup>71, 72</sup>. Entre las desventajas del método está que no todos los antioxidantes comunes donan electrones a los electrodos de carbono usados en estos ensayos; por ejemplo, compuestos tipo tiol no son detectados de esta forma y requieren electrodos de Au/Hg.

## b) Método de Folin-Ciocalteu

La determinación del contenido total de compuestos fenólicos, utilizando el método originalmente propuesto por Folin en 1927 y modificado por Singleton y Rossi<sup>73</sup>, no es considerada en sí misma una metodología para medir actividad antioxidante, a pesar de que su principio se basa en la capacidad redox de los polifenoles. Sin embargo, la alta correlación de los resultados con otros métodos como CARO y DPPH ha hecho que este método se popularice como una herramienta simple y rápida para predecir actividad antioxidante, principalmente en matrices complejas, donde la cantidad de compuestos fenólicos más que la composición específica de estas sustancias determinan la actividad antioxidante<sup>74</sup>.

El método se fundamenta en la oxidación de los compuestos fenólicos presentes en una muestra, por la acción del polianión molibdotungstosfosfórico para generar un producto coloreado con un máximo de absorción a 765 nm.

Una de las modificaciones al método propuesta por Singleton implica el uso de ácido gálico como compuesto fenólico de referencia, de tal manera que los resultados se expresan en equivalentes de ácido gálico (EGA). Sin embargo, múltiples trabajos han utilizado igual variedad de estándares, entre los que se cuentan: catequina, ácido tánico, ácido clorogénico, ácido caféico, ácido protocatecúico y ácido ferúlico, lo cual imposibilita la comparación entre muestras, además de las variaciones que implica la no estandarización del método en cuanto a condiciones críticas como proporciones de reactivos, temperatura y tiempo de lectura<sup>75</sup>.

Pese a esto, actualmente el método de Folin-Ciocalteu es ampliamente utilizado, principalmente en complemento con otros métodos para medición de actividad antioxidante, puesto que ya se conoce el valor de EGA para una amplia cantidad de frutas, vegetales, bebidas<sup>76</sup>; por lo tanto, es posible la comparación de una muestra con estos datos, siempre y cuando se sigan los procedimientos reportados.

En este trabajo se utilizará una combinación de métodos con diferentes mecanismos, entre ellos Folin-Ciocateau, voltametría cíclica e inhibición de la peroxidación lipídica sobre LDL como sustrato oxidable.

## Conclusiones

- El auge cada vez más creciente de alimentos, fitoterapéuticos, nutracéuticos y suplementos dietarios con promesas de actividad antioxidante,

unido a que los métodos existentes generan resultados inconsistentes que no presentan equivalencias entre unos y otros, además de que la interpretación de las conclusiones, en algunos casos, va más allá del alcance de los resultados, obliga al planteamiento de métodos para determinar esta actividad que puedan ser estandarizados como procedimientos de rutina.

- En la búsqueda de compuestos con actividad antioxidante podría plantearse que las siguientes son las características que determinan esta actividad: 1) reactividad química del antioxidante, 2) capacidad del antioxidante para acceder hasta el sitio de reacción y 3) estabilidad de los productos formados después del proceso de estabilización de radicales libres.

### Referencias bibliográficas

1. CAMERON, Ewan and PAULING, Linus. Supplemental ascorbate in the supportive treatment of cancer: reevaluation of prolongation of survival times in terminal human cancer. En: Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. September 1978. Vol 75, no. 9. p. 4538 - 4542.
2. WILLETT, Walter and MacMAHON, Brian. Diet and cancer--an overview (second of two parts). En: The New England Journal of Medicine. March 1984. N° 310. p. 697-703.
3. RADIMER, Kathy; *et al.* Dietary supplement use by US adults: data from the National Health and Nutrition Examination Survey, 1999-2000. En: American journal of epidemiology. 2004. Vol. 160, no. 4. p. 339-349.
4. VALKO, Mirian; *et al.* Free radicals and antioxidants in normal physiological functions and human disease. En: The International Journal of Biochemistry & Cell Biology 2007. Vol. 39, no. 1. p.44-84.
5. Ibid., p.44-84
6. LIMÓN-PACHECO, Jorge y GONSEBATT BONAPARTE, Maria Eugenia. The role of antioxidants and antioxidant-related enzymes in protective responses to environmentally induced oxidative stress. En: Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis. March 2009. Vol. 674, no. 1-2. p.137-47.
7. ROBERFROID, Marcel y CALDERON, Pedro. Free radicals and oxidation phenomena in biological systems. 1 ed. New York: CRC, 1994.
8. Ibid., 280 p.
9. VALKO, Mirian; *et al.* Free radicals and antioxidants in normal physiological functions and human disease., Op. cit., p.44-84
10. ROBERFROID, Op. cit.

11. VALKO, Mirian; *et al.* Free radicals, metals and antioxidants in oxidative stress-induced cancer. En: *Chemico-Biological Interactions*. March 2006. Vol. 160, no. 1. p. 1-40.
12. ROBERFROID, Op. cit.
13. GOMES, Ana; FERNANDES, Eduarda y LIMA, José. Fluorescence probes used for detection of reactive oxygen species. En: *Journal of Biochemical and Biophysical Methods*. December 2005. Vol. 65, no. 2-3. p. 45-80.
14. VALKO, Mirian; *et al.* Free radicals and antioxidants in normal physiological functions and human disease, Op. cit., p.44-84
15. ROBERFROID, Op. cit.
16. STEPHENS, Caroline, FAWCETT, Tonks. Nitric oxide and nursing: a review. *Journal of clinical nursing*. January 2007. Vol. 16, no.1. p. 67-76.
17. DRÖGE, Wulf. Free Radicals in the Physiological Control of Cell Function. En: *Physiological Reviews*. January 2002 vol. 82 no. 1. p. 47-95
18. GOMES, Ana, Op.cit. p. 45-80.
19. LIMÓN-PACHECO, Jorge, Op. cit. p.137-47.
20. Ibid., p.137-47.
21. ROBERFROID, Op. cit.
22. TRABER, Maret and ATKINSON, Jeffrey. Vitamin E, antioxidant and nothing more. En: *Free Radical Biology and Medicine*, July 2007. Vol. 43, no. 1, p. 4-15.
23. ROBERFROID, Op. cit.
24. GRIFFITHS, H.R. and LUNEC, J. Ascorbic acid in the 21st century - more than a simple antioxidant. En: *Environmental Toxicology and Pharmacology*. September 2001. Vol. 10, no. 4. p. 173-182.
25. KRINSKY, Norman. Antioxidant functions of carotenoids. En: *Free radical biology & medicine*. 1989. Vol. 7, no. 6. p. 617-635
26. TIWARI, Ashok. Imbalance in antioxidant defence human diseases: Multiple approach of natural antioxidant therapy. *Current Science*. November 2001. Vol. 81, no. 9. p. 1179-1187.
27. LOTITO, Silvina and FREI, Balz. Consumption of flavonoid-rich foods and increased plasma antioxidant capacity in humans: cause, consequence, or epiphenomenon?. En: *Free radical biology & medicine*. December 2006. Vol. 41, no. 12. p. 1727-1746
28. BORS, Wolf and SARAN, Manfred. Radical scavenging by flavonoid antioxidants. En: *Free radical research communications*. 1987. Vol. 2, no. 4-6. p. 289-94.

29. MANACH, Claudine; *et al.* Bioavailability and bioefficacy of polyphenols in humans. I. Review of 97 bioavailability studies. En: The American journal of clinical nutrition. 2005. Vol. 81. p. 230-242.
30. KNEKT, Paul; *et al.* Flavonoid intake and risk of chronic diseases. En: The American journal of clinical nutrition. September 2002. Vol. 76, no. 3. p. 560-568.
31. ARTS, Ilja and HOLLMAN, Peter. Polyphenols and disease risk in epidemiologic studies. En: The American Journal of Clinical Nutrition. January 2005. Vol. 81, no. 1. p. 317S-325S.
32. AVIRAM, Michael and FUHRMAN, Bianca. Wine flavonoids protect against LDL oxidation and atherosclerosis. En: Annals of the New York Academy of Sciences. May. 2002. Vol. 957. p. 146-61.
33. RIETVELD, Anton and WISEMAN, Sheila. Antioxidant effects of tea: evidence from human clinical trials. En: The Journal of nutrition. October 2003. Vol. 133, no. 10. p.3285-3292.
34. ROGINSKY, Vitaly and LISSI, Eduardo. Review of methods to determine chain-breaking antioxidant activity in food. En: Food Chemistry. September 2005. Vol. 92, no. 2. p. 235-254
35. ROGINSKY, Vitaly; *et al.*. Substituted p-hydroquinones as inhibitors of lipid peroxidation. En: Chemistry and physics of lipids. September 2003. Vol. 125, no. 1. p. 49-58
36. PRIOR, Ronald; WU, Xianli and SCHAICH, Karen. Standardized Methods for the Determination of Antioxidant Capacity and Phenolics in Foods and Dietary Supplements. En: Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2005. Vol. 53, no. 10. p. 4290-4302.
37. Ibid., p. 4290-4302.
38. ROGINSKY, Vitaly and LISSI, Eduardo., Op. Cit., p. 235-254
39. PRIOR, Ronald. Op. cit., p. 4290-4302.
40. CADENAS, Enrique. Basic mechanisms of antioxidant activity. En: BioFactors. January 1997. Vol. 6, no. 4. p.391-397.
41. PINCHUK, Ilya and LICHTENBERG, Dov. The mechanism of action of antioxidants against lipoprotein peroxidation, evaluation based on kinetic experiments. En: Progress in lipid research. July 2002. Vol. 41, no. 4. p. 279-314
42. ANTOLOVICH, Michael; *et al.* Methods for testing antioxidant activity. The Analyst. 2002. Vol. 127, no. 1. p. 183-198.
43. ROGINSKY, Vitaly and LISSI, Eduardo., Op. Cit., p. 235-254
44. KISHIDA, Etsu; *et al.* Comparison of the formation of malondialdehyde and thiobarbituric acid-reactive substances from autoxidized fatty acids based on oxygen consumption. En: Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2002. Vol. 41, no. 10. p. 1598-600.

45. TULENKO, Thomas SUMNER, Anne. The physiology of lipoproteins. En: Journal of Nuclear Cardiology. 2002. Vol. 9, no. 6. p.638-649.
46. CHISOLM, Guy and STEINBERG, Daniel. The oxidative modification hypothesis of atherogenesis: an overview. Free Radical Biology and Medicine. June 2000. Vol. 28, no. 12. p. 1815-1826.
47. GUY, Rebecca; *et al.* Characterization of peroxynitrite-oxidized low density lipoprotein binding to human CD36. En: Atherosclerosis. March 2001. Vol. 155, no. 1. p.19-28,
48. TROSTCHANSKY, Andrés; *et al.* Formation of Lipid-Protein Adducts in Low-Density Lipoprotein by Fluxes of Peroxynitrite and Its Inhibition by Nitric. En: Archives of Biochemistry and Biophysics. November 2001. Vol. 395, no. 2. p. 225-232.
49. MOREL, Diane. DICORLETO, Paul and CHISOLM, Guy. Endothelial and smooth muscle cells alter low density lipoprotein in vitro by free radical oxidation. En: Arteriosclerosis. 1984. Vol. 4. p. 357-64.
50. HEINECKE, Jay; ROSEN, Henry and CHAIT, Alan. Iron and copper promote modification of low density lipoprotein by human arterial smooth muscle cells in culture. En: The Journal of clinical investigation. 1984. Vol. 74. p.1890-1894.
51. BECKMAN, Joseph and KOPPENOL, Willem. Nitric oxide, superoxide, and peroxynitrite: the good, the bad, and ugly. En: The American journal of physiology. November 1996. Vol. 271. p.1424-1437.
52. DAUGHERTY, Alan; *et al.* Myeloperoxidase, a catalyst for lipoprotein oxidation, is expressed in human atherosclerotic lesions. En: The Journal of clinical investigation July 1994. Vol. 94. p.437-44.
53. HARDUIN, Pascal; *et al.* Immunological and functional properties of in vitro oxidized low density lipoprotein. En: Journal of lipid research. 1995. Vol. 36. p. 919-30.
54. WRIGHT, James; JOHNSON, Erin, And DILABIO, Gino. Predicting the activity of phenolic antioxidants: theoretical method, analysis of substituent effects, and application to major families of antioxidants. En: Journal of the American Chemical Society. 2001. Vol. 123, no. 6. p. 1173-1183.
55. WAYNER, D.D.; *et al.* Quantitative measurement of the total, peroxy radical-trapping antioxidant capability of human blood plasma by controlled peroxidation. The important contribution made by plasma proteins. En: FEBS letters. July 1985. Vol. 187, no. 1. p. 33-37
56. GLAZER, Alexander. Fluorescence-based assay for reactive oxygen species: a protective role for creatinine. En: The FASEB journal: official publication of

- the Federation of American Societies for Experimental Biology. 1988. Vol. 2. p. 2487-2491.
57. CAO, Guohua; SOFIC, Emin and PRIOR, Ronald. Antioxidant and prooxidant behavior of flavonoids: structure-activity relationships. En: Free Radical Biology and Medicine. 1997. Vol. 22, no. 5. p. 749-760
  58. OU, Boxin; *et al.* Development and validation of an improved oxygen radical absorbance capacity assay using fluorescein as the fluorescent probe. En: Journal of agricultural and food chemistry. 2001. Vol. 49. p. 4619-26.
  59. WRIGHT; Op. cit. p. 1173-1183.
  60. HUANG, Dejian; OU, Boxin and PRIOR, Ronald. The Chemistry behind Antioxidant Capacity Assays. En: Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2005. Vol. 53, no. 6. p. 1841-56.
  61. BENZIE, Iris and STRAIN, J. J. The Ferric Reducing Ability of Plasma (FRAP) as a Measure of "Antioxidant Power": The FRAP Assay. En: Analytical Biochemistry. 1996. Vol. 239. p. 70-6.
  62. BENZIE, Iris and SZETO, Y. T. Total antioxidant capacity of teas by the ferric reducing/antioxidant power assay. En: Journal of agricultural and food chemistry. 1999. Vol. 47. p. 633-636.
  63. CAO, Op. cit., 749-760
  64. MILLER, N. A novel method for measuring antioxidant capacity and its application to monitoring the antioxidant status in premature neonates. En: Clinical science (London, England). 1993. vol. 84. p. 407-412.
  65. PIETTA, Piergiorgio; *et al.* Trolox equivalent antioxidant capacity (TEAC) of Ginkgo biloba flavonol and Camellia sinensis catechin metabolites. En: Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis. 2000. Vol. 23. p. 223-226.
  66. BRAND-WILLIAMS, W; CUVELIER, ME, BERSET C. Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. En: LWT - Food Science and Technology. 1995. Vol. 28, no. 1. p. 25-30.
  67. HUANG, Op. cit., p. 1841-56.
  68. FIRUZI, Omidreza. Evaluation of the antioxidant activity of flavonoids by "ferric reducing antioxidant power" assay and cyclic. En: Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - General Subjects. January 2005. Vol.1721, no. 1-3. p. 174-184
  69. PRIOR, Ronald and CAO, Guohua. In vivo total antioxidant capacity: comparison of different analytical methods. En: Free radical biology & medicine. December 1999. Vol. 27, no. 11-12, p. 1173-1181
  70. KILMARTIN, Paul; ZOU, Honglei and WATERHOUSE, Andrew. A cyclic voltammetry method suitable for characterizing antioxidant properties of wine

- and wine phenolics. En: Journal of agricultural and food chemistry. 200. Vol. 49, no. 4. p. 1957-1965.
71. COSIO, Maria Stella. Use of an electrochemical method to evaluate the antioxidant activity of herb extracts from the Labiatae family. Food Chemistry. 2006. Vol. 97. p. 725-731.
  72. BARROS, Lillian; *et al.* Antioxidant activity of Agaricus sp. mushrooms by chemical, biochemical and electrochemical assays. En: Food Chemistry. November 2008. Vol. 111, no. 1. p. 61-66
  73. SINGLETON, V. and ROSSI, J. Colorimetry of Total Phenolics with Phosphomolybdic-Phosphotungstic Acid Reagents. Am J Enol Vitic. 1965. Vo. 16. p. 144-158.
  74. TAWAHA, Khaled. Antioxidant activity and total phenolic content of selected Jordanian plant species. En: Food Chemistry. 2007. Vol. 104. p. 1372-1378.
  75. PRIOR. Standardized Methods for the Determination of Antioxidant Capacity and Phenolics in Foods and Dietary Supplements. Op. cit., p. 4290-302.
  76. BRAT, Pierre. Daily polyphenol intake in France from fruit and vegetables. En: The Journal of nutrition. September 2006. Vol. 136. p. 2368-2373.

# Caracterización mecánica y físico-química del banano tipo exportación (*Cavendish valery*)

Leonidas de Jesús Millán Cardona\*

Héctor José Ciro Velásquez\*\*

## Resumen

**Introducción.** La economía colombiana depende en gran parte del sector agropecuario; el cultivo y producción de frutas tropicales, como lo es el banano, ocupa un papel importante en la comercialización internacional. **Objetivo.** Caracterización mecánica y físico-química del banano Cavendish Valery bajo ensayos de compresión unidireccional mediante pruebas de firmeza, fractura y módulo elástico, y de propiedades físico-químicas como grados Brix, pH y acidez. **Materiales y métodos.** El material vegetal fue adquirido con el mismo grado de maduración y almacenado a una temperatura promedio de  $24 \pm 4^\circ\text{C}$ . Estos frutos fueron sometidos a pruebas de compresión unidireccional diariamente durante doce días usando un texturómetro TA-XT2i y el software Textura Expert Excede, versión 1,00. **Resultados.** Los resultados mostraron que la fuerza de firmeza en la cáscara varió significativamente ( $p < 0.05$ ) respecto al tiempo poscosecha al presentar un valor entre el primero y el último día de 16,49N y 12,39N, respectivamente. En las pruebas de fuerza de fractura y esfuerzo de falla se encontró que el producto presenta una mayor resistencia mecánica bajo ensayos de flexión, y una disminución en el valor del módulo elástico bajo ensayos de compresión

\* Docente Corporación Universitaria Lasallista, Facultad de Ingenierías, programa de Ingeniería Industrial.

\*\* Docente Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Departamento de Ingeniería Agrícola y Alimentos.

y flexión durante el período poscosecha, lo que constituye el ablandamiento del fruto; esta pérdida de rigidez es uno de los cambios más evidentes durante el período de almacenamiento, propia de materiales viscoelásticos. Las pruebas físico-químicas realizadas a la pulpa del banano mostraron un aumento significativo ( $p < 0.05$ ) en el contenido de grados Brix y acidez, y una disminución significativa ( $p < 0.05$ ) en el pH durante la madurez. **Conclusiones.** El fruto se comporta anisotrópicamente, es decir, ciertas propiedades mecánicas como fuerza de fractura y módulo de elasticidad dependen de la dirección de carga. La prueba de fractura del material vegetal mostró que la resistencia del banano es más alta bajo ensayos a flexión que a compresión; esto también ocurrió en las pruebas de esfuerzo de falla de la pulpa, lo que indica que la posición longitudinal es la más adecuada para transportar y almacenar el producto. La firmeza del fruto depende del punto de la fruta: es menor en la zona próxima al extremo distal (parte del fruto donde esta sujeto al racimo), debido posiblemente a que la maduración comienza en este extremo. La composición físico-química de los frutos varía durante el período poscosecha, y presenta un aumento en el contenido de grados Brix y acidez titular al tiempo que una disminución en el pH. El banano como material y elemento biológico es de carácter viscoelástico, es decir, su comportamiento mecánico es intermedio entre un sólido elástico y un líquido newtoniano.

**Palabras clave:** economía, caracterización mecánica, caracterización físico-química, banano, resistencia.

### *Mechanical and physical-chemical characteristics of export-type bananas (CAVENDISH VALERY)*

#### Abstract

**Introduction.** Colombian economy highly depends on the agricultural sector. The cultivation and the production of tropical fruits, such as bananas, have a very important role of its international trade. **Objective.** To provide a mechanical and physical-chemical characterization of Cavendish Valery bananas under unidirectional compression tests by the use of tests of strength, fracture and elastic modulus and tests of physical-chemical properties such as Brix, pH and acidity rates. **Materials and methods.** The material was gotten with the same maturation degree and stored at a media temperature of  $24 \pm 4^\circ\text{C}$ . These fruits were submitted to unidirectional compression tests every day for a twelve days period, using a TZ-XT2i texturometer and the Texture Expert Exceed software, version 1,00. **Results.** The results showed that the strength of the peel had a significant variation ( $p < 0.05$ ) concerning the

post-harvest time, having values of 16,49N y 12,39N between the first and the last days, respectively. In the fracture strength tests and stress failure, it was found that the product is more resistant mechanically under bending tests, plus a reduction of the elastic module value under compression and bending tests during the post-harvest period, which is the softening of the fruit. This loss of stiffness is one of the most evident changes during the storing period, and is typical in viscoelastic materials. The physical-chemical tests performed on the pulp of the bananas showed a significant increase ( $p < 0.05$ ) in the Brix degrees content and the acidity, and a significant reduction ( $p < 0.05$ ) in the pH during the maturation. **Conclusions.** The fruit has an anisotropic behavior, which means that certain mechanical properties such as fracture strength and elasticity module depend on the load direction. The fracture test of the material demonstrated that banana's resistance is higher under bending tests than in compression tests. This also happened in the stress failure tests performed on the pulp, and this means that the best position to store and transport the product is the longitudinal one. The firmness of the fruit depends on the fruit's point. It is lower in the zone around the distal extreme (the part of the fruit in which it is attached to the cluster), possibly due to the fact that the maturation process in that extreme. The physical-chemical composition of the fruits vary during the post-harvest period, and shows an increase in the Brix degrees and titratable acidity, and a pH reduction takes place at the same time. Bananas, as a biological matter and as an element, have a viscoelastic character. This means that its mechanical behavior is placed between an elastic solid and a Newtonian liquid.

**Key words:** economy, mechanical characterization, physical-chemical characterization, banana, resistance.

## Introducción

La economía colombiana depende en gran parte del sector agropecuario; el cultivo y producción de frutas tropicales, como lo es el banano, ocupa un papel importante en la comercialización a nivel internacional. Las especificaciones de los clientes en el exterior obligan a las productoras bananeras a desarrollar y aplicar modernas prácticas tecnológicas tendentes a incrementar los rendimientos en la producción, mejorar la calidad de la fruta y facilitar la realización de las tareas al trabajador, con el fin de ofrecer un producto que cumpla con las características y estándares exigidos en el mercado mundial<sup>1</sup>.

Por lo tanto, si se pretende desarrollar, mejorar y/o adaptar tecnologías que logren cumplir con estos requerimientos es indispensable aplicar los conceptos básicos de ingeniería. En Colombia es poco lo que se ha avanzado en la aplicación de Ingeniería en el sector agrícola. Existe un desconocimiento global del comportamiento mecánico de las frutas colombianas, estudios que si se realizaran ayudarían a mejorar procesos básicos de manipulación de la fruta en la poscosecha, en etapas como empaque, transporte y almacenamiento.

La realización y aplicación de un estudio de la respuesta mecánica y físico-química de la fruta definiría las diferentes fuerzas o cargas y deformaciones, cuyas magnitudes resultarían determinantes para mejorar las técnicas de empaque, transporte, control de calidad, índices de cosecha, manejo y control de daño mecánico, para ofrecer así un producto de óptima calidad, y aportar un significativo desarrollo en el sector agrícola colombiano, y específicamente en la industria del sector agroindustrial bananero.

### **Banano (*Cavendish Valery*)**

El banano es un cultivo permanente que se auto reemplaza con un pequeño retoño que crece al lado de la planta y muere al ser cosechada. Las dos especies más conocidas en nuestro medio son: la musa paradisíaca que corresponde al plátano para cocción, y el Cavendish Valery o banano<sup>2</sup>.

### **Origen**

El banano silvestre ha sido usado probablemente por el hombre desde los comienzos de su existencia. Al igual que el plátano, el banano es una fruta tropical originada en el sudoeste asiático, probablemente de Malasia, China Meridional e Indonesia. Desde allí fue llevado a Madagascar en el siglo XV, y luego difundido en la costa oriental y central de África, aunque algunos lo sitúan en ese continente desde hace unos 8.000 años. En el siglo XV los portugueses lo encontraron en la costa occidental africana, en la región de Guinea, y lo llamaron guineo. Hacia 1516 el padre Tomás de Berlanga lo introdujo en la isla La Española, en el Caribe; probablemente lo llevó desde las islas Canarias, donde se cultiva desde 1450<sup>3</sup>.

El banano comestible resultó de una serie de mutaciones y cambios genéticos ocurridos a partir de especies silvestres de frutos pequeños y numerosas semillas. Las variedades comerciales de origen triploide Gross Michel

y Cavendish, originario de Burna, Tailandia, Malaya, Indonesia y Ceilán y el sudeste de Asia, respectivamente<sup>4</sup>.

### Historia del cultivo en Colombia

Es probable que el banano fuera conocido por las tribus del Atrato desde 1535. Desde esa fecha, el banano llegó al río San Juan debido a la difusión realizada por las tribus chocoes, a través del Istmo de San Pablo de Urabá. Sin embargo, la entrada del banano al río San Juan también pudo presentarse por la vía de Buenaventura. Es probable que por esa vía también llegara a Cali. El célebre naturalista Humboldt puso en duda el origen europeo del banano en América, argumentando la posibilidad de que el banano se encontraba tanto en América como en Asia<sup>5</sup>.

### Taxonomía y morfología

El banano pertenece al orden Zingiberales, familia Musáceas y género *Musa*. Son hierbas gigantes con pseudotallos aéreos que se originan de rizomas carnosos o colinos con múltiples yemas laterales. Los pedúnculos de las hojas se cubren en forma helicoidal formando los pseudotallos. Debido a que las variedades modernas de plátanos y bananos se caracterizan por su parte no carpia, su propagación es exclusivamente por medios vegetativos<sup>6</sup>.

### Genética y variedades

Las especies más destacadas son: la *Musa acuminata* que ha dado origen a las variedades comerciales, *M. balbisiana* de interés científico por su contribución en la formación de bananos y plátanos y *M. acuminata* diploide como el Orito, y triploide como la *Acuminata AAA*, el genoma dominante *Acuminata AAB* y el genoma dominante *Balviciana ABB*<sup>7</sup>.

### Requerimientos del cultivo

Por sus fines de exportación se cultiva con tecnología de punta y exhaustivo control de todos sus requerimientos. La rentabilidad del cultivo frente a otras alternativas productivas permite el uso de nuevas tecnologías de riego, drenaje y transporte. Según Sierra<sup>8</sup> los factores que se deben tener en cuenta para un óptimo cultivo son:

- **Localización geográfica.** Las condiciones climáticas para la producción se ubican entre una latitud de 30 grados norte y 30 grados sur del Ecuador, pero las condiciones óptimas se dan entre los 0 y 15 grados.

- **Altitud.** A medida que aumenta la altitud se prolonga el ciclo vegetativo del cultivo. Contando con buenas condiciones climatológicas en cuanto a precipitación, temperatura y suelos, las zonas comprendidas entre los 0 y 300 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.) son adecuadas.
- **Precipitaciones y requerimientos de agua.** El promedio anual de lluvia que se considera adecuado es de 2286 mm (90 pulg.) siempre y cuando exista buena distribución cada año. Un nivel de precipitación de 150 a 180 mm por mes es suficiente para suplir los requerimientos de la planta. No obstante, la cantidad de agua requerida se fija entre 1.800 y 2.800 mm al año bien distribuidos; la planta produce bien en regiones en Colombia con 1500 mm de lluvia siempre y cuando no se presenten veranos prolongados.
- **Temperatura.** La temperatura media que es óptima para el cultivo es de 25°C. Temperaturas entre 25 y 30°C le favorecen. La humedad relativa apropiada se estima en un 50%.
- **Luminosidad.** Factores como la luminosidad que en Colombia, Ecuador y parte de Venezuela es similar durante todo el año y la radiación solar, que en definitiva define las zonas de cultivo, son herramientas muy ventajosas para el manejo del cultivo; de hecho, a mayor cantidad de horas despejadas habrá mayor heliofanía y, por ende, mejor producción. Se requieren 1.200 h/año, aproximadamente de 3 a 5 horas de sol brillante por día y una acumulación de 4.380 h/luz al año. La planta es muy eficiente capturadora de energía solar para sus procesos de fotosíntesis, razón por la que en las zonas de menor heliofanía o temporadas nubladas el tamaño de las hojas es mayor, situación que debilita los tejidos y los hace susceptibles de contraer enfermedades.
- **Suelos.** Los bananos del grupo Cavendish requieren suelos con buena textura, adecuada mezcla de arcilla, arena y materia orgánica y un perfil mayor a 1,20 m de profundidad, básicamente del tipo franco arenoso, franco arcilloso o franco limoso con menos del 40% de arcilla y en los cuales la capa freática esté más abajo del perfil típico. Debido a su condición de bulbo con partes aéreas largas y carnosas y raíces poco profundas, es altamente susceptible a pudriciones por encharcamiento, por lo que los suelos, a más de tener una buena retención de agua, deben ser porosos y permitir aireación. El pH ideal es de 6,5 pero puede tolerar rangos entre 5,5 y 7,5.

- **Nutrición.** El banano es una fruta de agradable sabor, altamente energético, rico en carbohidratos y contiene poca grasa. Ayuda a proveer vitaminas esenciales como la vitamina C, B1, B2 y B6. También contiene grandes cantidades de potasio y magnesio. Los niveles de sodio son bajos y pobre en proteínas y lípidos.
- **Cosecha.** Esta debe realizarse una vez calibrada la fruta, para determinar el estado fisiológico adecuado. Dicha calibración se realiza tomándole el diámetro del dedo medio de la última mano y se comprueba con la segunda mano. El diámetro dependerá fundamentalmente de la variedad<sup>9</sup>.
- **Manejo poscosecha.** Durante esta fase la fruta debe recibir un máximo cuidado para preservar su calidad; de allí que el manejo, transporte y almacenamiento estarán a cargo de un personal calificado en dichas labores.
- **Empacado.** Esta labor es determinante para lograr un producto final de excelente calidad, por lo que el personal debe estar suficientemente entrenado sobre la importancia de su labor en la calidad, tanto en la prevención de las lesiones al empacar como en la apariencia general de la fruta empacada<sup>10</sup>.
- **Transporte.** Al término de la colocación de las manos debe recogerse el plástico como una bolsa, se amarra con una liga gruesa y se coloca el nudo en un lugar donde no produzca compresión en la fruta al momento de cerrar la caja. No debe olvidarse el extraer la mayor cantidad de aire a la bolsa<sup>11</sup>.

## Normativa

El grado de desarrollo y el estado del banano debe permitir el transporte y manipulación de manera que llegue satisfactoriamente al lugar de destino.

De acuerdo con la “Norma NTC 1190,” Industria “Alimentaria – plátano”, dada por el ICONTEC en 1976 los bananos se clasifican por su tamaño en tres categorías: Extra, Primera y Segunda, en cada una de las cuales los frutos deben estar:

- Enteros, duros, con la forma característica de la variedad.
- Secos, limpios, sin manchas ni grietas.
- Sin rayas profundas, ni ataques de plagas o enfermedades.

- Sin principios de pudrición, magulladuras, heridas no cicatrizadas o cuellos.
- El plátano se puede comercializar verde, pintón o maduro, en manos, dedos o racimos.

### Daños mecánicos

Los daños mecánicos son uno de los principales factores que conducen al deterioro poscosecha de los bananos y pueden ocurrir en cualquier momento desde el punto de la cosecha hasta el punto de consumo<sup>12</sup>. Los daños mecánicos pueden restar valor a la apariencia del producto y crear el potencial para la penetración de infecciones. También pueden resultar en una baja calidad para el mercado y precios más bajos. Existen tres principales fuentes de daño mecánico que afectan a los bananos y son las siguientes:

1. **Impacto.** Los daños por impacto pueden resultar en magulladuras con o sin rotura de la cáscara. Las magulladuras por impacto son causadas por un golpe fuerte como por ejemplo, el de un objeto que cae sobre la fruta, el de la fruta que cae contra otra fruta en una superficie dura con fuerza suficiente para dañar las células. El daño por impacto puede ocurrir a través de todo el proceso de comercialización desde la cosecha hasta la llegada al consumidor. Algunas veces los daños no son visibles pero pueden presentarse más tarde.
2. **Presión o compresión.** Los daños por compresión resultan de la presión excesiva sobre la fruta. No hay necesidad de movimiento físico para que ocurra el daño por presión. El daño por presión puede ser causado por otras frutas y ocurre primariamente durante y después del empaque como resultado de forzar la entrada de demasiados productos en un contenedor muy pequeño (es decir, sobre empacado, o cuando los empaques se apilan muy alto, uno arriba de otro).
3. **Vibración.** El daño por vibración es principalmente asociado con el transporte y resulta de la vibración repetida y prolongada de la fruta. Este daño es mayor en las capas superiores de la fruta, particularmente, cuando el empaque es poco compacto, ya que en esta situación nada impide que la fruta vibre durante el transporte y distribución. El daño por vibración es particularmente severo cuando el empaque de las frutas es muy suelto.

### Factores que pueden ser causa de daños mecánicos

Los factores que pueden ser causa son los siguientes:

- **Factores precosecha.** Entre los factores precosecha que pueden ser causa de daños mecánicos en los bananos, se encuentran: clima, viento, aspersión y aplicación de fertilizantes, plagas e insectos, pájaros, roedores e implementos de cultivo.
- **Factores de cosecha.** Durante el proceso de la cosecha, el daño mecánico podría resultar de las pobres técnicas de cosecha y manipulación. La tierra que se adhiere a las frutas (cuando se permite su caída durante la cosecha) también puede causar daños como rayar las frutas al remover la tierra o lavarla.
- **Factores poscosecha.** Los factores poscosecha que pueden causar daño mecánico son: alta o baja densidad en el empaque de las frutas; empaque o manipulación pobre de las frutas empacadas durante la carga y descarga; vibración (sacudidas) de los vehículos especialmente en malas carreteras y velocidad de transporte.

### Efectos de los daños mecánicos

Cambios físicos del color y sabor de la fruta; ablandamiento del tejido de la fruta que resulta del colapso de las paredes celulares individuales. Las frutas dañadas se maduran generalmente más temprano que las frutas sin daño. Esto sucede debido a un aumento en la tasa de respiración asociada con el daño mecánico, así como con un aumento en la producción de etileno que apresura la maduración.

### Firmeza

La firmeza mide la resistencia a daños físicos ocasionados por medios mecánicos durante la recolección, manipulación y transporte; depende del momento y método de recolección y de la temperatura de almacenamiento. Existen distintas técnicas para medir la firmeza, basadas en diferentes propiedades mecánicas como son la punción, la compresión, la penetración, etc. En general, los ensayos tradicionales de firmeza miden la fuerza que opone un material biológico al ser perforado o comprimido hasta cierta profundidad y deformación<sup>13</sup>. Es una importante característica de calidad poscosecha durante la cosecha. La misma podría ser utilizada como un índice de madurez/maduración. También podría facilitar la comparación de la tasa de ablandamiento del banano<sup>14</sup>.

La firmeza de los bananos es una característica compuesta, que es el resultado de una combinación de varios factores, como los componentes estructurales de los tejidos y células<sup>15</sup>. Cualquier procedimiento individual de evaluación física sólo puede suministrar una indicación limitada de estas propiedades de la textura. La indicación de la firmeza se obtiene mediante la fuerza necesaria ejercida para causar la penetración de una sonda a una profundidad específica dentro del producto; es necesario registrar el diámetro de la sonda.

### Cambios en la firmeza del producto

Bajo condiciones normales de almacenamiento los bananos sufren transformaciones de textura a medida que pasa el proceso de maduración. La fruta crujiente, dura y verde se convierte en una fruta amarilla con la pulpa interna tierna y suave en la etapa óptima de madurez, y se torna blanda a medida que avanza hacia la senescencia. La pérdida de firmeza durante la maduración lleva a una calidad más baja y a una mayor incidencia de daños mecánicos durante la manipulación y transporte. La pérdida de firmeza de la pulpa durante la maduración varía de acuerdo con el cultivo y tipo de banano. La firmeza a menudo está relacionada con la maduración; ello implica que al progresar la maduración, la firmeza de la pulpa disminuye<sup>16</sup>.

La pérdida de la firmeza o ablandamiento durante la maduración ha sido asociada con tres procesos. El primero es la degradación del almidón para formar azúcar. El segundo proceso es la degradación de las paredes celulares o reducción en la cohesión de la lamella media, debido a la solubilización de las sustancias pécticas. El tercero es el movimiento de agua desde la cáscara a la pulpa debido al proceso de ósmosis<sup>17</sup>.

### Viscoelasticidad

Los alimentos que bajo condiciones de carga durante un tiempo de aplicación exhiben simultáneamente las propiedades viscosas propias de un líquido y las elásticas, características de un sólido, son agrupados bajo la definición de materiales viscoelásticos, y su comportamiento es representado por modelos reológicos<sup>18,19</sup>.

### Materiales anisotrópicos

Los materiales biológicos, incluyendo los alimentos, son altamente caracterizados por su anisotropía, es decir, que ciertas propiedades físicas y

mecánicas no son las mismas en todas las direcciones que pasan por un punto determinado, sino que varían en función de la dirección (longitudinal, radial y tangencial), en la que se aplique el esfuerzo<sup>20</sup>.

### Módulo de elasticidad

Todos los sólidos (acero, vidrios, rocas) exhiben algunas características propias de los líquidos, menos uno, el sólido ideal que, por definición, carece de estas propiedades. De igual modo, existe un líquido que también, por definición, carece de cualquier propiedad característica de los sólidos. Al sólido ideal se le llama sólido de Hooke, y al líquido ideal se le conoce como el líquido de Newton. Estos dos materiales ideales constituyen auténticos límites de comportamiento reológico. Ambos carecen de estructura (no tienen átomos), son isotrópicos, es decir, exhiben idénticas propiedades en todas las direcciones<sup>21</sup>. El sólido de Hooke es el sólido teórico en el que la deformación que experimenta es directamente proporcional al esfuerzo aplicado es decir:

$$\sigma = E\varepsilon \quad (1)$$

donde  $E$  ( $\text{N/m}^2$ ) es la constante de proporcionalidad,  $\varepsilon$  es la deformación (relación entre el cambio de longitud y la longitud original, es adimensional) y  $\sigma$  es el esfuerzo (relación entre la fuerza aplicada y el área transversal del material,  $\text{N/m}^2$ ). A la constante  $E$  de la ley de Hooke se le conoce como módulo de Young<sup>22</sup> y su expresión matemática es

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2)$$

El valor del módulo de Young " $E$ " es característico de cada material y es independiente de la forma y tamaño de la muestra empleada en su medición. Es un indicador de la resistencia que tiene un material sometido a un esfuerzo de tensión o compresión y se interpreta como la máxima fuerza que se puede aplicar al material sin romperlo. Debido a que los alimentos son materiales anisotrópicos, el módulo aparente es diferente tanto para pruebas de compresión y flexión.

### Fractura

El conocimiento de las características mecánicas de frutas y productos vegetales, que son materiales viscoelásticos, es una información básica necesaria para el desarrollo de procesos mecanizados de cosecha, transporte,

manejo, requerimientos de empaque, almacenamiento, procesos de transformación y control de daño mecánico<sup>23</sup>. La fractura podría ser descrita de manera macroscópica como la formación de grietas o ranuras en el producto, sin embargo, existen otros tipos de fallas en las cuales las células pueden ser fracturadas como ocurre en frutas y vegetales cuando existe un daño por abrasión, siendo un daño mecánico ocasionado por una fuerza externa que puede ocasionar cambios de sabor, alteración química del color sin romper la superficie del producto<sup>24</sup>.

La fractura ocasionada por compresión unidireccional es un proceso continuo que comprende dos etapas: una fractura interna en la que el producto permanece intacto y la segunda etapa es la fractura neta, donde existe una desintegración física del producto<sup>25</sup>.

En teoría, en un sólido elástico, la carga se reparte homogéneamente entre los enlaces interatómicos y cuando sobrepasa ciertos límites se rompen todos. En la realidad, sin embargo, la carga no se distribuye de un modo tan homogéneo y los enlaces se van rompiendo sucesivamente. De otra parte, en el producto existen pequeñas fisuras que afectan la resistencia a la fractura, por lo que los valores de resistencia a la fractura, límite de ruptura, calculados sobre la base de las fuerzas interatómicas son siempre mucho más altos que los determinados experimentalmente<sup>26</sup>.

### Sólidos solubles totales (grados Brix)

Las frutas, incluyendo los bananos, contienen muchos compuestos solubles en agua, como por ejemplo, azúcares, ácidos, vitamina C, aminoácidos y algunas pectinas. Estos compuestos solubles forman el contenido de los sólidos solubles de la fruta. En la mayoría de las frutas maduras, incluyendo el banano, los azúcares representan el principal componente de los sólidos solubles. Los sólidos solubles totales (SST) son una importante característica de la calidad poscosecha en la selección de bananos, ya que la cantidad de SST o azúcar en las frutas aumenta a medida que éstas maduran. El contenido de sólidos solubles en la fruta puede representar un índice o estado de madurez útil<sup>27</sup>.

### Cambios del contenido de sólidos solubles totales

Durante la maduración de los bananos, el contenido de SST aumenta<sup>28</sup>. Sin embargo, la magnitud del aumento depende del cultivo y tipo de

banano. El contenido de sólidos solubles varía entre los cultivares y entre los grados de madurez. Por ejemplo, en algunos bananos, el contenido de sólidos solubles aumenta hasta un pico y luego disminuye (la caída en sólidos solubles totales puede ser debida a la conversión del azúcar de la pulpa en alcohol). En otros bananos los sólidos solubles totales continúan su aumento con la maduración.

### Acidez titular y pH

Los valores de pH brindan la medida de la acidez o alcalinidad de un producto, mientras que la acidez titular brinda una medida de la cantidad de ácido presente.

La evaluación del pH y la acidez titular de los bananos se utiliza primariamente para estimar la calidad para el consumo y características ocultas. Los mismos pueden ser considerados como indicadores de madurez de la fruta. Los ácidos contribuyen grandemente a la calidad poscosecha de la fruta, ya que el sabor es principalmente un balance entre los contenidos de azúcar y de acidez, por lo tanto, la estimación poscosecha de acidez es importante en la evaluación del sabor de la fruta<sup>29</sup>.

### Cambios del pH y de la acidez titular de la pulpa

En la mayoría de los bananos existe una rápida disminución del pH de la pulpa en respuesta del aumento de la madurez. Sin embargo, la magnitud de la disminución depende del cultivo<sup>30</sup>. Generalmente, cuando las frutas se cosechan con el grado de madurez verde maduro el pH de la pulpa es alto, pero al progresar la maduración, el pH cae. De este modo, el pH de la pulpa podría ser utilizado como un índice de maduración.

Usualmente, los ácidos orgánicos disminuyen durante la maduración debido a la respiración o su conversión en azúcar<sup>31</sup>. Los ácidos orgánicos son importantes por suministrar un balance azúcar/ácido deseable, que da como resultado un sabor y aroma agradables a la fruta durante la maduración. La acidez medida como acidez titular en los tejidos de la pulpa de la mayoría de los bananos muestra grandes aumentos durante la maduración o a medida que la maduración progresa. Por lo tanto, la acidez titular total podría ser utilizada como un índice de maduración<sup>32</sup>.

## Materiales y métodos

### Materia prima

El material vegetal fue adquirido en la Central Mayorista. El producto proviene de la Empresa Chiquita, la cual tiene su principal centro de operaciones en el Urabá y Magdalena; en estas zonas la temperatura es de  $27\pm 4^{\circ}\text{C}$  aproximadamente y con una precipitación anual de 78-98 pulgadas. Los bananos obtenidos se clasifican en calidad (primera) de acuerdo con la norma NTC 1190 y con el mismo grado de maduración, empacados en cajas de cartón de 40 libras y con una longitud mínima del banano de 20 cm.

Diariamente fue seleccionada aleatoriamente una muestra de 10 bananos por prueba (50 unidades) durante 12 días.

### Caracterización de la acidez titular y pH

El valor del pH del jugo de pulpa de banano fue medido con un pHmetro digital manual, introduciendo el electrodo en la muestra. El valor se obtiene directamente. Antes de realizar cada medición se calibró el pHmetro.

La acidez titular de la mezcla se determinó mediante un análisis volumétrico con hidróxido de sodio 0.1 N. Primero se pesaron 5 g de pulpa y se mezclaron con agua destilada. Se agregaron unas gotas de indicador de fenolftaleína, se tituló hasta obtener un color rosado/rojo y se registró el volumen titulado de NaOH añadido. Por último, los resultados se expresaron en términos del ácido predominante presente en el banano (ácido málico).

### Caracterización mecánica

Las pruebas se realizaron con el texturómetro TA-XT2i, Stable Micro Systems empleando el software Texture Expert Exceed, versión 1.00.

### Prueba de firmeza

Inicialmente se midió la curvatura exterior del dedo individual (banano) con una cinta métrica desde el extremo distal hasta el extremo proximal, donde se considera que termina la pulpa, el valor fue de  $23,3\pm 1,13$  cm. Luego se marcaron los puntos al 25, 50 y 75% de la longitud obtenida (Los diámetros externos a 25, 50 y 75% de la longitud de curvatura fueron  $3,4\pm 0,20$  cm  $3,6\pm 0,23$  cm y  $3,4\pm 0,19$  cm, respectivamente), y en estos se aplicó la fuerza de punción al banano con cáscara con un eje cilíndrico de 2mm de diámetro hasta causar una penetración de 20 mm (figura 1).

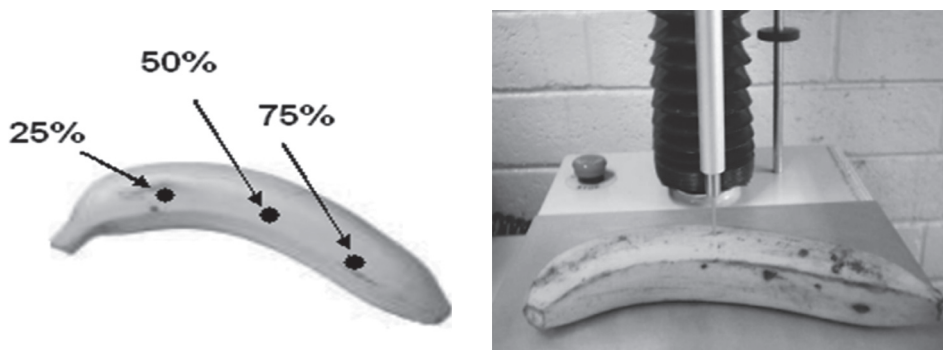


Figura 1. Medida del largo exterior (25, 50 y 75%) y prueba de firmeza con eje cilíndrico de 2mm de diámetro.

Los parámetros de operación del texturómetro TA-XT2i para la prueba de firmeza fueron: velocidad de pre-ensayo 10 mm/s, velocidad de ensayo 2 mm/s, velocidad de pos-ensayo 10 mm/s y distancia de penetración 20 mm.

Por medio de la gráfica Fuerza-Deformación proveniente del software Texture Expert Exceed, versión 1.00, se obtuvo la fuerza máxima en Newtons que necesita la sonda para penetrar la cáscara del banano, y la fuerza media que corresponde a la fuerza que necesita el dispositivo para penetrar posteriormente la pulpa (ver figura 2).

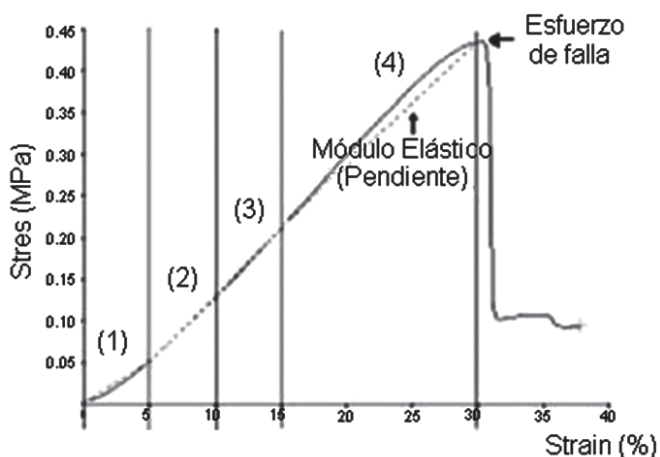


Figura 2. Curva típica Fuerza-Deformación suministrada por el software Texture Expert Exceed, versión 1.00 para la prueba de firmeza.

## Módulo de Young o elasticidad

Teniendo presente que la pulpa de banano es un material biológico (productos de ingeniería de altos contenidos de agua y caracterización celular), se determinó el modulo de Young o elasticidad, el cual define la resistencia mecánica del material en ensayos de flexión y compresión. Para cada uno de los métodos de carga se aplicaron los principios básicos de materiales que definen la respuesta mecánica del producto:

### Módulo elástico a compresión

Para los ensayos a compresión se tomaron probetas cilíndricas de pulpa con un sacabocados de 2 cm de diámetro y 4 cm de longitud, los cuales fueron sometidos a pruebas de compresión uniaxial mediante un plato de compresión de 100 mm de diámetro hasta su fractura. Los parámetros de operación de la prueba fueron: velocidad de pre-ensayo 10 mm/s, velocidad de ensayo 2 mm/s, velocidad de pos-ensayo 10 mm/s y distancia de penetración 20 mm. Además de los parámetros anteriores se determinó el área transversal (314 mm<sup>2</sup>) y la altura inicial de la probeta (40 mm).

El esfuerzo aplicado de ingeniería se obtuvo a través de la expresión (3):

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (3)$$

La deformación relativa o unitaria alcanzada ( $\varepsilon$ ) se determinó como:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (4)$$

Donde:

$\Delta L$ = cambio de longitud (m)

$L_0$ = Longitud inicial (m)

Debido a las complejidades en la estructura y morfología de los materiales biológicos, no siempre existe una relación lineal entre esfuerzo y deformación, por lo tanto, se dividió la gráfica suministrada por el software Texture Expert Exceed Versión 1.0, en cuatro zonas como se muestra en la figura 3, las cuales corresponden aproximadamente al 17, 34, 50 y 100% de la deformación total sufrida por la probeta hasta su fractura, y se obtuvo el valor del módulo de elasticidad o módulo de Young por medio de la pendiente en cada zona.

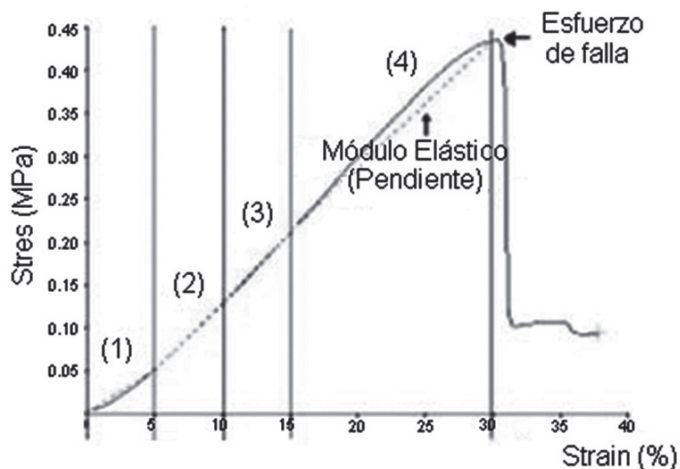


Figura 3. Curva típica Esfuerzo-Deformación unitaria suministrada por el software Texture Expert Exceed, versión 1.00 para la prueba de Módulo elástico a compresión

### Módulo elástico a flexión

Para los ensayos a flexión se tomaron muestras cilíndricas de la pulpa mediante un sacabocados de 1 cm de diámetro y 6 cm de longitud. En este ensayo la pulpa se suspende transversalmente sobre dos varillas cilíndricas paralelas separadas por una distancia fija de 4 cm, como se muestra en la figura 4. Una tercera varilla paralela a las dos primeras de 1 cm de diámetro y 6 cm de longitud se fija al texturómetro y se hace descender sobre la probeta hasta su fractura. La carga fue impuesta en el punto medio entre los soportes, midiendo su deformación para cada carga aplicada en cada instante.

Los parámetros de operación de la prueba fueron: velocidad de pre-ensayo 10 mm/s, velocidad de ensayo 0.1 mm/s, velocidad de pos-ensayo 10 mm/s y distancia de penetración 20 mm. Con los valores de la carga y deflexión (deformación) del punto medio suministrada por el software-Texture Expert Exceed Versión 1.0, y aplicando la teoría de vigas circulares (figura 4) se determinó el módulo de elasticidad del producto a flexión.

$$E = \frac{4FL^3}{3\pi D^4 d} \quad (5)$$

Donde:

- $E$  = Módulo de Young (N/m<sup>2</sup>)
- $F$  = Fuerza aplicada a la probeta (N)

- $L$  = Longitud efectiva (m)  
 $D$  = Diámetro de la probeta (m)  
 $d$  = Deformación (m)

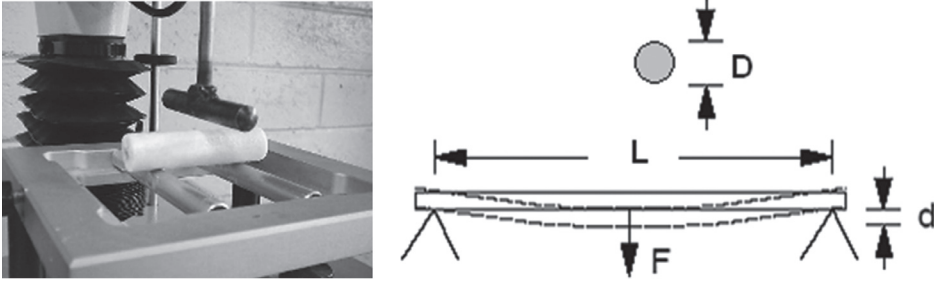


Figura 4. Prueba módulo elástico a flexión y Vista esquemática del ensayo de flexión.

### Prueba de fractura

En esta fase de la investigación fueron determinadas las fuerzas de fractura del banano tanto a compresión como a flexión, y el esfuerzo de falla.

Los parámetros de operación de las pruebas fueron: velocidad de pre-ensayo 10 mm/s, velocidad de ensayo 2 mm/s, velocidad de pos-ensayo 10 mm/s y distancia de 100 mm. La figura 5 muestra una gráfica general de Fuerza-Deformación para las pruebas de compresión y flexión del material vegetal proveniente del software Texture Expert Exceed, versión 1.00

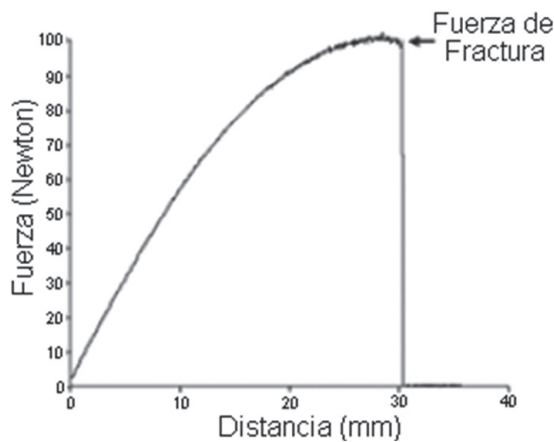


Figura 5. Curva típica presentada por el software Texture Expert Exceed, versión 1.00 para la prueba de fractura

### Fuerza de fractura a compresión y a flexión del material vegetal

Usando el texturómetro TA-XT2i, los bananos seleccionados fueron sometidos a pruebas de compresión unidireccional (longitudinal) mediante un plato de compresión de 100 mm de diámetro, y a pruebas de flexión con un soporte de fractura en tres puntos con una distancia fija de 15 cm entre los soportes, donde se apoyó el banano en posición horizontal, y una sonda de 1,5 cm de diámetro y 7 cm de longitud (figura 6). La prueba de compresión y flexión se aplicó hasta su primera ruptura.

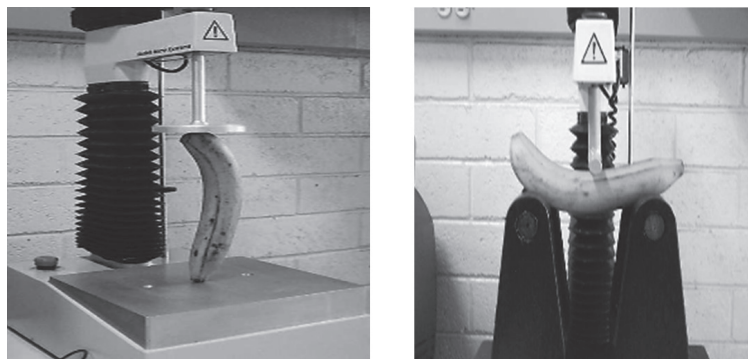


Figura 6. Prueba de fractura a compresión y a flexión del material vegetal.

Debido a que el banano es un material biológico, de la gráfica Fuerza-Deformación suministrada por el software Texture Expert Exceed Versión 1.0 se registra el valor de la fuerza de fractura macroscópica (figura 5).

### Caracterización físico-química

Para la caracterización físico-química del producto se seleccionaron aleatoriamente 5 elementos de cada prueba y en cada uno de éstos se determinaron el pH, Grados Brix y acidez titular<sup>33</sup>.

### Sólidos solubles totales (Grados Brix)

Para la determinación de los grados Brix ( $^{\circ}\text{Bx}$ ), se tomaron 30 gramos del tejido de la pulpa de cada producto seleccionado, se licuaron con 90 gramos de agua destilada durante dos minutos. Se colocaron 3 gotas de la mezcla en el prisma del refractómetro. El valor registrado se multiplicó por 4 (debido a que se toman 4 partes).

## Acidez titular y pH

El valor del pH del jugo de pulpa de banano fue medido con un pHmetro digital manual, introduciendo el electrodo en la muestra. El valor se obtiene directamente. Antes de realizar cada medición se calibró el pHmetro.

La acidez titular de la mezcla se determinó mediante un análisis volumétrico con hidróxido de sodio 0.1 N. Primero se pesaron 5 g de pulpa y se mezclaron con agua destilada. Se agregaron unas gotas de indicador de fenolftaleína, se tituló hasta obtener un color rosado/rojo y se registró el volumen titulado de NaOH añadido. Por último, los resultados se expresaron en términos del ácido predominante presente en el banano (ácido málico).

## Análisis de datos

Los resultados fueron analizados a partir de análisis de varianza ANOVA, utilizando el método Duncan como método de comparaciones múltiples, con un nivel de confianza del 95% ( $\alpha=0,05$ ). El análisis de varianza fue realizado con el paquete estadístico Statgraphics Plus versión 15.

## Análisis y resultados

### Caracterización mecánica

#### Firmeza en el material vegetal

El análisis de varianza con un nivel de significancia del 5% mostró que los factores tiempo poscosecha y puntos de penetración (25, 50 y 75% de la longitud total de cada banano) resultaron significativos ( $p<0,05$ ) pero la interacción (puntos de penetración-Día) no fue significativa ( $p>0,05$ ). Esto quiere decir que la firmeza en la cáscara de los frutos fue afectada por el tiempo poscosecha y los puntos donde penetró la sonda.

En la figura 7 se observa una disminución progresiva en la firmeza de la cáscara durante el período de almacenamiento de los frutos de 12 días, lo que concuerda con lo presentado por Gómez, et al<sup>34</sup> y Boudhrioua, et al<sup>35</sup>, quienes afirman que durante la maduración, el fruto modifica su firmeza de manera progresiva.

#### Firmeza en la pulpa

El modelo de análisis de varianza para la variable respuesta fuerza de firmeza (Newtons) en la pulpa, utilizando tiempo poscosecha (Días) como factor fijo, resultó significativo ( $p<0,05$ ). El análisis de varianza al 5% mos-

tró que el día es significativo ( $p < 0,05$ ); esto quiere decir que el tiempo poscosecha afecta la firmeza de la pulpa del fruto (figura 8).

La disminución en el valor de fuerza de firmeza se debe a la degradación de almidones para formar azúcares, a la ruptura de células y solubilidad de sustancias pépticas. La diferencia de los datos muestra que existe una heterogeneidad del producto en sí y en conjunto.

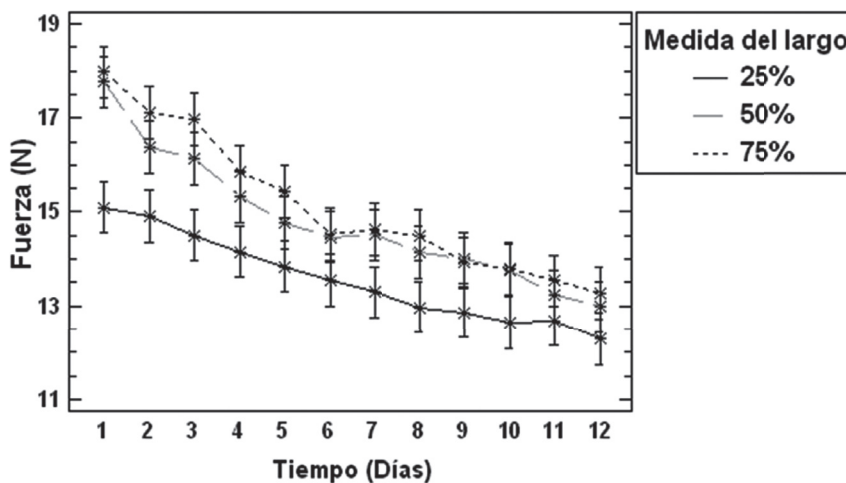


Figura 7. Firmeza promedio de la cáscara vs tiempo.

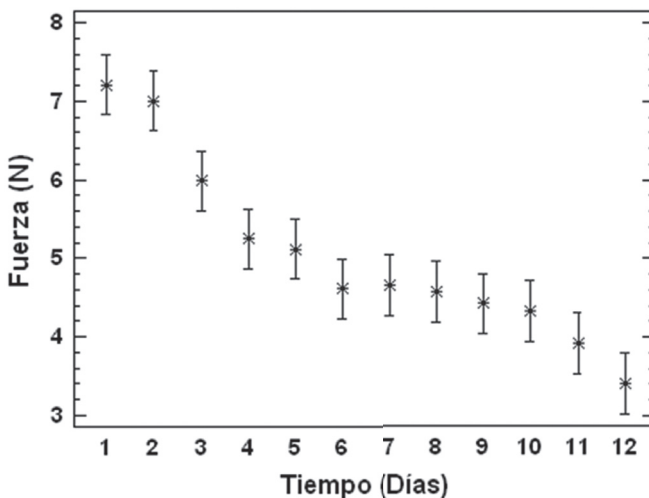


Figura 8. Firmeza promedio de la pulpa vs tiempo.

### Módulo elástico a compresión

El modelo de análisis de varianza para la variable respuesta módulo elástico a compresión (figura 9), utilizando tiempo poscosecha (días) y zonas (17, 34, 50 y 100% de la deformación total sufrida por la probeta hasta su fractura) como factores fijos, resultó significativo ( $p < 0,05$ ).

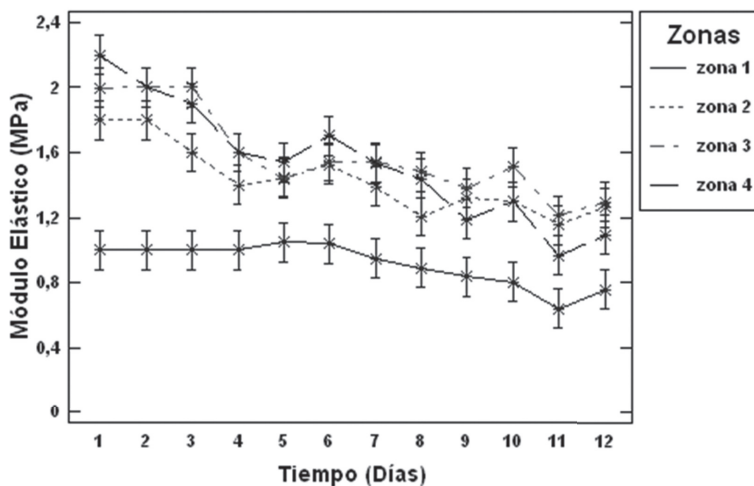


Figura 9. Modulo elástico medio a compresión a través del tiempo.

### Módulo elástico a flexión

Las medias del factor (tiempo poscosecha) difieren, es decir, los días afectan significativamente el valor del módulo elástico a flexión ( $p < 0,05$ ).

Los valores correspondientes a la variable respuesta módulo elástico a flexión van disminuyendo a medida que transcurre el tiempo poscosecha (ver figura 10).

### Fractura del material vegetal

El análisis estadístico mostró que las medias de los niveles día y posición (compresión y flexión) difieren, es decir, los días y la posición afectan significativamente la resistencia del banano ( $p < 0,05$ ). Situación contraria ocurre con la interacción de los factores posición\*día, la cual no afectan significativamente ( $p > 0,05$ ).

Los valores correspondientes a la variable respuesta fuerza de fractura disminuyen a medida que transcurre el tiempo poscosecha (figura 11). A

partir del noveno día, la fuerza necesaria para fracturar el vegetal es aproximadamente la misma tanto a ensayos de compresión como a flexión, lo que indica que el banano resiste igual, independiente de la posición en que se encuentre cuando está alcanzando la madurez.

En los ensayos de compresión y flexión se observó una disminución de la fuerza de fractura al transcurrir el tiempo poscosecha; esto es debido a que en los productos biológicos la respuesta mecánica es altamente dependiente del tiempo.

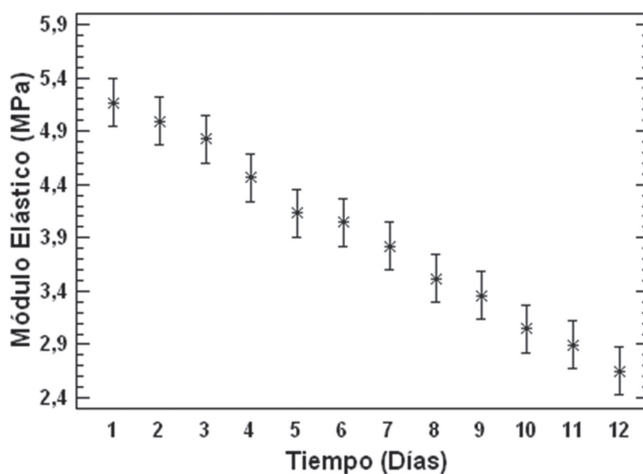


Figura 10. Módulo elástico medio a flexión a través del tiempo

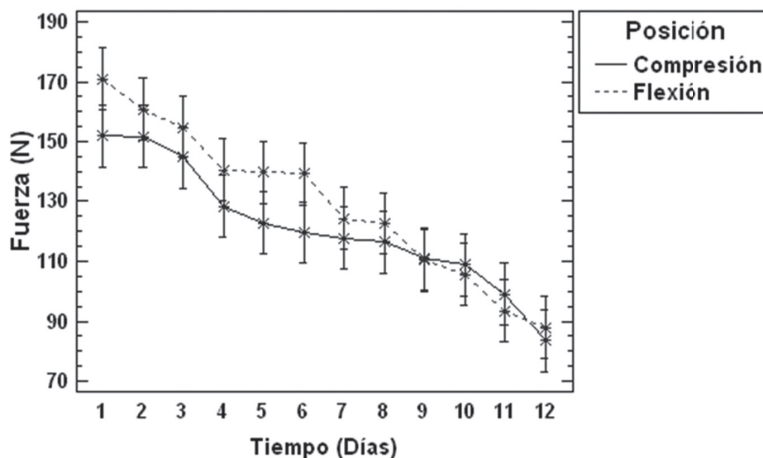


Figura 11. Fuerza de fractura media (flexión y compresión) a través del tiempo

### Esfuerzo de falla

El análisis estadístico mostró que las medias de los niveles día, posición (compresión y flexión) y la interacción entre los factores (posición-día) difieren, es decir, los días, la posición y la interacción afectan significativamente el valor del esfuerzo de falla ( $p < 0,05$ ).

Los valores correspondientes a la variable respuesta esfuerzo de falla van disminuyendo a medida que pasa el tiempo poscosecha (figura 12). El esfuerzo de la pulpa del banano es mayor a flexión que a compresión.

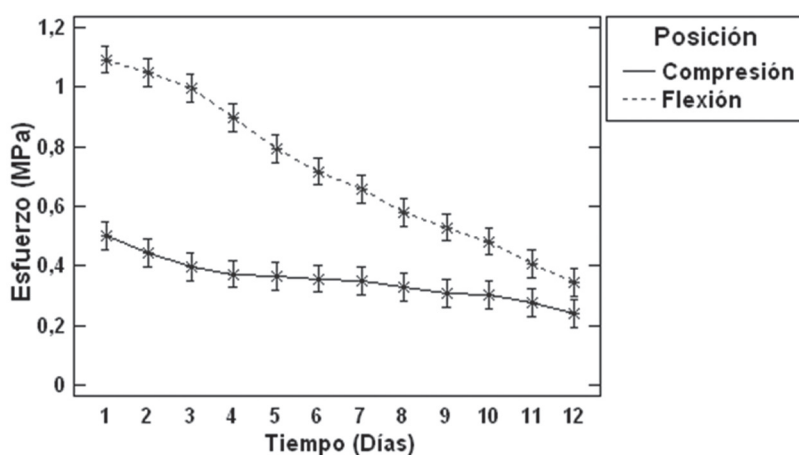


Figura 12. Esfuerzo medio de falla (compresión y flexión) en el tiempo.

De acuerdo con la anterior e independientemente de los análisis estadísticos se encontró que el producto se comporta anisotrópicamente, es decir, ciertas propiedades físicas no son las mismas en todas las direcciones.

### Caracterización físico-química

#### Sólidos solubles totales (Grados Brix)

El análisis de varianza con un nivel de significancia del 5% mostró que las medias de los tratamientos son diferentes, es decir, los días afectan significativamente el valor del contenido de sólidos solubles totales (SST) ( $p < 0,05$ ).

La figura 13 muestra que a medida que se incrementa el tiempo poscosecha, aumenta la cantidad de (SST) del producto, lo que coincide con lo reportado por Fernández, et al<sup>36</sup>.

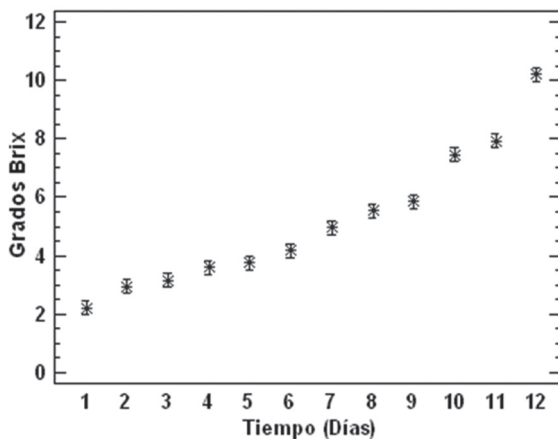


Figura 13. Sólidos Solubles Totales medios a través del tiempo.

### Acidez titular

El análisis estadístico mostró que las medias de los tratamientos difieren, es decir, los días afectan significativamente el valor de la acidez ( $p < 0,05$ ). Lo que indica que cuando aumenta el tiempo poscosecha el contenido de ácido málico cambia durante el proceso de maduración del fruto.

A medida que se incrementa el tiempo poscosecha, aumenta la acidez del producto lo cual coincide con lo reportado por Fernández, et al<sup>37</sup> (figura 14).

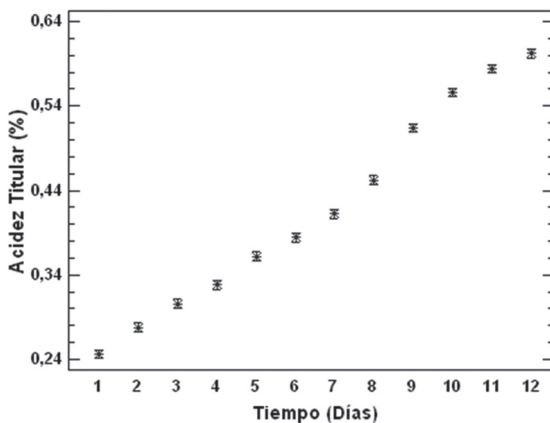


Figura 14. Acidez titular a través del tiempo.

## pH

El análisis estadístico muestra que las medias de los tratamientos difieren, es decir, los días afectan significativamente el valor del pH ( $p < 0,05$ ). Ello indica que a medida que transcurre la maduración del fruto, el pH cambia.

Los resultados muestran que a medida que se incrementa el tiempo poscosecha, disminuye el pH, como se observa en la figura 15, lo que concuerda con lo reportado por Cardeñosa<sup>38</sup>.

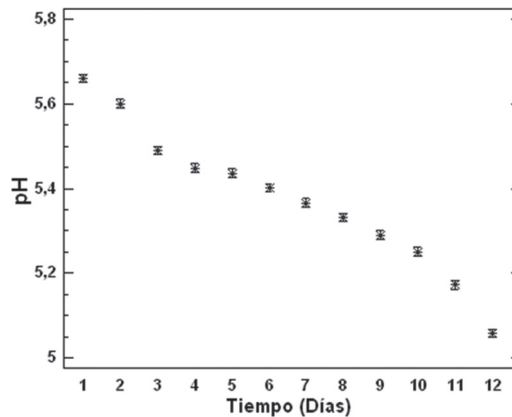


Figura 15. pH a través del tiempo.

## Conclusiones

El fruto se comporta anisotrópicamente, es decir, ciertas propiedades mecánicas tales como fuerza de fractura y módulo de elasticidad dependen de la dirección de carga.

La prueba de fractura del material vegetal mostró que la resistencia del banano es más alta bajo ensayos a flexión que a compresión; esto también ocurrió en las pruebas de esfuerzo de falla de la pulpa, lo que indica que la posición longitudinal es la más adecuada para transportar y almacenar el producto.

Para la fuerza de firmeza el punto de penetración influye en la caracterización reológica del producto, donde la firmeza del banano es menor en la zona próxima al extremo distal (parte del fruto donde está sujeto al racimo), debido a que la maduración comienza en este extremo.

La respuesta mecánica del fruto es afectada por la maduración. Se encuentra que a menor tiempo poscosecha mayor resistencia.

La composición físico-química de los frutos varía durante el período poscosecha, y presenta un aumento en el contenido de grados Brix y acidez titular al tiempo que una disminución en el pH.

Los resultados mostraron una disminución en la firmeza, fuerza de fractura y módulo elástico durante la maduración, lo que constituye el ablandamiento del fruto; esta pérdida de rigidez es uno de los cambios más evidentes durante el proceso de maduración propia de materiales viscoelásticos.

El banano como material y elemento biológico es de carácter viscoelástico, es decir, su comportamiento mecánico es intermedio entre un sólido elástico y un líquido newtoniano.

#### Referencias bibliográficas

1. COLOMBIA. AUGURA. Actividad Bananera de Urabá. Folleto divulgativo. Medellín, Colombia: Editorial Colina, 1990. 24 p.
2. SIERRA, Luis Eduardo. El Cultivo del Banano: Producción y Comercio. Medellín, Colombia. Editorial Graficas Olímpicas, 1993. 680 p.
3. SIMMONDS, Norman Willison. Los Plátanos., Ed. Blume. Barcelona, España: Blume, 1973. 539 p. Colección Agricultura Tropical.
4. SIERRA, Luis Eduardo., Op. Cit., 680 p.
5. GÓMEZ, G.; JURADO, Y. y ARCILA, M. Comportamiento físico, químico y organoléptico de frutos de plátano dominico-hartón sometidos a diferentes sistemas de almacenamiento y tipos de empaques en el Quindío. *En: Décima reunión internacional acorbat sesión cartel cosecha y poscosecha.* 2002. p. 517-522.
6. SOTO BALLESTERO, Moises. Banano Cultivo y Comercialización. San José, Costa Rica: Litografía e Imprenta Lil, 1985. 648 p.
7. SIERRA, Luis Eduardo., Op. cit., 680 p.
8. *Ibíd.*
9. COLOMBIA. AUGURA., Op. cit., 24 p.
10. SIERRA, Luis Eduardo., Op. cit. 680 p.
11. *Ibíd.*
12. DADZIE, B. K. y ORCHARD, J. E. Evaluación Rutinaria Postcosecha de Híbridos de Bananos y Plátanos: Criterios y métodos. INIBAP, Francia. 1997. 63 p.
13. BUITRAGO, Germán; *et al.* Determinación de las características físicas y propiedades mecánicas de papa cultivada en Colombia. *En: Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental.* 2004. Vol.8, No. 1. p. 102-110.

14. KRAMER, A. Definition of Texture and Its Measurement in Vegetable Products. En: Food Technology. May 1964. Vol. 18. p. 46-49.
15. DADZIE, Op. cit., 63 p.
16. SMITH, N. J. S.; *et al.* Softening and Cell Wall Changes in Bananas and Plantains. En: Aspects of Applied Biology. 1989. Vol.20. p. 57-65.
17. PALMER, J. K. The Banana. En: The Biochemistry of fruits and their products. En: Academic Press, London. 1971. Vol. 2, p. 65-105.
18. STROSHINE, Richard. Physical Properties of Agricultural Materials and Food Products. West Lafayette: Department of Agricultural and Biological Engineering, 1999. p. 113-152.
19. MOHSENIN, Nury N. Physical Properties of Plant and Animal Materials: Structure, Physical, Characteristics and Mechanical Properties. New York: Gordon and Breach Science, 1986. 664 p.
20. Ibid.
21. MULLER, H. G. Introducción a la reología de alimentos. Zaragoza, España: Editorial Acribia, 1973. p. 13-17, 22-34, 133-144.
22. PYTEL, Andrew y SINGER, Ferdinand. Resistencia de materiales. México: Editorial Oxford, 1994. p. 31, 32.
23. STROSHINE, Op. cit., p. 113-152.
24. MOHSENIN, Op. cit., 664 p.
25. POLLAK, N. and PELEG, M. Early Indications of failure in large compressive deformation of solid foods. En: Journal of Food Science. July 1980. Vol. 45, no. 4. p. 825-830
26. MULLER, Op. cit., p. 22-34
27. DADZIE, Op. cit., 63 p.
28. Ibid., 63 p.
29. Ibid., 63 p.
30. Ibid., 63 p.
31. WILLS, Ron; *et al.* Postharvest: An introduction to the physiology and handling of fruit and vegetables. 3<sup>rd</sup> edition. Oxford, UK: Blackwell Scientific Publications, 1989. 176 p.
32. DADZIE, Op. cit., 63 p.
33. AOAC (Association of Official Agricultural Chemists). Official Methods of Analysis. Washington, D.C.: AOAC, 1990.

34. GÓMEZ, Op. cit., p. 517-522.
35. BOUDHRIOUA, N.; *et al.* Influence of ripeness and air temperature on changes in banana texture during drying. En: Journal of Food Engineering. November 2002. Vol. 55, no. 2. p. 115-121.
36. FERNÁNDEZ, K. M.; CARVALO de V.D. and CALVIDAL, J. A. Research Note Physical changes during ripening of silver bananas. En: Journal of food science. 1979. Vol. 44. p. 1254, 1255.
37. *Ibíd.*, p. 1254, 1255.
38. CARDEÑOSA BARRIGA, Ricardo. El genero Musa en Colombia, plátanos y bananas afines. Palmira : Minagricultura, 1954. 367 p.



# Inhibición de la polifenoloxidasas extraída del banano (*Cavendish*) por medio de algunos derivados del isoespintanol

Maritza Andrea Gil Garzón \*

Benjamín Alberto Rojano\*\*

Carlos Arturo Guerrero Eraso\*\*\*

## Resumen

**Introducción.** Buscando nuevas fuentes de compuestos naturales que contengan actividad antioxidante, se ha encontrado una amplia variedad de plantas fenólicas con alto poder protector sobre la inhibición del pardeamiento enzimático responsable de cambios de color indeseables en frutas y vegetales frescos. **Objetivo.** En este trabajo, se estudió la inhibición del pardeamiento enzimático de la polifenol oxidasa, PPO, extraída del banano Cavendish Gigante (tipo exportación), utilizando como sustrato dopamina. **Metodología.** Como inhibidores se utilizaron: el isoespintanol, metabolito extraído de la planta *Oxandra cf. xylopioides* (*Annonaceae*) y dos de sus análogos: 2-isopropil-4-bromo-3,6-dimetoxi-5-metilfenol y 3-isopropil-6-metil-1,2,4-trihidroxibenceno que fueron obtenidos simultáneamente por el método de bromación con bromuro de dimetilsulfonio, en una relación (75:25), respectivamente. Además, se utilizó el ácido ascórbico como antioxidante de referencia. Los compuestos sintetizados fueron caracterizados por espectroscopia de resonancia magnética, RMN y cromatografía acoplada a masas, GC-MS y su capacidad antioxidante fue

\* Ingeniera de Alimentos, magíster en Ciencia-Química. Docente coordinadora del programa de Ingeniería de Alimentos. Corporación Universitaria Lasallista.

\*\* Químico, magíster en Ciencia y Tecnología de Alimentos, doctor en Ciencias Químicas. Director del Grupo de Investigación en Química de los Productos Naturales y los Alimentos, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.

\*\*\* Ingeniero de Alimentos, magíster en Ciencia y Tecnología de Alimentos. Investigador grupo de investigación GRIAL. Corporación Universitaria Lasallista.

evaluada por los métodos de ABTS, FRAP y DPPH. La actividad de la PPO parcialmente purificada, fue analizada sobre el extracto enzimático, espectrofotométricamente a 30°C en presencia de los antioxidantes a 500, 1000 y 1500 ppm. **Resultados y análisis.** El isoespintanol presentó la mejor respuesta por las tres técnicas de capacidad antioxidante, mientras el bromado presentó la mejor capacidad reductora por la técnica FRAP y el demetilado tuvo un mejor comportamiento en medio metanólico (DPPH). La actividad de la PPO fue 102.93 unidades de actividad; esto significa que hubo una reducción entre un 72.5 y 92% con todos los compuestos. La mayor inhibición se logró a 1500 ppm de ácido ascórbico (92%). Con la inhibición de la actividad enzimática para el compuesto bromado y demetilado no se presentaron diferencias significativas ( $P > 0.05$ ) a 500 ppm (84.8 – 84.53%), 1000 ppm (73.87 – 72.53%) y 1500 ppm (84 – 82.4%), respectivamente. Lo contrario ocurrió para el isoespintanol con respecto a sus dos análogos, a 1000 ppm (42.4%), que evidenciaron diferencias estadísticamente significativas ( $P > 0.05$ ).

El tipo de inhibición fue estudiada para el isoespintanol que presentó una inhibición competitiva ( $K_I = 0.015M$  y  $K_M = 0.026M$ ).

**Palabras clave:** PPO, Isoespintanol, pardeamiento enzimático, DPPH, FRAP, ABTS.

### Inhibition of polyphenoloxidase from bananas (*cavendish*) by the use of some isoespintanol derivatives

#### Abstract

**Introduction.** Looking for new sources of natural compounds with anti-oxidant activity, a great variety of phenolic plants have been being found. They have a high protective power on the enzymatic browning, responsible for undesired color changes in fresh fruits and vegetables.

**Objective.** In this work, enzymatic browning inhibition of polyphenol oxidase, PPO, extracted from Giant Cavendish bananas (export type) is studied, by the use of the dopamine substratum. **Methodology.** The inhibitors used were: Isoespintanol (a metabolite extracted from *Oxandra cf. xylopioides* (Annonaceae) and two of its analogs: 2-isopropyl-4-bromo-3,6-dimethoxy-5-methylphenol and 3-isopropyl-6-methyl-1,2,4-trihydroxybenzene, which were simultaneously obtained by the use of the bromination method with dimethylsulphonium bromide in a (75:25) relation, respectively. Also, ascorbic acid was used as a reference anti-oxidant. The compounds synthesized were characterized by

performing a magnetic resonance spectroscopy and a chromatography coupled to masses and its anti-oxidant capability was evaluated with the ABTS, FRAP and DPPH methods. PPO's activity, partially purified, was analyzed on the enzymatic extract, spectrophotometrically, at 30°C before the anti-oxidants at 500, 1000 and 1500 ppm. **Results and analysis.** Isoespintanol had the best response under the three anti-oxidant capability techniques, while the bromination had the best reduction capability under the FRAP method and the demethylated had a better performance in the methanolic medium. PPO's activity was 102.3 activity units, this means that there was a reduction between 72.5 and 92% with all of the compounds. The highest inhibition was achieved at 1500 ppm of ascorbic acid (92%). With the inhibition of the enzymatic activity for the brominated and the demethylated compound there were no significant differences, ( $P>0.05$ ) at 500 ppm (84.8 – 84.53%), 1000 ppm (73.87 - 72.53%) and 1500 ppm (84 – 82.4%), respectively. The opposite took place for the isoespintanol concerning its two analogs, at 1000 ppm (42.4%), which obtained significant statistical differences ( $P>0.05$ ). The inhibition type was studied for isoespintanol, which had a competitive inhibition ( $KI=0.015M$  y  $KM=0.026M$ ).

**Key words:** PPO, Isoespintanol, enzymatic browning, DPPH, FRAP, ABTS.

## Introducción

El color en los alimentos es un parámetro de gran importancia para el consumidor. Al menos cinco causas han sido detectadas como responsables del cambio de color en frutas y vegetales frescos: pardeamiento u oxidación enzimática de polifenoles, reacciones de Maillard, oxidación de ácido ascórbico, caramelización y formación de polímeros oscurecidos por la acción oxidativa de lípidos<sup>1-4</sup>. Estas reacciones ocurren cerca del esquema de proceso del consumidor, como el almacenamiento y exhibición; por tal razón, el control debe ser realizado desde la recolección hasta el consumidor para minimizar pérdidas y sostener el valor económico para el agricultor y el procesador. Se han comprobado pérdidas que sobrepasan el 50% en frutas exóticas y vegetales, en particular variedades tropicales y subtropicales<sup>5</sup>.

Las enzimas que catalizan el pardeamiento pertenecen a las óxido-reductasas, y se conocen con diferentes nombres: monofenol oxidasa, tirosinasa y fenolasa; esta última es la más aceptada y cuyo nombre corresponde a la *o*-difenoil-oxígeno-óxido-reductasa (E.C. 1.14.18.1 usualmente llamada, PPO)<sup>6,7</sup>. La PPO cataliza el paso inicial de la oxidación de *o*-fenoles a *o*-quinonas, los cuales sufrirán más adelante polimerización para producir pigmentos insolubles y oscuros reconocidos como melaninas responsables del color<sup>8-11</sup>. El pardeamiento enzimático también está involucrado con la pérdida en el valor nutricional debido a la oxidación del ácido ascórbico<sup>12,13</sup>.

En la industria de alimentos, la actividad de la PPO puede ser evitada usando tratamientos térmicos<sup>14</sup>, pero el calor puede causar características no deseables<sup>15</sup> especialmente en vegetales y frutas frescas<sup>16</sup>. Otras alternativas para la inhibición de la actividad han sido propuestas: aditivos químicos como bisulfitos<sup>17-19</sup>, ácido ascórbico y sus análogos<sup>20-22</sup> y cisteína como agente reductor de quinonas a difenoles<sup>23-25</sup>. Además, puede ser inhibida por varias técnicas basadas en la eliminación de uno o más componentes esenciales como oxígeno y Cu<sup>2+</sup>, cambios del sustrato<sup>26,27</sup>. Así, los inhibidores de pardeamiento pueden ser clasificados según su modo de acción en seis categorías: agente reductores, quelantes y acomplejantes, inhibidores de enzimas, tratamientos enzimáticos<sup>28</sup> y atrapadores de oxígeno singulete<sup>29</sup>.

El control del pardeamiento es un reto en la industria de frutas y vegetales. Actualmente, los productores de alimentos prefieren aditivos naturales especialmente agentes antioxidantes libres de sulfitos, debido al peligro que representan para la salud humana, especialmente en pacientes asmáticos<sup>30</sup>. De esta forma, hay una tendencia de crecimiento en el reemplazo de antioxidantes sintéticos por antioxidantes naturales que no produzcan efectos tóxicos<sup>31</sup>. En los últimos años, los compuestos fenólicos de origen vegetal han sido objeto de estudio<sup>32-35</sup> y se ha identificado un gran número de sustancias con amplio espectro de actividades funcionales, principalmente por su potencial benéfico para la salud debido a su actividad antioxidante<sup>36</sup>, por la presencia de algunos de sus productos de degradación que son multifuncionales y pueden actuar como agentes reductores, reaccionantes con radicales libres, quelantes y acciones antimicrobianas<sup>37,38,39</sup> que los convierte en una nueva alternativa antioxidante.

En la planta *Oxandra* cf. *xylopioides* (*Annonaceae*) se encuentran como metabolitos principales el berenjenol y el isoespintanol (0.1 y 1.5 % en

base seca respectivamente) los cuales poseen actividad anti-inflamatoria<sup>40</sup>. Además, se ha estudiado el efecto protector del isoespintanol (2-isopropil-3,6-dimetoxi-5-metilfenol), sobre el ADN de linfocitos humanos, y comparado con el BHA como antioxidante de referencia, muestra un gran efecto a un bajo rango de concentraciones (3-80 mM)<sup>41</sup>. Por la anterior razón, el objetivo de este trabajo consistió en la evaluación de la inhibición del pardeamiento enzimático en el extracto parcialmente purificado del banano usando isoespintanol y dos de sus análogos, y compararlos, además, con el ácido ascórbico que en anteriores estudios presentó inhibición total sobre la pulpa de banano<sup>42</sup>.

## Marco teórico

Las reacciones de óxido-reducción son comunes en los sistemas biológicos y también en los alimentos. Algunas de estas reacciones son beneficiosas para los alimentos, pero otras son perjudiciales como ocurre con la degradación oxidativa de las vitaminas, pigmentos y lípidos que producen la pérdida del valor nutricional, el desarrollo de malos olores y color desagradable. La oxidación se produce cuando un átomo o grupo de átomos ceden electrones. De forma simultánea, se produce la correspondiente reacción de reducción que implica la captación de electrones por otro átomo diferente o grupo de átomos. Estas reacciones pueden o no incluir la adición de átomos de oxígeno o la pérdida de átomos de hidrógeno de la sustancia que se está oxidando<sup>43</sup>.

Antes del desarrollo de una tecnología química específica para el control de los radicales libres responsables de la oxidación, el término antioxidante se aplicó a todas las sustancias que inhibían las reacciones de oxidación, independiente de su mecanismo de acción. Más recientemente, el término "antioxidantes alimentarios" se ha aplicado a aquellos compuestos que interrumpen la reacción en cadena de los radicales libres formados en la oxidación de lípidos y a los que eliminan el oxígeno singulete; sin embargo, el término no debería utilizarse con un sentido tan restrictivo<sup>44</sup>.

Existen cientos de compuestos naturales y sintéticos con propiedades antioxidantes, aunque para su empleo en los alimentos deben cumplir ciertas exigencias, entre ellas, superar las pruebas de inocuidad. Para que su eficacia sea máxima se realizan combinaciones de antioxidantes o con diversos agentes secuestradores de metal, y se logra una acción sinérgica que proporciona una protección más completa<sup>45,46</sup>.

## Mecanismo de acción de los antioxidantes

Para comprender el papel protector de los antioxidantes, se han propuesto dos mecanismos principales. En el primero, los radicales libres remueven un átomo de hidrógeno del antioxidante (ArOH) que, a su vez, se convierte en radical:



La alta estabilidad del radical  $\text{ArO}\cdot$  corresponde a una mejor eficacia del antioxidante ArOH.

El segundo mecanismo es la transferencia de un electrón, donde el antioxidante puede dar un electrón al radical libre y convertirse en un catión radical.



En este caso, el radical catión es más estable y no reacciona con las moléculas del sustrato<sup>47,48</sup>.

## Pardeamiento enzimático

El pardeamiento enzimático está relacionado con la oxidación de compuestos fenólicos en presencia de oxígeno. Estos compuestos se encuentran localizados principalmente en las vacuolas y son catalizados por la enzima polifenol oxidasa, PPO, localizada en el citoplasma. Diferentes situaciones pueden causar pardeamientos: daños fisiológicos durante la maduración, algunos desórdenes en el almacenamiento y procesos tecnológicos involucrados con heridas o rompimientos de la superficie. La tendencia de las plantas a cambiar de color (más oscuras) resulta de la acción de varios factores, los cuales están naturalmente involucrados con la actividad de la enzima, la naturaleza y el contenido del sustrato oxidable. Todos estos factores varían con el tiempo de maduración de las frutas y vegetales, su estado fisiológico, la variedad y los tratamientos a las que son sometidos.

### Polifenol oxidasa, PPO

Las enzimas que catalizan el pardeamiento y coloración de las frutas y vegetales pertenecen a las óxido-reductasas, y se conocen con diferentes nombres: fenoloxidasas, monofenol oxidasa, difenol oxidasa, catecolasa, tirosinasa y fenolasa; esta última es la más aceptada y su nombre corresponde a la o-difenol-oxígeno-óxido-reductasa, usualmente llamada PPO

[6]; por esta razón, su actividad ha sido ampliamente estudiada durante las últimas dos décadas<sup>49,50</sup>. Desde 1992, se han hecho muchos progresos concernientes a la estructura, localización y clasificación de la PPO, particularmente debido a actividad biológica, molecular e inmunológica, y su uso en métodos químicos<sup>51</sup>.

Dependiendo de su especificidad sobre sus sustratos, se pueden agrupar en tres tipos de enzimas:

- Cresolasa (EC. 1.14.18.1 monofenol monooxigenasa).
- Catecolasa o fenolasa (EC. 1.10.3.1, o-difenol: oxígeno óxido-reductasa).
- *p*-difenoloxidasas o laccasas<sup>52,53</sup>.

Así también, dependiendo del sustrato sobre el que actúa, se han definido dos clases de actividades enzimáticas: la primera denominada (“cresolasa”) cuando hidroxila monofenoles, y la segunda (“catecolasa”) oxida difenoles a quinonas. Dependiendo de la fuente, la actividad “cresolasa” es mayor o menor, incluso inexistente en algunos casos, pero, en general, todas las enzimas tienen actividad “catecolasa”.

La forma de actuación de la enzima con dos actividades distintas ha sido aclarada en parte hace pocos años, relativamente. La enzima cataliza dos reacciones porque en el estado nativo se encuentra en dos formas distintas: la llamada met-tirosinasa, que es activa solamente sobre monofenoles, y la oxi-tirosinasa. Estas formas se interconvierten entre ellas, de forma acoplada al desarrollo de las reacciones que catalizan<sup>54</sup>.

La característica estructural más importante de estas enzimas es la presencia en su centro activo de dos iones de cobre, Cu<sup>1+</sup> (figura 1), unidos cada uno de ellos a dos<sup>55</sup> o tres histidinas, que se han conservado a lo largo de la evolución en todas las enzimas de este tipo, desde las bacterias al hombre. En su entorno se sitúa una serie de aminoácidos hidrofóbicos, con anillos aromáticos, que también son importantes en su actividad, para la unión de los sustratos<sup>56</sup>.

Además, existe una alta heterogeneidad entre especies y dentro de la misma especie durante las diferentes etapas del desarrollo, con el fin de expresar la actividad enzimática de la PPO que puede variar dependiendo de factores como: pH óptimo, latencia, especificidad por el sustrato, etc.<sup>58</sup>

### Mecanismo de pardeamiento enzimático

Las reacciones de formación de quinonas involucran compuestos fenólicos tipo flavonoides<sup>59</sup> y no fenólicos. Las quinonas resultantes de la

oxidación enzimática tienen diferentes características espectrales que dependen del fenol a partir del cual ellas se originan y el pH del medio<sup>60</sup>. La oxidación de quinonas con otra molécula de fenol puede ser muy rápida, y depende del potencial de reducción respectiva del complejo enzima-sustrato formado. Esta reacción guía a la formación de dímeros del fenol original o regeneración del fenol. Por supuesto, sus productos están sujetos a oxidaciones futuras, ya sea por vía enzimática o por vía *o*-quinona, y dan como resultado grandes oligómeros y formación de enlaces covalentes con aminoácidos nucleofílicos para producir pigmentos insolubles y oscuros reconocidos como melaninas<sup>61</sup>. Las reacciones de *o*-quinonas con compuestos no fenólicos conducen también a la formación de pigmentos oscuros e insolubles en agua llamados melaninas<sup>62</sup>.

El mecanismo descrito en forma ordenada para la formación de melanina consiste en varias etapas: en la primera (hidroxilación de monofenoles a *o*-difenoles) la enzima liga primero el oxígeno como se muestra en la figura 1 y después el monofenol; esta etapa es determinante de la reacción, con participación de los intermediarios indicados en la figura 2. Segundo, se produce un cambio de valencia ( $\text{Cu}^{1+}$   $\text{Cu}^{2+}$ ), y se forma un complejo, en el que el enlace O-O está tan polarizado que se produce la hidroxilación hasta *o*-difenilos. Finalmente la oxidación del *o*-difenol hasta quinonas finaliza el ciclo<sup>63</sup>.

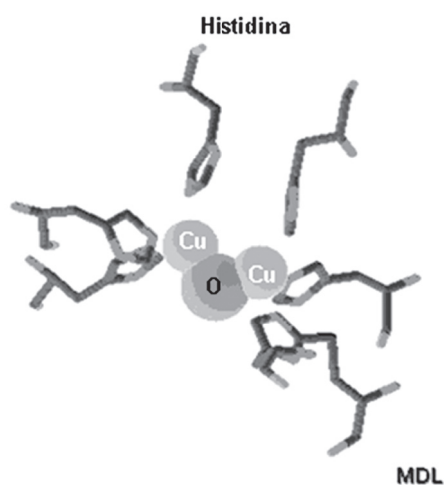
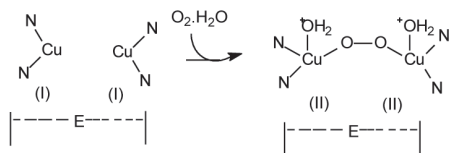


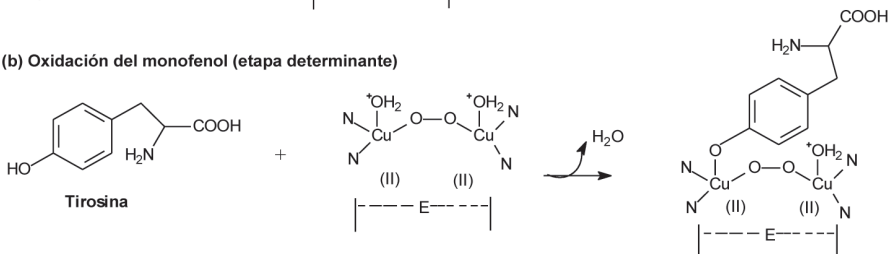
Figura 1. Estructura del sitio activo de la polifenoloxidasasa de la batata

Tomado de Calvo, M.<sup>57</sup>

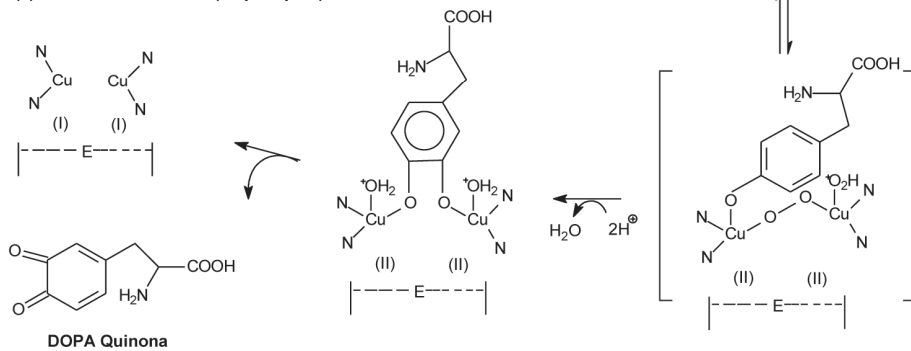
(a) Oxidación de la enzima en presencia de oxígeno



(b) Oxidación del monofenol (etapa determinante)



(c) Oxidación del difenol (etapa rápida)



(d) Reacciones no enzimáticas (oxidación de la quinona hasta melanina)

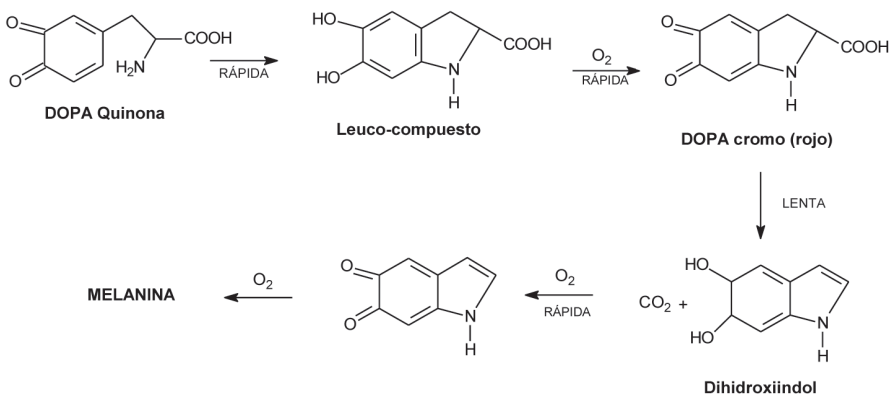


Figura 2. Oxidación de tirosina causada por PPO para producir melanina.

Tomado de Belizt, H. D.<sup>64</sup> y Lerner, A. B.<sup>65</sup>

## Control de pardeamiento

El control de pardeamiento es un reto en la industria de frutas y vegetales, especialmente con el desarrollo de técnicas que requieran del mínimo procesamiento de estas materias primas. Se han reportado previamente métodos biológicos-moleculares desarrollados para el control del pardeamiento. En adición, diferentes métodos para el control del pardeamiento enzimático modernos o tradicionales como los tratamientos físicos (térmicos, desecación o disminución de la  $a_w$ , congelación, refrigeración, etc.) y químicos (adición de inhibidores y otros aditivos) son aún objeto de investigación. Estas formas de control pueden dividirse en tres clases dependiendo del factor que ataquen, ya sea la enzima, el sustrato o los productos de la reacción<sup>66</sup>.

### Acción sobre la enzima

La acidificación, alcalinización y tratamientos térmicos son frecuentemente aplicados para inhibir la actividad enzimática. La alcalinización no puede ser aplicada a compuestos fenólicos por su alta sensibilidad a la oxidación a pH alcalinos. La PPO muestra su actividad óptima a un pH entre 5 y 7<sup>67-69</sup> y la enzima parece relativamente sensible a pH ácidos. Pero, el control del pardeamiento enzimático únicamente por acidificación es muy difícil, a menos que sea a pH muy bajos.

### Acción sobre los sustratos

La remoción completa del oxígeno es una forma muy satisfactoria para el control de la oxidación fenólica catalizada por la PPO, aunque este método no puede ser aplicado a tejidos vivos porque puede causar condiciones anaeróbicas y tampoco es aceptable en algunos productos frescos.

Concerniente a los sustratos fenólicos, dos opciones han sido investigadas. La primera es la eliminación física por adsorbentes específicos como la ciclodextrina<sup>70</sup>. La segunda forma de remoción de compuestos fenólicos es por su modificación enzimática a través del uso de *o*-metil-transferasa<sup>71</sup>.

### Acción sobre productos

Las *o*-quinonas pueden ser reducidas a *o*-difenoles o pueden reaccionar con otros compuestos y formar complejos no coloreados. Algunos de los compuestos reductores más usados son: el ácido ascórbico, los sulfitos, los tioles como la cisteína y los aminoácidos<sup>72,73</sup>.

Recientemente, muchas técnicas nuevas son aplicadas en la prevención del pardeamiento enzimático, tales como: tratamientos físicos (irradiación, altas presiones<sup>74</sup>, ultrasonido<sup>75</sup>, luz pulsada, calentamiento óhmico, cocción al vacío, ultrafiltración, etc.) y químicos o biológicos (bioconservantes, atmósferas modificadas, enzimas inhibidoras, etc.) que disminuyen los riesgos que traen los tratamientos térmicos<sup>76,77</sup>.

## Clasificación de inhibidores

El uso de inhibidores es restringido teniendo en cuenta consideraciones relevantes como la toxicidad, el efecto sobre las características organolépticas y el costo. Los inhibidores de pardeamiento pueden ser clasificados según el modo de acción en seis categorías:

- Agentes reductores: agentes sulfhídricos, ácido ascórbico y sus análogos, cisteína, glutatión, etc.
- Acidulantes: ácido cítrico y fosfórico.
- Agentes quelantes: fosfatos, EDTA, ácidos orgánicos, etc.
- Agentes acomplejantes: ciclodextrina
- Inhibidores de enzimas: ácidos carboxílicos aromáticos, alcoholes alifáticos, aniones, péptidos, resorcinol sustituido.
- Tratamientos enzimáticos: oxigenasas, o-metil transferasas, proteasas.

### Agentes reductores

Previenen el pardeamiento enzimático por la reducción de o-quinonas a o-difenoles no coloreados o al reaccionar irreversiblemente con o-quinonas para formar productos no coloreados más estables. Los compuestos derivados del azufre son los más ampliamente empleados en la industria de los alimentos.

- **Derivados de azufre.** Los derivados de azufre tienen un rol multifuncional en los alimentos; estos poseen actividad antimicrobiana e inhiben el pardeamiento tanto enzimático como no enzimático. algunas especies como el bisulfito ( $\text{HSO}_3^-$ ) y sulfitos ( $\text{SO}_3^{2-}$ ) ejerce un efecto competitivo con la PPO, debido al enlace formado entre este y el sitio activo de la enzima; además, este compuesto reacciona con algunos intermediarios como quinonas, que resultan en la formación de sulfoquinonas e inhiben irreversiblemente la PPO.

- Los sulfitos y sus derivados son antioxidantes químicos muy poderosos actualmente utilizados en la industria, pero que representan un potencial riesgo para la salud<sup>78,79</sup>.
- **Ácido L-ascórbico.** El ácido L-ascórbico (vitamina C) es un agente reductor moderado<sup>80-84</sup>. Este previene el pardeamiento y otras reacciones oxidativas en frutas y vegetales; además, es considerado como un buen secuestrante (atrapador) de oxígeno que permite la remoción del oxígeno molecular en las reacciones de la PPO<sup>85</sup>. Sin embargo, el ácido ascórbico es oxidado al ácido dihidroascórbico en forma irreversible durante el proceso de reducción y permite el pardeamiento posteriormente. Es muy usado el ácido cítrico en conjunto con el ácido L-ascórbico para mantener el nivel del pH en el medio.
- **Cisteína.** La cisteína tiene un efectivo poder inhibidor enzimático<sup>86-89</sup>, pero tiene efectos negativos sobre el sabor. La inhibición de la melanosísis por cisteína es debido a la formación de o-quinonas tiol conjugadas (reacción de adición); la cisteína también muestra reducción de las o-quinonas a su fenol precursor.

#### Acidulantes.

Los grupos ionizables de la estructura proteica de las enzimas son afectados por el pH del medio. Estos grupos deben estar en su forma iónica apropiada a fin de mantener la conformación del sitio activo, el enlace con el sustrato o catalizar la reacción enzimática. Los cambios en la ionización son generalmente reversibles. La desnaturalización irreversible ocurre bajo condiciones extremas de pH. La estabilidad del sustrato es también afectada por el cambio del pH. Los sustratos degradados actúan como inhibidores de enzimas.

Los acidulantes son aplicados generalmente para mantener el pH por debajo del punto óptimo de actividad catalítica de la enzima. Acidulantes como el ácido cítrico, málico y fosfórico pueden inhibir el efecto de la PPO. Los acidulantes son usados frecuentemente con otros antioxidantes.

#### Quelantes

Las enzimas generalmente poseen iones de metales en su sitio activo. Los agentes quelantes remueven estos iones y pueden de esta forma inactivar la enzima. Tanto los complejos formados entre los agentes quelantes como los prooxidantes tales como el cobre o el hierro son inhibidores.

### Agentes acomplejantes

La cavidad central de la ciclodextrina es hidrofóbica mientras que la región externa de este oligosacárido es hidrofílica, debido a la presencia de grupos hidroxilos primarios y secundarios.

La más importante propiedad funcional de la ciclodextrina es su habilidad para la inclusión de moléculas dentro del núcleo hidrofóbico o ligeramente apolar, que la convierte en un excelente inhibidor de pardeamiento en frutas frescas y vegetales crudos<sup>90</sup>.

### Inhibidores de enzimas, 4-Hexilresorcinol (4-HR)

Los resorcinolos sustituidos, compuestos *m*-difénolicos que están estructuralmente relacionados con los sustratos fenólicos, tienen un efecto inhibidor competitivo con la PPO<sup>91-93</sup>; la sustitución hidrofóbica con hexil, dodecil y grupos ciclohexil en la posición 4 del anillo aromático del resorcinol incrementa la efectividad de su efecto inhibidor competitivo sobre la polifenoloxidasas.

El 4-HR sustituido tiene  $I_{50}$  capacidad inhibidora del 50% a una concentración de 0.2 M. La actividad de la monofenolasa y difenolasa de la tirosinasa son inhibidas por el 4-HR.

Las principales ventajas del 4-HR son: la efectividad a bajas concentraciones, la estabilidad química, la inhabilidad para decolorar compuestos preformados<sup>94</sup> y el alto sinergismo con el ácido ascórbico debido a que el ácido ascórbico reduce las quinonas y el 4-HR interactúa con la PPO<sup>95</sup>.

### Plantas fenólicas como antioxidantes naturales

Los antioxidantes naturales en alimentos pueden provenir de compuestos endógenos en uno o más componentes del alimento, de sustancias formadas de reacciones durante el procesamiento o de aditivos alimenticios aislados de fuentes naturales. La mayoría de los antioxidantes son compuestos fenólicos presentes en todas las frutas y vegetales ampliamente consumidos en la dieta diaria en forma fresca o como derivados de productos alimenticios.

Los antioxidantes fenólicos de plantas comúnmente incluyen componentes flavonoides, derivados de ácido cinámico y tocoferoles. Muchos compuestos fenólicos son buenos sustratos del pardeamiento y buenos antioxidantes como las catequinas; por el contrario, los flavonoles no son buenos sustratos de pardeamiento pero son antioxidantes muy activos.

Las fuentes naturales de las plantas antioxidantes han sido ampliamente estudiadas. Estas plantas incluyen diferentes órganos tales como semillas, frutas, hojas, entre otros.

Las plantas con contenido de fenoles y algunos de sus productos de degradación son multifuncionales y pueden actuar como agentes reductores, reaccionantes con radicales libres, quelantes y atrapadores de oxígeno singulete<sup>96</sup>.

Los estudios más recientes sobre la planta *Oxandra* cf. *xylopioides* (*Annonaceae*), perteneciente al género de *Magnoliales*, presentan como metabolitos altamente bioactivos, el berenjenol y el isoespintanol<sup>97-99</sup>.

El Isoespintanol (2-isopropil-3,6-dimetoxi-5-metilfenol) es uno de los compuestos aislados de las hojas de *Oxandra* cf. *xylopioides* (*Annonaceae*), el cual es considerado como un monoterpeno de estructura cristalina sólida con propiedades antioxidantes<sup>100-103</sup>. Los estudios más recientes acerca del efecto protector de linfocitos humanos, sometidos a estrés oxidativo inducido por peróxido de hidrógeno y comparado con el butilhidroxianisol (BHA), muestran como resultado una gran actividad antioxidante a bajas concentraciones, y no presentan efectos cito ó genotóxicos.

## Análisis de la actividad antioxidante

Existen varios métodos para la evaluación de la capacidad antioxidante; estos son de fácil aplicación y son citados a continuación:

La actividad antioxidante es ampliamente usada como parámetro para caracterizar diferentes materiales vegetales. Esta actividad se relaciona con compuestos capaces de proteger un sistema biológico del efecto potencialmente dañino de procesos que causan excesiva oxidación involucrando especies reactivas del oxígeno; otras se basan en la oxidación-reducción de iones metálicos y la capacidad de una muestra para atrapar radicales libres<sup>104,105</sup>.

### Reacción con el radical 2,2-difenil-1-picril hidrazilo (DPPH)

El DPPH• (figura 3) es un radical estable de color violeta, cuya absorbancia disminuye al ser reducido por un antioxidante (AH):



Esto permite cuantificar la capacidad antioxidante de las muestras, y medir el grado de decoloración de una disolución metanólica de DPPH•, a una longitud de onda de 515-517nm<sup>106</sup>.

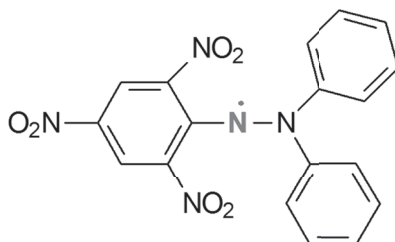


Figura 3. Estructura del radical libre 2,2-difenil-1-picrilhidrazilo (DPPH•)

Tomado de Prior; et al.<sup>107</sup>

Reacción con el radical catiónico 2,2'-azino-bis(3-etilbenzotiazolin-6-sulfonato de amonio (ABTS<sup>•+</sup>)

Este ensayo es denominado también Método TEAC (Trolox Equivalent Antioxidant Capacity Assay)<sup>108</sup> y es uno de los más usados para la determinación de la capacidad antioxidante total. La base del método consiste en la cuantificación de la decoloración del radical ABTS<sup>•+</sup>, debido a la interacción con especies donantes de hidrógeno o de electrones (figura 4). El radical catiónico ABTS<sup>•+</sup> es un cromóforo altamente absorbente a una longitud de onda de 415 ó 734nm y se genera por una reacción de oxidación del ABTS (2,2' -azino- bis-(3-etil benzotiazolin -6- sulfonato de amonio) en presencia de peroxidasas u oxidasas sobre ABTS. Una solución estable de ABTS<sup>•+</sup> también puede ser preparada con agentes oxidantes tales como dióxido de manganeso o persulfato de potasio<sup>109</sup>.

La actividad antioxidante se evalúa midiendo el cambio de absorbancia a 732 –734 nm de la solución de ABTS <sup>•+</sup> cuando se alcanza el estado estacionario<sup>111</sup>.

**Medida de la capacidad reductora: Método Ferric Reducing/Antioxidant Power, FRAP**

Este método evalúa la capacidad antioxidante de una muestra de acuerdo con su capacidad para reducir (por transferencia electrónica) el Fe<sup>+3</sup>

presente en un complejo con un compuesto orgánico: Tripyridyltriazine (TPTZ).

Cuando el hierro es reducido a la forma ferrosa ( $\text{Fe}^{+2}$ ) toma un color azul, que presenta un máximo de absorbancia a una longitud de onda a 593 nm (figura 5)<sup>112</sup>.

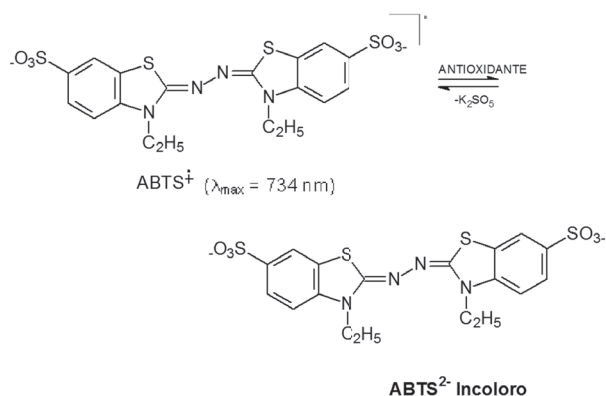


Figura 4. Reacción con el radical  $\text{ABTS}^{\cdot+}$ .

Tomado de Huang et al.<sup>110</sup>

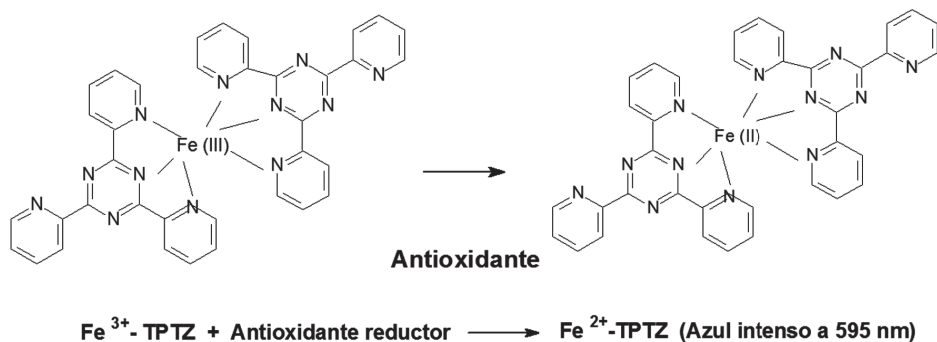


Figura 5. Reacción en el Método FRAP.

Tomado de Prior et al.<sup>113</sup>

## Síntesis de compuestos

La reacción de sustitución electrofílica aromática es una de las mejores formas de introducir grupos funcionales dentro de un anillo aromático.

Esta reacción consiste en la sustitución de un hidrógeno del sistema aromático por un electrófilo y representa la reacción más importante que sufren estos sistemas como se muestra en la figura 6.

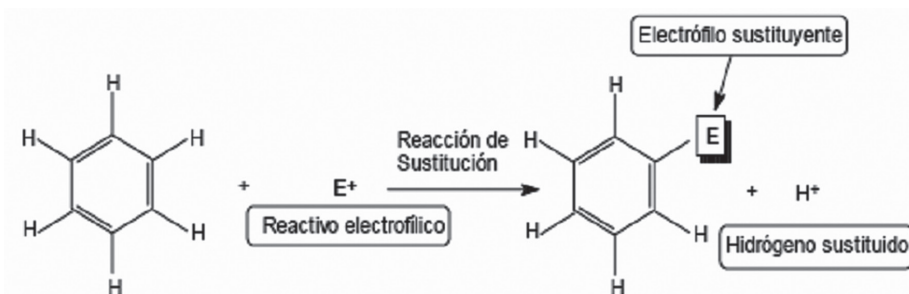


Figura 6. Reacción de sustitución electrófila aromática.

Tomado de Wingrove<sup>114</sup>.

Mediante esta metodología se pueden introducir grupos tales como:  $-\text{NO}_2$ ,  $-\text{SO}_3\text{H}$ ,  $-\text{Cl}$ ,  $-\text{Br}$ ,  $-\text{R}$ .

Estas reacciones proceden por el mecanismo típico de una sustitución electrofílica aromática ( $\text{S}_{\text{E}}\text{A}$ ), el cual se puede visualizar en tres etapas principalmente:

- Formación del electrófilo
- Ataque de los electrones  $\pi$  del benceno a este electrófilo y
- Desprotonación del catión intermediario<sup>115, 116</sup>.

El benceno es normalmente inerte en presencia de halógenos, debido a que los halógenos no son lo suficientemente electrofílicos para destruir su aromaticidad, sin embargo, estos pueden activarse mediante ácidos de Lewis como los haluros de hierro,  $\text{FeX}_3$  o de aluminio,  $\text{AlX}_3$ , para dar electrofílicos más potentes. Al hacer una revisión bibliográfica sobre las vías sintéticas para la halogenación de compuestos aromáticos polisustituidos en su gran mayoría se nos remite a la reacción de bromación<sup>117</sup>.

### Bromación

Algunos de los métodos reportados para la realizar la bromación emplean el bromo en presencia de tetracloruro de carbono o con bromuro de dimetilsulfonio.

- **Bromación con bromo en tetracloruro de carbono.** Método realizado por tratamiento con bromo en presencia de tetracloruro de carbono y cloruro férrico como catalizador.

El mecanismo de reacción es una ilustración de la secuencia de una sustitución electrofílica clásica sobre un anillo aromático, figura 7<sup>118</sup>.

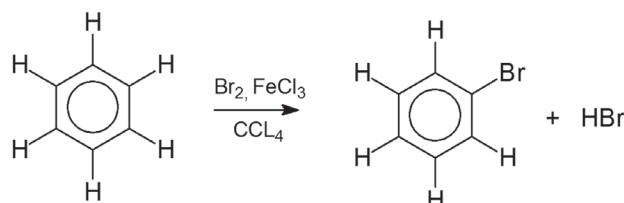


Figura 7. Bromación con bromo y tetracloruro de carbono en presencia de cloruro férrico.

Tomado de Carda<sup>119</sup>.

- **Bromación con bromuro de dimetilsulfonio.** Los agentes halogenados positivos tales como el bromurodimetilsulfonio de bromo son ampliamente usados en síntesis por su facilidad para su preparación y diversas transformaciones en las que se puede usar como rompimiento de tioacetales, oxidación de tioles y principalmente como otra alternativa para la bromación de bromoarenos, pues presentan altos rendimientos y estereoespecificidad.

La reacción transcurre en varias etapas:

- Formación del bromurodimetilsulfonio de bromo in situ por medio del mecanismo mostrado en la figura 8.

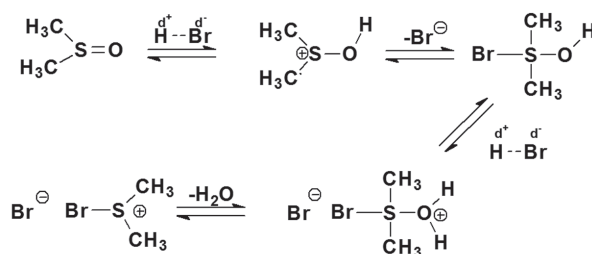


Figura 8. Bromación con bromurodimetilsulfonio de bromo in situ.

Tomado de Majetich<sup>120</sup>.

- Sustitución electrofílica del agente halogenado positivo al anillo aromático<sup>121</sup>.

#### Demetilación

Como resultado de un medio ácido en la reacción de bromación de compuestos aromáticos con sustituyentes metoxi, se produce como subproducto el compuesto demetilado (no publicado antes).

#### Medición de la actividad enzimática

La medición de la actividad enzimática de la PPO está dada por su cinética; de esta forma se puede evaluar su disminución o inhibición del pardeamiento enzimático en presencia de los antioxidantes sintetizados<sup>122-124</sup>.

#### Cinética

La velocidad a la que ocurre una reacción catalizada por una enzima está determinada por un número de factores tanto inherentes como externos a ella. Se han desarrollado varios métodos matemáticos agrupados bajo el término de cinética para la cuantificación de los factores que afectan la velocidad de reacción<sup>125</sup>.

La medida de la cinética enzimática es de interés por dos razones principales:

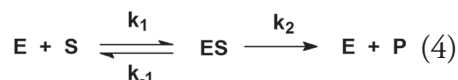
- Para caracterizar una enzima individual y proveer datos acerca del funcionamiento de la enzima bajo diferentes condiciones fisiológicas.
- Para proveer información acerca del mecanismo de catálisis<sup>126</sup>.

La velocidad a la cual una enzima cataliza una reacción es conocida como "*actividad*"<sup>127</sup>. La actividad enzimática puede ser medida por la velocidad de formación de productos o desaparición de reactivos en presencia de una cantidad de enzima dada; tiene más ventajas en la mayoría de los casos seguir la formación de productos mediante incrementos finitos que pequeños decrecimientos de una concentración inicial.

#### Teoría Michaelis – Menten

La teoría del estado estacionario de la cinética enzimática fue desarrollada por L. Michaelis y M. Menten en 1913, con modificaciones hechas por G. Briggs y J. B. S. Haldane en 1925<sup>128</sup>. En este modelo, la enzima se

combina reversiblemente con su sustrato para formar el complejo enzima-sustrato (ES) que subsecuentemente se rompe para formar el producto, hecho que regenera a la enzima. El modelo para una molécula de sustrato se muestra a continuación:



Donde: S es el sustrato

E es la enzima

ES es el complejo enzima sustrato o complejo de Michaelis y Menten

$k_1, k_{-1}$  y  $k_2$  son las constantes de velocidad de la reacción.

La ecuación de Michaelis y Menten describe cómo varía la velocidad de reacción con la concentración de sustrato:

$$v = \frac{V_{\text{máx}} [S]}{[S] + K_M} \quad K_M = \frac{K_2 + K_{-1}}{K_1} \quad (5)$$

Esta ecuación describe una reacción en la cual un solo sustrato produce un solo producto. Así:

$v$  es la velocidad inicial de la reacción

$V_{\text{máx}}$  es la velocidad máxima

$K_M$  es la constante de Michaelis y Menten =  $k_{-1} + k_2 / k_1$

$[S]$  es la concentración de sustrato<sup>129</sup>.

Existen varias suposiciones que consideran la teoría del estado estacionario. La primera es que la enzima y el sustrato forman un complejo, [ES]. La segunda es que la concentración del complejo [ES] no cambia con el tiempo. Por último, la concentración de sustrato [S] no cambia significativamente durante la reacción debido a que la cantidad de S es mucho mayor que la de E, de tal manera que la cantidad de sustrato unido a la enzima en cualquier momento es muy pequeña<sup>130</sup>.

Para el análisis de reacciones enzimáticas, sólo se utiliza la velocidad inicial de la reacción, que es la velocidad ejercida por la enzima, inmediatamente después de que se ha puesto en contacto con el sustrato y hasta antes de que se haya consumido el 10 % de la concentración inicial del mismo. La razón de lo anterior es que en ese momento la concentración del producto de la reacción que se ha acumulado es muy pequeña y, por tanto, la

reacción en el sentido inverso, es decir, la transformación del producto en el sustrato original puede ser ignorada<sup>131</sup>.

De acuerdo con la ecuación del estado estacionario, la velocidad de reacción,  $v$ , incrementará proporcionalmente con el aumento de  $S$ , como es mostrado en la figura 9. Sin embargo, en la práctica, esto puede ser verdad sobre un rango limitado de concentración de enzima. Para obtener buena linealidad deben procurarse las condiciones de reacción tales que la formación de producto sea lineal con el tiempo (reacción de orden 1), y esta necesita ser directamente observada o establecida para la estandarización de las condiciones en un ensayo nuevo<sup>132</sup>.

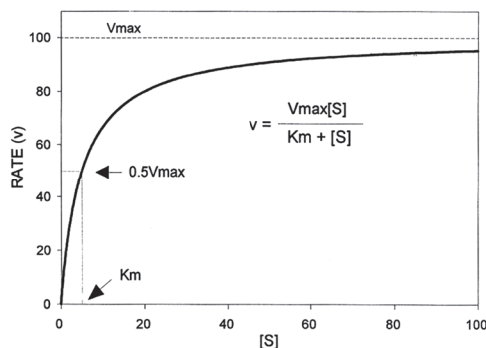


Figura 9. Efecto de la concentración del sustrato sobre la velocidad de reacción. Ecuación de Michaelis – Menten.

Tomado de Tipton<sup>133</sup>.

La gráfica muestra una curva hiperbólica que aproxima a un valor máximo para  $v$ , correspondiente a una concentración infinita de  $S$ . Este valor es la velocidad máxima de reacción o  $V_{max}$ . La velocidad máxima puede ser definida como la reacción de velocidad cuando la enzima es completamente saturada con el sustrato. De la ecuación en estado estacionario, se puede ver que  $K_M$  es numéricamente igual a la concentración de sustrato donde la velocidad de reacción es la mitad de la  $V_{max}$  ( $K_M = V_{max} / 2$ ).

La constante  $K_M$  es característica de una enzima particular para un sustrato y está dada en unidades de concentración. Cuando comparan parámetros cinéticos de diferentes enzimas,  $K_M$  refleja la afinidad de la enzima por ese sustrato; un valor numérico pequeño refleja una alta afinidad de la enzima por su sustrato porque a una baja concentración del mismo, la enzima ha desarrollado ya la mitad de la velocidad máxima.

Cuando se grafica la velocidad de la reacción,  $v$ , contra la concentración de sustrato,  $[S]$ , no siempre es posible determinar la condición en que se ha llegado a la velocidad máxima,  $V_{\max}$ , debido al incremento de la pendiente en la hipérbola a concentraciones de sustrato elevadas. Por tal motivo, se puede presentar un ajuste al modelo de Michaelis-Menten<sup>134</sup>.

**2.8.3 Cinética enzimática en presencia de un inhibidor.** Una gran variedad de compuestos naturales y sintéticos tienen la capacidad de unirse reversible e irreversiblemente a enzimas específicas y alterar su actividad. Los inhibidores competitivos, no competitivos e incompetitivos son reversibles<sup>135</sup>.

2.8.3.1 Inhibidores reversibles, Inhibidores competitivos. Un compuesto que puede estar o no relacionado estructuralmente con el sustrato natural se une reversiblemente con la enzima en o cerca al sitio activo; la inhibición será competitiva entre el sustrato y el inhibidor. Los inhibidores competitivos son comunes en la naturaleza<sup>136</sup>.

Una forma de medir el efecto del inhibidor es mediante la medida de velocidad enzimática para una variedad de concentraciones de sustrato en presencia y ausencia de un inhibidor. En este caso, el inhibidor sustancialmente reduce la velocidad de la enzima a bajas concentraciones de sustrato, pero no la altera mucho a concentraciones altas<sup>137</sup>.

El inhibidor no altera  $V_{\max}$ , pero incrementa el valor de  $K_M$  (también llamada  $K_M$  aparente). La  $K_M$  observada está dada por la siguiente ecuación:

$$K_{M\text{obs}} = K_M + \left[ 1 + \frac{[\text{inhibidor}]}{K_i} \right] \quad (6)$$

- **Inhibidores no competitivos.** Los compuestos que se unen reversiblemente con la enzima o el complejo enzima sustrato se conocen como inhibidores no competitivos. Esta inhibición no es revertida completamente con el aumento de sustrato. Dado que el sitio de unión del inhibidor no es idéntico al sitio activo, ni modifica a éste directamente, la  $K_M$  no se altera, pero  $V_{\max}$  disminuye con respecto a la observada en ausencia del inhibidor<sup>138</sup>.
- **Inhibidores incompetitivos.** Los compuestos que se combinan reversiblemente sólo con el complejo ES pero no con la enzima libre se co-

nocen como inhibidores incompetitivos. Este tipo de inhibición no es superada con altas concentraciones de sustrato, y la  $K_M$  aparente en presencia de un inhibidor es más pequeña que el valor de la  $K_M$  no inhibida<sup>139</sup>.

Un inhibidor que es unido covalentemente a la enzima inactivándola irreversiblemente es llamado irreversible o inactivador<sup>140</sup>.

**Inhibidores irreversibles.**

Un inhibidor irreversible forma un enlace covalente con un grupo funcional específico, por lo general una cadena lateral de un aminoácido que, de alguna manera, se asocia con la actividad catalítica de la enzima. Un inhibidor irreversible no puede ser liberado por dilución o diálisis; sus efectos no pueden ser revertidos simplemente al aumentar la concentración del sustrato. La velocidad de la reacción disminuye a un nivel que corresponde con la fracción de las moléculas de enzimas que han sido inactivadas<sup>141</sup>.

Las diferencias básicas entre inhibición reversible e irreversible están resumidas en la tabla 1<sup>142</sup>.

Tabla 1. Algunas diferencias básicas entre inhibidores reversibles e irreversibles.

Ecuación básica	Constante cinética	Velocidad de inhibición	reversibilidad	
			<i>In vitro</i>	<i>In vivo</i>
Reversible $E + I \xrightleftharpoons[k_{-1}]{k_{+1}} E \cdot I$	$K_i = \frac{k_{-1}}{k_{+1}}$	Usualmente rápida	Dilución Diálisis: Filtración gel	Eliminación de inhibidores libres
Irreversible $E + I \xrightarrow{k} E \cdot I$	$k$	Frecuentemente lenta	Ninguna	Síntesis de más enzima

Tomado de K. F.<sup>143</sup>

**Métodos para la medición del pardeamiento enzimático**

Los métodos disponibles para determinar la susceptibilidad de pardeamiento son la espectrometría de absorción o métodos de reflectancia. Las técnicas de absorción involucran la medida espectrofotométrica sobre soluciones obtenidas después de separar los tejidos y remover los sólidos. Tales medidas estiman los pigmentos solubles y suelen estar presentes cerca de

400 nm, correspondientes a la absorción máxima del catecol. La medida de los pigmentos polimerizados y solubles unidos a membranas puede ser evaluada por medidas de reflectancia sobre la fracción insoluble<sup>144</sup>. Actualmente existen varias técnicas que aplican este mismo principio, como es el método Pizzocaro<sup>145,146</sup>.

## Metodología

La metodología seguida en la síntesis y estudio del efecto inhibitor del pardeamiento enzimático fue:

### Síntesis de compuestos (modificaciones estructurales del Isoespintanol)

Síntesis de 2-isopropil-4-bromo-3,6-dimetoxi-5-metilfenol.

Se siguió el procedimiento citado por Majetich et al.<sup>147</sup>.

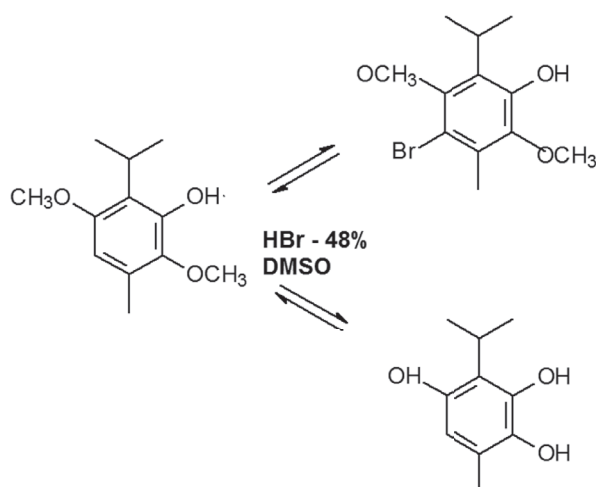


Figura 10. Bromación y demetilación del isoespintanol Majetich et al.<sup>148</sup>

La bromación se llevó a cabo mediante la mezcla de 500 mg de isoespintanol en 15 ml de dimetil sulfóxido (DMSO), y 5 ml de ácido bromhídrico al 48% adicionado gota a gota. La reacción se produjo a temperatura ambiente, durante 6 horas; la desaparición del reactivo es seguida por cromatografía de placa fina con un eluyente diclorometano:hexano (3:7). La reacción se detiene con una solución saturada de bicarbonato de sodio y los productos fueron aislados usando extracciones con diclorometano, seguido

por la adición de sulfato de sodio anhídrido, para luego ser concentrada bajo presión reducida. Finalmente, el compuesto es separado por cromatografía de columna diclorometano: hexano (80:20) como eluyente y cromatografía de capa fina (ciclohexano:diclorometano 7:3 al 1% de metanol), del compuesto demetilado que se forma simultáneamente como se muestra en la figura 10.

#### Síntesis de 3-isopropil-6-metil-1,2,4-trihidroxibenceno.

La demetilación del isoespintanol para la obtención del 3-isopropil-6-metil-1,2,4-trihidroxibenceno se obtuvo en forma paralela a la reacción de bromación. El compuesto fue separado por cromatografía de placa fina (ciclohexano: diclorometano 7:3).

Luego de la purificación de los compuestos, condición indispensable en la evaluación de actividad antioxidante, se realizó la caracterización por las siguientes técnicas de análisis instrumental:

- Espectroscopia de resonancia magnética nuclear  $^1\text{H}$  y  $^{13}\text{C}$ , en un espectrómetro de 300 MHz marca BRUKER modelo AM-300, utilizando como solvente cloroformo deuterado.
- Cromatografía gases-masas, en un cromatógrafo de gases marca Agilent 6890N con un detector selectivo de masas marca Agilent 5973, acoplado a un Chemstation Hardware.

#### Medición de la actividad antioxidante

La evaluación de la capacidad antioxidante de los compuestos sintetizados se basó en dos métodos productores de un radical orgánico y otro basado en la óxido-reducción de iones metálicos. Las muestras fueron preparadas en DMSO. Los procedimientos son descritos a continuación:

#### DPPH (Radical 2,2-difenil-1-picril hidrazilo).

El método se llevó a cabo según el protocolo de Cavin<sup>149</sup>. La muestra de análisis consistió en 10 mL de extracto y 990 mL de la disolución de DPPH (20 mg/L). Se evaluó por cuadruplicado y como referencia del reactivo se usó la misma cantidad de DPPH y 10 mL del solvente de la muestra. Se produjo un blanco, reemplazando el cromóforo por metanol. La absorbancia se leyó a una longitud de onda de 517nm, luego de 30 minutos de reacción a temperatura ambiente y en la oscuridad.

El porcentaje de inhibición se calculó de la siguiente manera:

$$\% \text{ Inhibición} = \left[ \frac{1 - (\text{Abs}_{\text{muestra}} - \text{Abs}_{\text{blanco muestra}})}{\text{Abs}_{\text{referencia}} - \text{Abs}_{\text{blanco referencia}}} \right] \times 100 \quad (7)$$

### **Abs: Absorbancia**

Para cada compuesto se determinó la concentración inhibitoria 50 ( $IC_{50}$ ), que se define como la concentración de muestra requerida para disminuir en un 50% el contenido inicial del radical DPPH, y se determinó por medio de la gráfica “Porcentaje de inhibición contra concentración de extracto”<sup>150</sup>.

**ABTS (3-etilbenzotiazolin-6-sulfonato de amonio).**

El radical  $ABTS^{\bullet+}$  se produjo utilizando una mezcla de reacción que contiene ABTS (3,5 mM) y persulfato de potasio (1,25 mM) en agua destilada. La mezcla de reacción se preparó 12 horas antes de su uso y se mantuvo a temperatura ambiente y en ausencia de luz. En el momento de realizar las mediciones, esta solución se diluyó en buffer fosfato a un pH de 7.4, hasta lograr una absorbancia de 0.7 unidades a 734 nm.

En la evaluación de los compuestos se utilizaron 20  $\mu$ l de muestra y 980  $\mu$ l de la solución del radical  $ABTS^{\bullet+}$ . Luego de 30 minutos de reacción, tiempo necesario para a temperatura ambiente y en la oscuridad, se midió el cambio en la absorbancia respecto a la referencia del reactivo, a una longitud de onda de 734nm. La referencia del reactivo consistió en una solución del radical  $ABTS^{\bullet+}$  con el solvente de la muestra (DMSO).

Se determinó igualmente la concentración necesaria para disminuir en un 50% el contenido inicial del radical  $ABTS^{\bullet+}$  ( $IC_{50}$ )<sup>151</sup>, de la misma manera que en la prueba DPPH.

**Método FRAP (Ferric Reducing/Antioxidant Power).**

Este ensayo se llevó a cabo en buffer acético-acetato de sodio 0.3M a un pH de 3.4, que contiene TPTZ (1mM) y  $FeCl_3$  (2mM). Se utilizan 900  $\mu$ l de esta solución, 50  $\mu$ l de muestra y 50  $\mu$ l de buffer acetato pH 3.6. Luego de 30 minutos de reacción se determina la absorbancia a una longitud de onda de 593nm. Para cada muestra se tuvo en cuenta la lectura de la absorbancia del blanco sin cromóforo, de la misma manera que en las pruebas anteriores. La curva de referencia se construyó usando ácido ascórbico en

un rango de concentraciones de 5-40  $\mu\text{M}$ . Las actividades de las muestras en estudio se expresan como AEAC (capacidad antioxidante en equivalentes de ácido ascórbico:  $\mu\text{mol}$  ácido ascórbico /g muestra), valor que se obtiene al interpolar los resultados de las muestras en la curva referencia (“Absorbancia contra concentración de ácido ascórbico”)<sup>152</sup>.

## Medición del efecto inhibitor del pardeamiento enzimático de los antioxidantes sobre la polifenol oxidasa en el extracto enzimático de banano

### Determinación de parámetros cinéticos e inhibición de pardeamiento enzimático

Las muestras utilizadas en este trabajo fueron adquiridas en fruterías de la ciudad de Medellín. Se utilizó la especie *Musa Sapientum* o comúnmente conocida como banano variedad Cavendish Gigante (Tipo exportación). Las muestras de banano fueron amarillo-verdosas. Grado de maduración 4<sup>153</sup> correspondiente a 18 ° Brix.

- **Extracción de la enzima.** La extracción parcial se realizó con base en el procedimiento de Palmer<sup>154</sup> con algunas modificaciones en la centrifugación y el detergente usado: en un homogenizador (marca B. Braun) se mezclaron 2 g de la fruta madura y pelada con 18 ml de buffer fosfato (0,1 M, pH 7.0), el cual, contenía detergente Triton 100X al 1%.
- El homogenato fue centrifugado (centrífuga marca Heraeus) durante 25 minutos a 16.060 g y 4°C; el sobrenadante fue filtrado con papel filtro Schleicher & Schuell 589/1. El filtrado se constituyó en el extracto enzimático utilizado en el trabajo cinético. Durante todas las operaciones de extracción, las temperaturas fueron inferiores a 4°C.
- **Ensayo de actividad de la PPO.** La actividad de la enzima fue determinada siguiendo el método de Pizzocaro modificado<sup>155</sup>; se usó un espectrofotómetro Shimadzu UV-160<sup>a</sup> y se hizo el monitoreo a 420 nm y a 30°C. La mezcla de reacción consistió en 1 ml de buffer fosfato 0.1 pH 6.0, 0.5 ml de dopamina (0.18 mol/L) y 0.25 ml de extracto de enzima. El cambio en absorbancia fue registrado cada 15 s durante 3 min. La porción lineal obtenida del gráfico de absorbancia en función del tiempo fue usada para el cálculo de la actividad de la PPO. Una unidad de la actividad de PPO fue definida como 0.001  $\Delta A_{420}/\text{min}/\text{ml}$ . Todos los extractos fueron analizados por triplicado.
- **Parámetros cinéticos.** Los valores de las constantes cinéticas  $K_M$  y  $V_{\text{máx}}$  se calcularon mediante el método gráfico de LINEWEAVER-BURK.

Tabla 2. Volúmenes de reactivos usados para la determinación de los parámetros cinéticos,  $K_M$  y  $V_{max}$ .

Reactivo	Blanco	Ensayo
Buffer fosfato pH 6.0	1.0 ml	1.0 ml
Agua destilada	0.5 ml	-
Extracto enzimático	0.25 ml	0.25 ml
Dopamina (0.04, 0.06, 0.08, 0.10, 0.14, 0.18, 0.22, 0.26) M	-	0.5 ml

Datos establecidos por los autores.

- **Efecto de inhibidores.** Se estudió la inhibición de la enzima usando ácido ascórbico (como referencia comercial), isoespintanol, el compuesto bromado y el demetilado. Las concentraciones del inhibidor fueron: 500 (máximo recomendado por la norma)<sup>156</sup>, 1000 y 1500 ppm (concentraciones antes usadas para evaluar inhibición de pardeamiento en frutas)<sup>157,158</sup>. En todos los casos el sustrato oxidable fue dopamina 0,18 M en buffer fosfato 0,1 M. La actividad enzimática se determinó mediante el método colorimétrico a 420 nm y una temperatura de 30°C.

Tabla 3. Volúmenes de reactivos usados para la determinación de la actividad enzimática en presencia de inhibidores sobre extracto de banano.

Reactivo	Blanco	Ensayo
Buffer fosfato pH 6.0	0.5 ml	1.0 ml
Agua destilada	0.5 ml	-
Extracto enzimático	0.25 ml	0.25 ml
Dopamina	-	0.5 ml
Antioxidante	0.5 ml	0.5 ml

Datos establecidos por los autores.

## Análisis de resultados

### Síntesis

Inicialmente se realizaron las modificaciones sintéticas al 2-isopropil-3,6-dimetoxi-5-metilfenol, hasta obtener dos compuestos:

- 2-isopropil-4-bromo-3,6-dimetoxi-5-metilfenol.
- 3-isopropil-6-metil-1,2,4-trihidroxibenceno.

La relación entre el compuesto bromado y el demetilado fue 75:25, respectivamente.

#### Información general de los dos compuestos

- **Solubilidad.** Ambos compuestos son insolubles en agua. Para las pruebas de inhibición enzimática se trabajó en un medio etanólico.
- **Punto de Fusión.** Se tomaron los puntos de fusión (tabla 4), debido a los altos puntos de fusión que presentan la mayoría de los compuestos fenólicos donde es conveniente derivatizarlos para obtener sustancias más volatilizables y térmicamente más estables, para facilitar su análisis en mezclas mediante GC o GC-MS<sup>159</sup>.

Tabla 4. Puntos de fusión del compuesto bromado y demetilado

Compuesto	Punto de fusión (°C)
Bromado	127 – 128
Demetilado	112 – 113

Datos hallados por los autores.

Según los datos obtenidos, los puntos de fusión están dentro del rango de temperaturas a las cuales se pueden trabajar con la columna del GC-MS (HP5) que alcanza una temperatura máxima de 300°C, sin necesidad de una derivatización previa.

- **Color.** El compuesto bromado presenta una coloración naranja, y el demetilado es amarillo.
- **Estructura.** Cada una de las estructuras de las moléculas fueron optimizadas en el programa Gaussian 03<sup>160</sup>, a un nivel B3LYP/6-311G(d,p), figura 11.

La estructura optimizada permitió observar las distancias entre el H<sub>8</sub> y el C<sub>9</sub>, donde se observa una posible formación de un puente de hidrógeno intramolecular, con una mayor probabilidad en el siguiente orden: isoespintanol > demetilado > bromado.

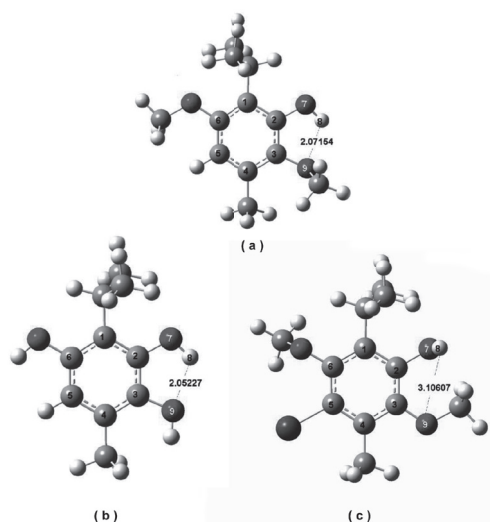


Figura 11. Estructura optimizada del isoespintanol (a), compuesto demetilado (b) y bromado (c) a un nivel B3LYP/6-311G(d,p). Estructuras logradas por los autores con el programa Gaussian 03, Revision B.05. 2003, Gaussian, Inc.

- **Pureza.** Los resultados del análisis de pureza obtenidos por cromatografía de gases acoplada a masas, GC-MS, fueron:
  - 2-isopropil-4-bromo-3,6-dimetoxi-5-metilfenol: 90.8%
  - 3-isopropil-6-metil-1,2,4-trihidroxibenceno: 99.1%

La pureza obtenida para los dos compuestos es suficiente para el análisis de inhibición enzimática en la que fueron probados.

### Resultados de análisis instrumental

Las técnicas de análisis instrumental utilizadas para caracterizar los compuestos fueron:

- Cromatografía gaseosa acoplada a masas, GC-MS.
- Resonancia magnética nuclear, RMN de  $^{13}\text{C}$  e  $^1\text{H}$ .

### Cromatografía gases-masas

La técnica acoplada GC-MS permitió obtener el espectro de masas y aunque esta es una técnica fundamental para obtener información estructural de los compuestos<sup>161</sup>, en este caso no se encontraron en las bases de

datos las estructuras objeto de estudio, debido a que los compuestos no han sido reportados por la literatura. Por tal razón, la base de identificación fueron sus pesos moleculares y el análisis de cada uno de sus espectros de masas, partiendo de la estructura esperada.

Los cromatogramas de las figuras 12, 13 y 14 permiten observar el tiempo de retención del isoespintanol, y los compuestos sintetizados, sus posibles contaminantes, al igual que el porcentaje de pureza para cada uno.

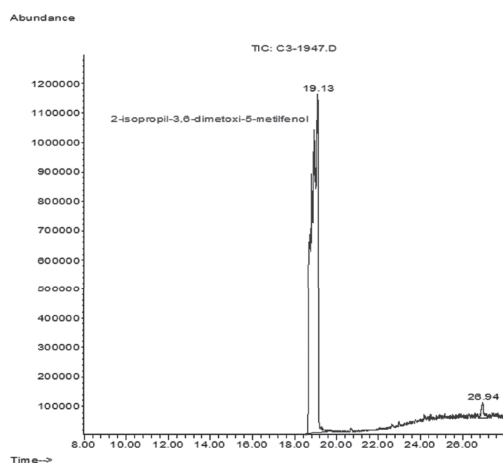


Figura 12. Cromatograma de 2-isopropil-3,6-dimetoxi-5-metilfenol obtenido por los autores.

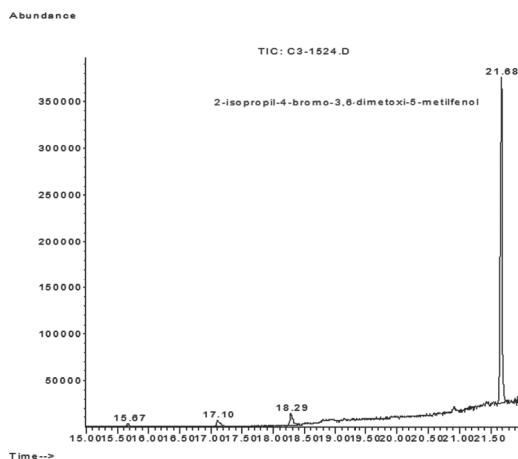


Figura 13. Cromatograma de 2-isopropil-4-bromo-3,6-dimetoxi-5-metilfenol obtenido por los autores.

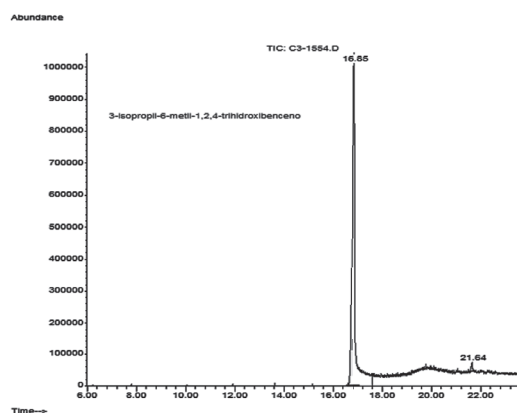


Figura 14. Cromatograma de 3-isopropil-6-metil-1,2,4-trihidroxibenceno obtenido por los autores.

La ausencia de un pico a un tiempo de retención 19.13 (isoespintanol) en las figuras 13 y 14, es la forma de garantizar la presencia de un sólo compuesto con posible actividad antioxidante (figura 15).

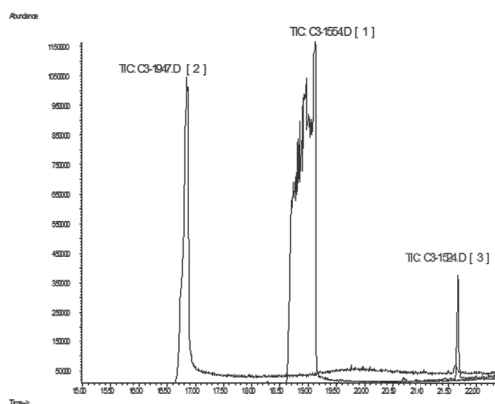


Figura 15. Cromatograma superpuesto de 2-isopropil-3,6-dimetoxi-5-metilfenol<sup>162</sup>, 3-isopropil-6-metil-1,2,4-trihidroxibenceno<sup>163</sup> y 2-isopropil-4-bromo-3,6-dimetoxi-5-metilfenol<sup>164</sup> obtenido por los autores.

Los fraccionamientos de masas de cada uno de los compuestos muestran que debido a la presencia de un anillo aromático en todas las estructuras, los espectros de masa tienen iones moleculares intensos, lo que facilitó la

determinación de su peso molecular. En el espectro de masas del compuesto bromado se distingue un pico base  $M+2$  igual al pico  $M+$  característico de este tipo de compuestos<sup>165</sup>.

### Espectroscopia de resonancia magnética nuclear

Muchos compuestos se pueden caracterizar químicamente a partir de los datos de cromatografía de gases y los espectros de masas cuando se cuenta con los compuestos de referencia en la base de datos, pero cuando existen dudas de tal caracterización se recurre a los métodos espectrales tradicionales como infrarrojo, ultravioleta y resonancia magnética nuclear. Por tal razón, se determinaron los espectros de RMN  $^1\text{H}$  y  $^{13}\text{C}$ .

Los espectros de RMN  $^1\text{H}$  y  $^{13}\text{C}$  revelan la presencia de los grupos  $-\text{OCH}_3$ ,  $\text{CH}_3$ ,  $\text{OH}$ ,  $\text{CH}$  y  $\text{C}$  aromáticos, respectivamente.

A continuación se describen los desplazamientos correspondientes a los RMN  $^1\text{H}$  y  $^{13}\text{C}$  del 3-isopropil-6-metil-1,2,4-trihidroxibenceno y del 2-isopropil-4-bromo-3,6-dimetoxi-5-metilfenol.

#### 2-isopropil-4-bromo-3,6-dimetoxi-5-metilfenol

**\*HNMR** (400 MHz,  $\text{CDCl}_3$ )  $\delta$  1.34 (d,  $J=7.2$  Hz, 3H, H-8), 1.37 (d,  $J=7.2$  Hz, 3H, H-9), 2.33 (s, 3H, H-10), 3.44 (m, 1H, H-7), 3.75 (s, 3H, H-11), 3.78 (s, 3H, H-12), 5.80 (s, 1H, OH).  **$^{13}\text{C}$  NMR** (100 MHz,  $\text{CDCl}_3$ )  $\delta$  16.4 (C-10), 20.8 (C-8 y C-9), 26.6 (C-7), 61.2 (C-11), 61.4 (C-12), 110.4 (C-4), 126.6 (C-2), 128.5 (C-5), 142.6 (C-3), 147.5 (C-5). **EI-MS**  $m/z$  288 (97), 290 (94), 273 (20), 275 (19).

#### 3-isopropil-6-metil-1,2,4-trihidroxibenceno

**$^1\text{H}$  NMR** ( $\text{CDCl}_3$ , 400 MHz)  $\delta$  1.13 (d,  $J=7.2$  Hz, 3H, H-8), 1.14 (d,  $J=7.2$  Hz, 3H, H-9), 2.08 (s, 3H, H-10), 3.20 (m, 1H, H-7), 6.48 (s, 1H, H-5), 6.96 (s, 2H, OH, C-2 y C-4), 7.28 (s, 1H, C-1)  **$^{13}\text{C}$  NMR** ( $\text{CDCl}_3$ , 100 MHz)  $\delta$  15.0 (X-10), 20.2 (X-8 xp X-9), 24.5 (X-7), 125.9 (X-5), 136.2 (X-3), 136.4 (X-6), 140.9 (X-2), 51.2 (X-4), 187.7 (X-1). **EI-MS**  $m/z$  182 [ $M$ ]<sup>+</sup> (5), 180 (100), 165 (25), 137 (47).

Los resultados de RMN  $^1\text{H}$  y  $^{13}\text{C}$  fueron satisfactorios, teniendo en cuenta que la presencia de los grupos se encuentra entre los intervalos de los  $\delta$  reportados en la literatura<sup>166</sup>.

## Capacidad antioxidante

En la literatura se encuentra ampliamente referenciada la necesidad de utilizar más de un método cuando se evalúa la capacidad antioxidante de extractos vegetales, debido a que los antioxidantes pueden actuar por mecanismos diferentes<sup>167,168</sup>, dependiendo del sistema de reacción o de la fuente radicalaria<sup>169</sup>. Los antioxidantes pueden, además, variar en su solubilidad y localización de fase, su potencial redox y su especificidad y mecanismo de acción, por lo que ensayos con diferentes características pueden brindar una información más completa al respecto. En este caso, los tres ensayos utilizados evalúan la capacidad reductora de las muestras, al actuar sobre radicales preformados en diferentes fases<sup>170,171</sup>.

El Timol fue tomado como referencia para las mediciones de capacidad antioxidante por su actividad antioxidante<sup>172-174</sup> y ser un compuesto fenólico de estructura similar al del Isoespintanol. El timol, a diferencia del isoespintanol, no presenta los dos grupos  $-OCH_3$  en posiciones orto y meta, como se muestra en la figura 16.

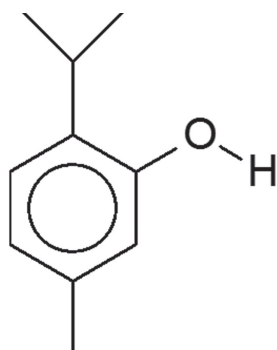


Figura 16. Estructura del Timol.  
Estructura elaborada por autores en el programa Chemdraw.

### Actividad atrapadora del radical libre DPPH:

Se determinó la concentración inhibitoria 50 ( $IC_{50}$ ) del isoespintanol (compuesto modificado), timol (compuesto de referencia) y el compuesto bromado y demetilado (compuestos sintetizados). Los valores obtenidos se observan en la tabla 5. Un menor valor indicaría una mayor capacidad antioxidante.

Tabla 5. Actividad antioxidante del isoespintanol, compuesto bromado, demetilado y el timol por los métodos DPPH•, ABTS•+ y FRAP. Datos hallados por los autores.

COMPUESTO	ABTS IC <sub>50</sub> (μM)	DPPH IC <sub>50</sub> (μM)	FRAP AEAC (g de Ac. Asc./ 100g de muestra)
<b>Isoespintanol</b>	11.43	295.2 ± 25	65.91
<b>Bromado</b>	22.2	1069.44	73.00
<b>Demetilado</b>	103.63	448.90	14.782
<b>Timol</b>	9.32	656.2 ± 45	27

El DPPH• es un radical estable que tiene un color púrpura en medio metanólico, el cual es decolorado por la acción del antioxidante. Este ensayo es riguroso debido al impedimento estérico en la molécula de DPPH y esto es determinante para la reacción. Este ensayo es el más usado en la literatura científica para medir la capacidad de interacción de compuestos o extractos con radicales libres<sup>175</sup>.

Los resultados obtenidos en este ensayo muestran que el isoespintanol tiene la mejor actividad antioxidante, seguido por el compuesto demetilado, en comparación con el compuesto de referencia o timol. Los resultados del bromado están muy por encima de la referencia, esto debido posiblemente al gran impedimento estérico que se presenta entre éste y la molécula de DPPH, por la presencia de un sustituyente de alto tamaño atómico (-Br) en el anillo fenólico<sup>176</sup>. Además, es importante la distribución del compuesto en el medio metanólico, el isoespintanol es una molécula lipofílica, la cual, se distribuye mucho mejor que los otros compuestos, interactuando más fácil con el radical DPPH.

#### Ensayo de decoloración con el radical catiónico ABTS•+

Para estos compuestos se calculó el IC<sub>50</sub>, y se encontró un comportamiento similar entre el isoespintanol, bromado y timol 11.43, 22.2 y 9.32 μM, respectivamente.

La capacidad para atrapar el radical libre ABTS•+ en medio acuoso depende de la energía de disociación del enlace, ΔBDE-OH, que en el caso del timol y del isoeppintanol son similares (-3,11 y -5,32 Kcal/mol con respecto al fenol 82.89 Kcal/mol),<sup>177</sup> y valores semejantes se esperan para

el compuesto bromado. La energía de disociación del enlace O-H esta determinada por los diferentes efectos causados por la naturaleza de los sustituyentes<sup>178</sup> en las moléculas y por los enlaces intra e intermoleculares que comprometen el enlace O-H<sup>179</sup>.

### Prueba FRAP (Ferric Reducing/ Antioxidant Power)

El método FRAP es muy usado para medir potencial reductor en plasma y capacidad reductora de diferentes extractos y compuestos puros<sup>180</sup>. Los resultados experimentales para el isoespintanol y timol son expresados como valor FRAP y son equivalentes a los g de ácido ascórbico por cada 100 gramos del compuesto antioxidante. Los valores FRAP para el Isoespintanol, bromado, demetilado y timol son: 65.91, 73, 14.78, 27 g/100 g de muestra, respectivamente (tabla 9).

El compuesto bromado presenta la capacidad reductora más alta. Este valor puede estar determinado por la capacidad para donar electrones del bromo<sup>181</sup>, que le dan una mayor densidad electrónica al enlace O-H<sup>182</sup>, y son más susceptibles al ataque de agentes oxidantes como los radicales libres o metales como el Fe<sup>3+</sup> que es el sitio activo en la metodología FRAP.

El isoespintanol y el compuesto bromado en los ensayos ABTS y FRAP son más activos como antioxidantes que el timol. La mayor actividad de estos compuestos está influenciada por los efectos de los sustituyentes y la formación de puentes de hidrógeno intra e intermoleculares. El timol forma puentes de hidrógeno intermoleculares lineales con el solvente (agua o metanol) que disminuyen la interacción con los radicales libres, disminuyendo así, su actividad. En el caso del isoespintanol, hay una competencia entre la formación de puentes intermoleculares lineales con el solvente y la formación de puentes intramoleculares no lineales con el grupo metoxilo en posición orto (figura 15); es decir, el centro reactivo del isoespintanol (enlace O-H), queda más dispuesto para ceder electrones a radicales libres y otras especies oxidantes, aumentando su actividad antioxidante respecto al timol.

De los compuestos evaluados, el isoespintanol exhibió el potencial más promisorio como antioxidante, teniendo en cuenta que en las tres técnicas presentó actividad significativa con respecto al timol. Si se considera que en cada método las condiciones de reacción y solubilidad son diferentes, dicho extracto podría presentar varios compuestos activos en un amplio

rango de su perfil metabólico, de diferente polaridad, lo cual significa que hay una fuente mayor de metabolitos con potencial antioxidante en esta especie; fue por esta razón que se escogió como un compuesto de estudio con diferentes sustituyentes. Para sus análogos hay una acción similar, sólo que se ve favorecida por el medio para el bromado en la prueba de FRAP y para el compuesto demetilado DPPH.

La reacción con el DPPH es más selectiva que las reacciones que ocurren en los métodos ABTS y FRAP. Es decir, como compuestos que contengan ácidos aromáticos con 1 solo grupo  $-OH$  no reaccionarían con el radical DPPH, pero sí lo harían con el radical ABTS<sup>183</sup>. Se esperaría entonces que compuestos que reaccionen con el DPPH reaccionen también con el ABTS.

### Inhibición de pardeamiento enzimático

Se utilizó un mismo extracto para medir la actividad enzimática. Según Palmer<sup>184</sup>, el extracto con detergente usualmente retiene hasta el 90% de su actividad durante dos semanas entre 2 y 5 °C; por esta razón los ensayos se llevaron a cabo en 4 días.

El banano contiene diferentes enzimas como laccasa, monoamina oxidasas, citocromo o peroxidasa; sin embargo, el extracto obtenido está libre de cantidades significativas para interferir en la determinación de la actividad<sup>185</sup>. Una vez solucionada esta interferencia, se iniciaron las mediciones de los parámetros cinéticos para dar a conocer las condiciones óptimas del ensayo.

Estudios previos muestran que monofenoles tales como tirosina, *o*-cresol o *p*-cresol no son oxidados por la PPO en la pulpa de banano. En nuestro trabajo los ensayos se llevaron a cabo con dopamina como sustrato, por ser este el mejor, según los reportes en la literatura<sup>186-188</sup>. Como se muestra en la figura 17, el valor de  $K_M$  de la enzima parcialmente purificada para la oxidación de la dopamina es de  $2,6 \times 10^{-2}$  M mucho más alto que  $6,3 \times 10^{-4}$  M reportada por Palmer<sup>189</sup> para la enzima parcialmente purificada extraída de *Musa acuminata*, var. Hort. Gros Michel y la enzima purificada completamente de la *Musa Sapientum* L., donde se reporta un valor de  $2,8 \times 10^{-3}$  M<sup>190</sup>, estas diferencias son evidencia de la variación entre cada variedad de la fruta.

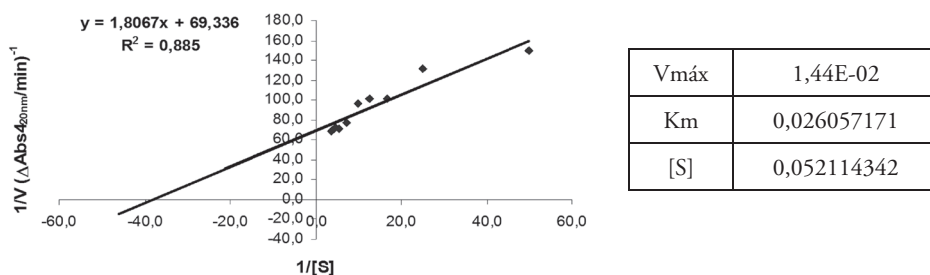


Figura 17. Gráfico Lineweaver-Burk de la oxidación de dopamina por la enzima. V, velocidad de oxidación; concentración de sustrato.

Gráfico construido por los autores.

Inhibición del pardeamiento enzimático en presencia de antioxidantes (bromado y demetilado) en comparación con el ácido ascórbico e isoespintanol.

La inhibición de la actividad en el extracto parcialmente purificado obtenido del banano en presencia del isoespintanol y dos de sus análogos (compuesto demetilado y bromado) y el ácido ascórbico como referencia comercial es reportada en la tabla 6 y los promedios en la figura 18, respectivamente.

### Inhibición de pardeamiento enzimático

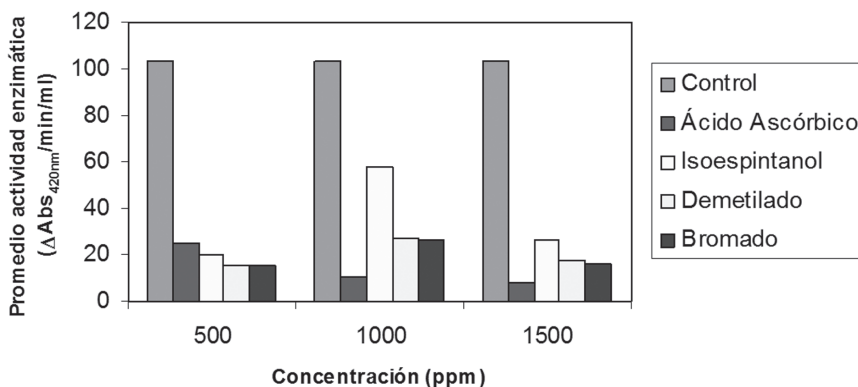


Figura 18. Promedio de la inhibición de la actividad de la PPO en banano por medio del isoespintanol y dos de sus análogos (demetilado y bromado) y ácido ascórbico. Figura elaborada por los autores.

Tabla 6. Inhibición de la actividad de la PPO en banano por medio del isoespintanol y dos de sus análogos (demetilado y bromado) y ácido ascórbico.

COMPUESTO	CONCENTRACIÓN (ppm)	ACTIVIDAD ENZIMÁTICA* $\Delta Abs_{420}/min/ml$	PORCENTAJE DE INHIBICIÓN	DESVIACIÓN ESTÁNDAR
<b>CONTROL</b>	-	102.93 <sub>g</sub>	-	5.1
	500	15.2 <sub>a</sub>	84.8	1.1
	1000	26.13 <sub>b</sub>	73.87	2.4
<b>BROMADO</b>	1500	16 <sub>a</sub>	84	2.8
	500	15.47 <sub>a</sub>	84.53	1.8
	1000	27.46 <sub>b</sub>	72.53	3.2
<b>DEMETILADO</b>	1500	17.6 <sub>a</sub>	82.4	0
	500	20.27 <sub>c</sub>	79.73	6.1
	1000	57.60 <sub>d</sub>	42.4	0
<b>ISOESPINTANOL</b>	1500	26.4 <sub>c</sub>	73.6	1.1
	500	24.53 <sub>c</sub>	75.47	2.4
	1000	10.8 <sub>e</sub>	89.2	0.6
<b>ÁCIDO ASCÓRBICO</b>	1500	8 <sub>f</sub>	92	3.2

\* Los valores de actividades con igual subíndice indican que no existen diferencias estadísticamente significativas, entre ellas. Para el caso contrario, si existen diferencias significativas  $P < 0.05$ .  
 Datos hallados por los autores.

El ácido ascórbico como referencia para comparar con los tres nuevos antioxidantes su acción como inhibidor de la actividad enzimática, presentó la mejor inhibición a 1000 y 1500 ppm (89.2 y 92%). La relación concentración - respuesta fue buena al disminuir la actividad a medida que aumentó la concentración, debido probablemente a su fuerte propiedad reductora<sup>191</sup> y baja acidez, que pueden además reducir el pH del extracto enzimático del banano<sup>192</sup>. Efectos inhibitorios similares de este compuesto sobre la PPO en la pulpa de banano fueron demostrados en anteriores trabajos<sup>193-195</sup> donde se da la inhibición total de la enzima.

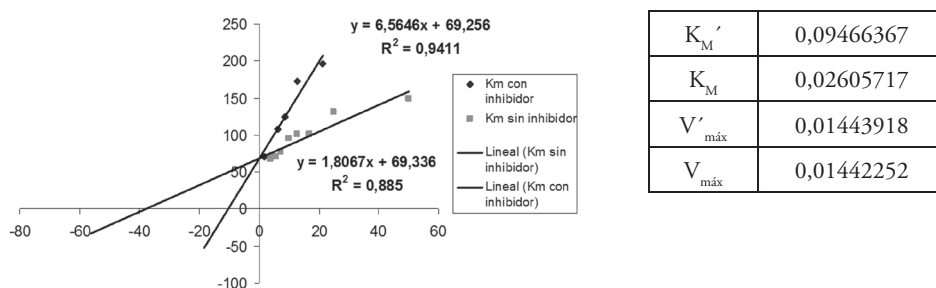


Figura 19. Doble recíproca entre las pendientes ( $1/V$ ) en función de la concentración ( $1/[S]$ ) del isoespintanol como inhibidor, en comparación con los datos hallados en ausencia de este.  $V$ , velocidad de oxidación;  $[S]$ , concentración de sustrato.

Figura elaborada por los autores.

La inhibición de la actividad enzimática del isoespintanol, demetilado y bromado no exhibió decrecimiento de la actividad de la PPO al aumentar la concentración; el principal efecto inhibitorio fue observado a una concentración de 500 ppm para los tres compuestos. Esto puede explicarse a partir del tipo de inhibición encontrado para el isoespintanol. Según la figura 19, se observa un aumento del valor  $K_M'$  y la  $V_{máx}$  no varió significativamente, datos correspondientes al tipo de inhibidor reversible competitivo; de esta forma se puede decir que la inhibición de la actividad enzimática fue debida a la formación de enlaces competitivos del inhibidor en/ó cerca al sitio activo de la enzima<sup>196,197</sup>. En este caso, el inhibidor sustancialmente reduce la velocidad de la enzima a bajas concentraciones de sustrato, pero no la altera mucho a concentraciones altas<sup>198</sup>. Un comportamiento semejante se presenta con la pulpa de mango en presencia de 4-hexilresorcinol<sup>199</sup>.

La formación de puentes de hidrógeno intramoleculares en compuestos fenólicos sustituidos con grupos metoxi o hidroxilos en posición orto, aumentan la estabilidad de sus radicales en 4.4 Kcal/mol<sup>200,201</sup>, es por esta razón que los radicales resultantes de la acción inhibitoria del isoespintanol y el compuesto demetilado pueden ser estabilizados por la presencia de un posible puente de hidrógeno intramolecular como se mencionó anteriormente (figura 11), que les confiere una buena capacidad protectora<sup>202</sup>. Esta afirmación se ve reflejada en los porcentajes de inhibición de la PPO, extraída del de banano, comprendidos entre un 42.4 – 79.73% y 72.53 y 84.53% (tabla 10) para el isoespintanol y demetilado, respectivamente. El compuesto bromado probablemente presente estabilidad también por esta razón, pero no es predominante como en los casos anteriores, por ser mayor la distancia del posible puente de hidrógeno.

La diferencia entre el efecto inhibitorio entre el compuesto demetilado y el isoespintanol se debe probablemente a la presencia de un grupo hidroxilo en lugar de un metoxi como es el caso del compuesto demetilado, lo que permite una mayor disposición del H en posición orto para realizarse la transferencia de protón (figura 20). Similar mecanismo es demostrado para los antioxidantes di-*tert*-butilcatecol y catecol<sup>203,204</sup>.

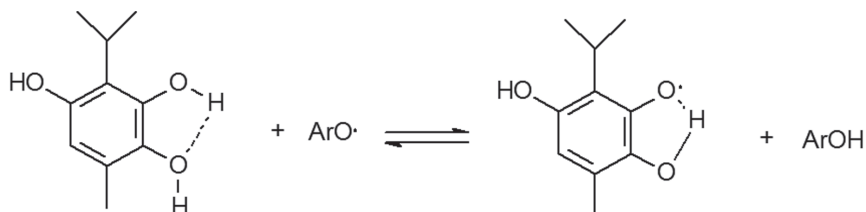


Figura 20. Formación de puente de hidrógeno intramolecular en el compuesto demetilado durante reacción con radicales. Estructuras logradas con el programa Chemdraw.

En el compuesto bromado el efecto del sustituyente marca una diferencia en la capacidad antioxidante comparada con el isoespintanol. En este caso la presencia de un bromo en la posición *para*, puede presentar dos tipos de efectos sobre el anillo aromático: primero, puede ejercer un efecto electrón donante, pero la capacidad para compartir sus electrones disminuye por el incremento de su electronegatividad, actuando como segunda posible opción el efecto electrón atrayente<sup>205,206</sup> similar al Cl y F. El efecto resultante, basados en los parámetros de Hammett, es una constante  $\sigma_p = 0.2$ , lo cual indica que su acción electrón atrayente o efecto inductivo es predominante<sup>207</sup>, aunque su efecto no es muy marcado por tener un valor menor de 0.7. De otro lado, se ha encontrado que algunos valores de las constantes de Hammett  $\sigma_p$  no presentan buena correlación, especialmente cuando los sustituyentes están conjugados con el centro de reacción como los fenoles y las anilinas; de ahí que se hayan considerado en forma especial los efectos resonantes para este tipo de compuestos y hallado las constantes  $R$ ,  $R^-$  y  $R^+$ . En el caso de los fenoles *p*-Br sustituidos, el valor de  $R^- = -0.20$ <sup>208</sup> identifica al Br como un sustituyente electrón donante<sup>209</sup>, justificando de esta manera cómo este compuesto con respecto al isoespintanol podría conferir mayor estabilidad al radical o catión radical formado, según el mecanismo que siga el antioxidante<sup>210,211</sup>.

El efecto de sustituyentes en posición *para* ha sido objeto de estudio en muchos trabajos computacionales<sup>212-215</sup>, y ha sido confrontado con datos experimentales<sup>216</sup>. Brigatti, et al<sup>217</sup>, resumen este efecto en la figura 21. El sustituyente que produce la inestabilidad del compuesto fenólico en estado basal y/o la estabilidad del radical disminuye la energía de disociación de enlace del grupo hidroxilo<sup>218</sup>. De otro lado, el efecto estabilizante contrario aumentará la energía de disociación. Así, los sustituyentes electrón donante actúan en forma repulsiva sobre el grupo OH en el fenol (desestabilizándolo) y atrayente en el radical (estabilizándolo), disminuyendo la energía de enlace y aumentando la velocidad de reacción con el sustrato oxidable<sup>219</sup>. Por lo anterior, se podría inferir que al facilitarse la liberación del protón por una disminución del BDE – OH, muestra el compuesto bromado mayor efecto protector, sobre la inhibición del pardeamiento enzimático, 84.8% (tabla 6).

En general, la modificación estructural del isoespintanol mediante la bromación y demetilación mejoró la inhibición de la actividad de la PPO entre 5 y 10% para 500 y 1000 ppm y 30% a 1000 ppm, en ambos casos.

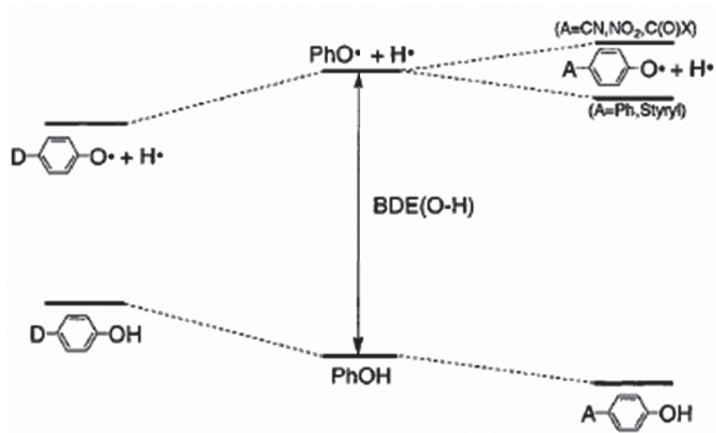


Figura 21. Efecto de sustituyente electrón atrayente y electrón donante sobre los compuestos fenólicos. Tomado de Brigati, G., et al<sup>220</sup>.

Estadísticamente, entre el compuesto bromado y demetilado no hubo diferencias significativas ( $P > 0.05$ ). Los patrones de referencia (isoespintanol y ácido ascóbito) presentaron diferencias significativas ( $P < 0.05$ ) con respecto a los dos compuestos de estudio. En general, para todos los compuestos se observaron diferencias significativas en la actividad de la PPO, al variar la concentración (1000 ppm diferente a 500 y 1500 ppm). Todos los compuestos antioxidantes presentaron diferencias significativas con respecto al control.

## Conclusiones

- La síntesis del 2-isopropil-4-bromo-3,6-dimetoxi-5-metilfenol a partir del 2-isopropil-3,6-dimetoxi-5-metilfenol, produce paralelamente el 3-isopropil-6-metil-1,2,4-trihidroxibenceno en una relación 75:25, respectivamente.
- El isoespintanol presentó una capacidad antioxidante mejor por los tres métodos (FRAP, DPPH, ABTS), con respecto al timol. El compuesto bromado tuvo el mejor resultado por FRAP y el demetilado se comportó mejor en medio metanólico por DPPH.
- Los resultados sugieren que el isoespintanol y sus análogos bromados y demetilado son antioxidantes con un buen poder protector sobre PPO

extraída del banano.

- La mayor inhibición de la actividad de la PPO en el extracto enzimático del banano se logró a 1500 ppm de ácido ascórbico. El compuesto bromado y el demetilado lograron la misma acción protectora a 500 ppm, inhibiendo el 84% de la actividad enzimática, valor 6% por debajo del obtenido con el ácido ascórbico a altas concentraciones.
- Las modificaciones sintéticas del isoespintanol aumentaron la inhibición de la PPO ligeramente a 500 y 1500 ppm, pero significativamente a 1000 ppm.
- El isoespintanol presenta una inhibición competitiva y el ácido ascórbico actúa como reductor.
- El isoespintanol como compuesto natural y sus análogos representan una nueva alternativa como fuente inhibidora del pardeamiento enzimático.

#### Referencias bibliográficas

1. PIZZOCARO, Danila; and GILARDI, Gianluca. Inhibition of apple polyphenol oxidase (PPO) by ascorbic acid, citric and sodium chloride. En: Journal of processing and preservation. 1993. Vol. 17. p. 21 - 30.
2. YANG, Shuji; *et al.* Purification and characterization of polyphenol oxidase from banana (*Musa sapientum* L.) pulp. En: J. Agric. Food Chem.. 2000. Vol. 48: p. 2732 - 2735.
3. MARSHALL, Maurice; KIM, Jeongmok & CHENG-I, Wei. Enzymatic browning in fruits, vegetables and seafoods. Auburn, Alabama: Auburn University, 2000.
4. AMIOT, A.; *et al.* Phytochemistry of fruits and vegetables. Phenolic compounds and oxidative mechanisms in fruit and vegetables. Oxford: Clarendon Press, 1997. p. 51-85.
5. MacDONALD, S.; *et al.* Phenolic content and antioxidant activity of olive extracts. En: Food Chemistry. 2001. Vol. 73. p. 73-84.
6. YANG, Shuji; *et al.*, Op. cit., p. 2732 - 2735.
7. SALVADOR, Budui Delgar. Química de los alimentos. 4<sup>th</sup> ed. México: Pearson, 1993. 736 p.
8. MARSHALL, Maurice; Op. cit.
9. VAMOS-VIGYAZO, L. The destruction of fruit cellular. En: Food Sci. Nutri, 1981. Vol. 15. p. 49-127.

10. SELLÉS, S.; CASADO, J. & BRU, R. Isolation of a latent polyphenol oxidase from loquat fruit (*Eriobotrya japonica* Lindl.): Kinetic characterization and comparison with the active form. En: Archives of Biochemistry and Biophysics. 2006. Vol. 446. p. 175-185.
11. MAYER, Alfred & HAREL, Eitan. Review: polyphenol oxidases in plants. En: Phytochemistry. 1979. Vol. 18. p. 193.
12. PIZZOCARO, Danila; and GILARDI, Gianluca.; Op. cit., p. 21 - 30.
13. VAMOS-VIGYAZO, L. Op. cit. p. 49-127.
14. MARSHALL, Maurice; Op. cit.
15. PIZZOCARO, Danila; and GILARDI, Gianluca.; Op. cit. p. 21 - 30.
16. MARSHALL, Maurice; Op. cit.
17. SAYAVEDRA-SOTO, L.A. & MONTGOMERY, M. W. *Inhibition of polyphenoloxidase by sulfite*. En: Journal of Food Science. November 1986. Vol. 51, no. 6. p. 1531-1536.
18. WALKER, J. Enzymatic browning in foods; its chemistry and control. En: Food Technol. 1977. Vol. 12. p. 19.
19. PONTING, J. D. Control of enzymatic browning of fruits. Food Enzymes. New York.: H.W. Schultz, 1960.
20. WALKER, J.; Op. cit. p. 19.
21. SAPERS, Gerald.; *et al.* Effect of Emulsifying Agents on Inhibition of Enzymatic Browning in Apple Juice by Ascorbyl Palmitate, Laurate and Decanoate. En: Food Sci., 1989. Vol. 54, no. 4. p. 1096 - 1097.
22. SAPERS, Gerald & ZIOLKOWSKI, Michael A. Comparison of erythorbic and ascorbic acids as inhibitors of enzymatic browning in apple. En: J. Food Sci. J. Food Sci. 1987. Vol. 52. p. 1732.
23. DUDLEY, Everett & HOTCHKISS, Joseph. Cysteine as an inhibitor of polyphenoloxidase. En: J. Food Biochem. 1989. Vol. 13. p. 65-75.
24. MONTGOMERY, M.W., Cysteine as an Inhibitor of Browning in Pear Juice Concentrate. En: J. Food Sci. 1983. Vol. 48. p. 951-952.
25. SAPERS, Gerard; *et al.* Uptake and Fate of Ascorbic Acid-2-Phosphate in Infiltrated Fruit and Vegetable Tissue. En: J. Food Sci., 1991. Vol. 56. p. 419 - 422.
26. LAMBRECHT, H. S. Sulfite substitutes for the prevention of enzymatic browning in foods. En: American Chemical Society. 1995. p. 313-323.

27. RICHARDSON, T. *Enzymes*. 2 ed. Acribia. 1985. p. 415 - 536.
28. MARSHALL, Maurice; *Op. cit.*
29. AMIOT, A.; *et al.* *Op. cit.*, p. 51-85.
30. BUSH, R. K.; TAYLOR, S. L. & BUSSE, W. W. A critical evaluation of clinical trials in reactions to sulfites. *En: J. Allergy Clin. Immunol.* 1986. Vol. 78. p. 191-202.
31. DAPKEVICIUS, Teris & NIEDERLANDER, Harm. Evaluation and comparison of two improved techniques for the on-line detection of antioxidants in liquid chromatography eluates. *En: Journal of Chromatography A.* 2001. Vol. 912. p. 73-82.
32. PIETTA, P. S.; *et al.* *Trolox equivalent antioxidant capacity (TEAC) of Ginkgo biloba flavonol and Camellia sinensis catechin metabolites.* *En: J. Pham. Biomed. Anal.* 2000. Vol. 23, no.1. p. 223 - 226.
33. RICE-EVANS, C. Structure-antioxidants activities relationships of flavonoids and phenolic acid. *En: Free Rad. Biol Med.* 1996. Vol. 20, no. 7. p. 933 - 956.
34. ARUOMA, Okezie. Methodological considerations for characterizing potential antioxidant actions of bioactive components in plant foods. *En: Mutation Research/Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis.* February-March 2003. Vol. 523-524. p. 9-20
35. HALLIWELL, B. Antioxidants: elixirs of life or tonics for tired sheep. *En: The Biochemist*, 1995. Vol. 17, no. 1. p. 3 - 6.
36. KAHKONEN, Marja; *et al.* Antioxidant Activity of Plant Extracts Containing Phenolic Compounds. *En: J. Agric. Food Chem.* 1999. Vol. 47. p. 3954 - 3962.
37. AMIOT, A.; *et al.* *Op. cit.*, p. 51-85.
38. FENEMA, O. *Química de los alimentos*. 2ª ed. Acribia, 1993. p. 415-536.
39. RICE-EVANS, C.; *et al.* The relative antioxidant activities of plant-derived polyphenolic flavonoids. *En: Free Radical Res.* 1995. Vol. 22. p. 375 - 383.
40. ROJANO, Benjamin; *et al.* New 24 methyl cicloartane of oxandra *Xylopiodes (Annonaceae)*. 2005.
41. ROJANO, Benjamin. Genotoxicidad y efecto protector del isoespintanol (*Oxandra of Xylopiodes*) sobre linfocitos humanos. *En: Interciencia.* 2005.
42. GALEAZZI, Maria Antonia & SGARBIERI, Valdemiro C. Substrate specificity and inhibition of polyphenol oxidase (PPO) from dwarf variety of banana (*Musa cavendishii L.*). *En: J. Food Sci.*, 1981b. Vol. 46. p. 1404 - 1406.

43. FENEMA, O.; Op. cit. p. 415-536.
44. LEOPOLDINI, Monica; *et al.* Antioxidant properties of phenolic compounds: H-atom versus electrón transfer mechanism. En: J. Phys. Chem. A. 2004. Vol. 108. p. 4916 – 4922.
45. MACDONALD, S.; *et al.* Op. cit., p. 73-84.
46. FENEMA, O.; Op. cit. p. 415-536.
47. LEOPOLDINI, Monica; *et al.* Op. cit. p. 4916 – 4922.
48. WRIGHT, James; JOHNSON, Erin R. & DILABIO, Gino A. Predicting the Activity of Phenolic Antioxidants: Theoretical Method, Analysis of Substituent Effects, and Application to Major Families of Antioxidants. En: J. Am. Chem. Soc. 2001. Vol. 123. p. 1173-1183
49. VAMOS-VIGYAZO, L. Op. cit. p. 49-127.
50. ZAWISTOWSKI, J.; BILIADERIS, C. & Eskin, N. Oxidative enzymes in food. Londres: Elsevier Applied Science, 1991. p. 217-273.
51. AMIOT, A.; *et al.* Op. cit., p. 51-85.
52. MARSHALL, Maurice; Op. cit.
53. BELITZ, H. & SCHIEBERLE, P. Food Chemistry. 2ª ed. Zaragoza: Acribia, S. A., 2004. p. 105 - 172.
54. CALVO, Miguel. Bioquímica de los alimentos. Zaragoza: Acribia, S. A., 2002.
55. BELITZ, H. & SCHIEBERLE, P.; Op. cit. p. 105 - 172.
56. CALVO, Miguel.; Op. cit.
57. Ibid.
58. ROBARDS, Kevin; *et al.* Phenolic compounds and their role in oxidative processes in fruits. En: Food Chemistry. 1999. Vol. 66. p. 401-436.
59. Ibid., p. 401-436.
60. AMIOT, A.; *et al.* Op. cit., p. 51-85.
61. SELLÉS, S.; CASADO, J. & BRU, R.; Op. cit. p. 175-185.
62. CALVO, Miguel.; Op. cit.
63. BELITZ, H. & SCHIEBERLE, P.; Op. cit. p. 105 - 172.
64. Ibid., p. 105 - 172.
65. LERNER, A. B. Metabolism of phenylalanine and tyrosine. En: Adv. Enzymol. 1953. Vo. 14. p. 73-128.

66. AMIOT, A.; *et al.* Op. cit., p. 51-85.
67. VAMOS-VIGYAZO, L. Op. cit. p. 49-127.
68. ROBARDS, Kevin; *et al.* Op. cit., p. 401-436.
69. GUERRERO-BELTRÁN, Barry & BARBOSA, Gustavo. Inhibition of Polyphenoloxidase in mango puree with 4-Hexilresorcinol, cysteine and ascorbic acid. En: *Lebensm. - Wiss. + Technol.* 2005. Vol. 38, no. 6. p. 625-630.
70. PAGINGTON, J. S. Beta-cyclodextrin and its uses in the flavour industry. *Developments in food flavours*. London: Elsevier Applied Science Publishers, 1986. p. 131-150.
71. FINKLE, B. J. & NELSO, R. F. Enzyme reactions with phenolic compounds: effect of o-methyl-transferase on a natural substrate of fruit polyphenoloxidase. En: *Nature*. 1963. Vol. 197. p. 902-903.
72. MARSHALL, Maurice; Op. cit.
73. AMIOT, A.; *et al.* Op. cit., p. 51-85.
74. CHEN, J. S.; *et al.* Inhibition mechanism of kojic acid on polyphenol oxidase. En: *J. Agric. Food Chem.* 1992. Vol. 40. p. 2345 - 2349.
75. LÓPEZ, Pascual; *et al.* Inactivation of peroxidase, lipoxygenase, and polyphenol oxidase by manothermosonication. En: *J. Agric. Food Chem.* 1994. Vol. 42. p. 252 - 256.
76. MARSHALL, Maurice; Op. cit.
77. ESCALONA, V. H.; *et al.* Modified atmosphere packaging inhibits browning in fennel. En: *Lebensm. - Wiss. + Technol.* 2004. Vol. 37, no. 1. p. 115 - 121.
78. MARSHALL, Maurice; Op. cit.
79. BENZIE, Iris & STRAIN, J. J. The ferric reducing ability of plasma (FRAP) as a measure of "antioxidant power": The FRAP assay. En: *Anal. Biochem.* 1996. Vol. 239. p. 70 - 76.
80. SAPERS, Gerald.; *et al.* Op. cit. p. 1096 - 1097.
81. EL-SHIMI, N. M. Control of enzymatic browning in apple slices by using ascorbic acid under different conditions. En: *Plants Food Human Nutrition*. 1993. Vol. 43. p. 71 - 76.
82. SANTERRE, C. & VanNorman, D. J. En: *J. Food Sci.* 1988. Vol. 53. p. 1713 - 1716.
83. SAPERS, Gerard; *et al.* Control of enzymatic browning in apple with ascorbic acid derivatives, polyphenol oxidase inhibitors, and complexing agents. En: *J. Food Sci.* 1989b. Vol. 54. p. 997 - 1002.

84. SAPERS, Gerard & Pilizota, V.; Op. cit.p. 1049 - 1053.
85. GUERRERO-BELTRÁN, Barry & BARBOSA, Gustavo.; Op. cit. p. 625-630.
86. SAPERS, Gerard; *et al.* Op cit. p. 419 - 422.
87. MONTGOMERY, M. W. Cysteine as an Inhibitor of Browning in Pear Juice Concentrate. En: J. Food Sci. 1983. Vol. 48. p. 951 - 952.
88. MOLNAR, P. I.; and Friedman, M. *Inhibition of browning by sulfur. amino acids. 2. Fruit juices and protein-containing foods.* J. Agric. Food Chem., 1990a. 38: p. 1648 - 1651.
89. MOLNAR, Ibolya & Friedman, Mendel. *Inhibition of browning of sulfur amino acids. Part. 2. Fruit juices and protein-containing foods.* En: J. Agric. Food Chem. 1990b. Vol. 38. p. 1652 - 1656.
90. HICKS, Kevin; SAPERS, Gerard & SEIB, Paul. Process for preserving raw fruit and vegetables juice using Ciclodextrins and compositions thereof. US Patent, 1990. p. 293. (N° de patente 4975293).
91. McEVELILY, Arthur; IYENGARA, Radha & OTWELL, Steven. Inhibition of enzymic browning in food and beverages. En: Critical Review in Food Science and Nutrition. 1991. Vol. 32, no. 3. p. 253 - 273.
92. IYENGARA, Radha; *et al.* En: Food Technol. 1995. p. 110 - 118.
93. OTWELL, Steven & McEVELILY, Arthur. Inhibition of shrimp melanosis by 4-hexylresorcinol. En: J. Aquat. Food Product Technol. 1992. Vol. 1. p. 53 - 65.
94. MARSHALL, Maurice; Op. cit.
95. GUERRERO-BELTRÁN, Barry & BARBOSA, Gustavo.; Op. cit. p. 625-630.
96. AMIOT, A.; *et al.* Op. cit., p. 51-85.
97. ROJANO, Benjamin; *et al.* Op cit.
98. ROJANO, Benjamin; Op cit.
99. ROJANO, Benjamin; *et al.* Crystal structure of natural monoterpene Isoespin-tanol. En: Analytical Science. 2005.
100. ROJANO, Benjamin; *et al.* Op cit.
101. ROJANO, Benjamin; Op cit.
102. ROJANO, Benjamin; *et al.* Crystal structure of natural monoterpene Isoespin-tanol. Op cit.
103. MONTOYA MARTÍNEZ , Sergio Andrés; et al. Evaluación de Isoespin-tanol aislado de Oxandra cf. Xylopioides (*Annonaceae*) sobre Spodoptera Frugiperda

- Je Smith (*Lepidoptera: Noctuidae*). En: Revista Facultad Nacional de Agronomía. 2007. Vol. 60, no. 1. p. 3691-3702
104. ARUOMA, Okezie.; *Op. cit.*, p. 9-20
  105. ARNAO, A. y ACOSTA, M. Methods to measure the antioxidant activity in plant material. A comparative discussion. En: Free Rad. Res. 1999. Vol. 3. p. 89-96
  106. BRAND-WILLIAMS, W.; CUVELIER, M. E. y BERSET, C. Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *Lebensm.-Wiss. U. Technol.* 1995. Vol. 28. p. 25-30.
  107. PRIOR, Ronald L. y K. S. Standardized Methods for the Determination of Antioxidant Capacity and Phenolics in Foods and Dietary Supplements. En: Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2005. Vol. 53, no. 10. p. 4290 - 4302.
  108. *Ibid.*, p. 4290 - 4302.
  109. PANNALA, T. S.; O'BIREN, J. y RICE-EVANS, C. B-ring chemistry and antioxidant activity: Fast reaction kinetics. En: *Biophys.* 2001. Vol. 282. p. 1161-1168.
  110. HUANG, Boxin; and PRIOR, Ronald L. The Chemistry behind Antioxidant Capacity Assays. En: *J. Agric. Food Chem.* 2005. Vol. 53, no. 6. p. 1841 - 1857.
  111. ARNAO, A. & ACOSTA, M.; *Op. cit.*, p. 89-96
  112. BENZIE, Iris & STRAIN, J. J.; *Op. cit.*, p. 70 - 76.
  113. PRIOR, Ronald L. y K. S.; *Op. cit.*, p. 4290 - 4302.
  114. WINGROVE, A. S. *Química Orgánica*. México: Harla Harper & Row Latinoamericana, 1981.
  115. *Ibid.*
  116. PINE, S. H. *Química Orgánica*. 2ª ed. México: McGraw-Hill, 1988.
  117. CARDA USÓ, Alberto; MURGA CLAUDELL, Juan; FALOMIR VENTURA, Eva. El benceno y derivados - *Química Orgánica*. 2003.
  118. *Ibid.*
  119. *Ibid.*
  120. MAJETICH, G. H. y REISTER, S. Electrophilic, aromatic bromination using bromodimethyl-sulphonium bromide generated in situ. En: *J. Org. Chem.* 1997. Vol. 62. p. 4321-4326.

121. RUBINSON, K. A. y RUBINSON, Judith F. Análisis instrumental. Madrid: Prentice, 2001. p. 522-525.
122. SILVERSTEIN, R.; BASSLER, Clayton y MORRILL, Terence. Identificación espectrométrica de compuestos orgánicos. 1ª ed. México: Diana, 1980. p. 17-31; 171 – 211
123. HESSE, M.; MEIER, Herbet y ZEEH, Bernd. Métodos espectroscópicos en química orgánica. Madrid: Síntesis, 1995. p. 219 – 222.
124. CONN, E. S.; BRUENING, G. and DOI, R. Bioquímica Fundamental. 5ª ed. ed. I. Ed. John Wiley and Sons. Balderas (México): Noriega Editores, 1987. p. 131-182.
125. HENCHT, S. Bioorganic Chemistry. New York: Oxford university press, 1998. p. 21-26.
126. CONN, E. S.; BRUENING, G. and DOI, R.; Op. cit., p. 131-182.
127. HENCHT, S.; Op. cit., p. 21-26.
128. DIXON, M. Enzymes. 3ª ed. New York: Academic Press, 1979.
129. VÁZQUEZ CONTRERAS, E. Bioquímica y Biología molecular. [En línea]. 2003 [Citado el 31 de agosto de 2006.]. Url disponible en: <http://bq.unam.mx/~evazquez>
130. HENCHT, S.; Op. cit., p. 21-26.
131. VÁZQUEZ CONTRERAS, E.; Op cit.
132. TIPTON, K. F. Patterns of enzyme inhibition, in Enzymology. San Diego: BIOS Scientific Publisher Limited, 1996. p. 77-84.
133. Ibid., p. 77-84.
134. VÁZQUEZ CONTRERAS, E.; Op cit.
135. TIPTON, K. F.; Op. cit., p.77-84.
136. CONN, E. S.; BRUENING, G. and DOI, R.; Op. cit., p. 131-182
137. MOTULSKY, H. J. & CHRISTOPOULOS, A. Fitting models to biological data using linear and nonlinear regression: a practical guide to curve fitting. San Diego: GraphPad Software Inc., 2003.
138. METZLER, D. E. Bioquímica. Las reacciones químicas en las células vivas. Barcelona: ed. S.A. Omega, 1981. p. 312 - 371.
139. CONN, E. S.; BRUENING, G. and DOI, R.; Op. cit., p. 131-182
140. MOTULSKY, H. J. & CHRISTOPOULOS, A.; Op. cit.

141. CONN, E. S.; BRUENING, G. and DOI, R.; Op. cit., p. 131-182
142. TIPTON, K. F.; Op. cit., p.77-84.
143. Ibid., p.77-84.
144. MEYDAV, S. S.; et al. Browning determination in citrus products. En: J. Agric. Food Chemistry. 1977. Vol. 25, no. 3. p. 602-604.
145. PIZZOCARO, Danila; and GILARDI, Gianluca.; Op. cit., p. 21 - 30.
146. GUERRERO-BELTRÁN, Barry & BARBOSA, Gustavo.; Op. cit. p. 625-630.
147. MAJETICH, G. H. y REISTER, S.; Op. cit. p. 4321-4326.
148. Ibid., p. 4321-4326.
149. CAVIN, A. Antioxidant and lipophilic constituents of *Tinospora crispa*. En: Plant Med. 1998. Vol. 64. p. 393 - 396.
150. SÁNCHEZ-MORENO, C. L. & SAURA-CALIXTO, F. A procedure to measure the antiradical efficiency of polyphenols. En: J. Sci. Food Agric. 1998. Vol. 76, no. 2. p. 270 - 276.
151. RE, R. P.; *et al.* Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. En: Free Rad. Biol. Med. 1999. Vol. 26. p. 1231-1237.
152. BENZIE, Iris & STRAIN, J. J.; Op. cit., p. 70 - 76.
153. SAENZ, M. J. Estudios sobre la dinámica de maduración de bananos del cultivar FHIA-2. Costa Rica: Centro de Investigaciones Agronómicas, Universidad de Costa Rica, 1999. p. 114.
154. PALMER, J. K. Banana Polyphenoloxidase. Preparation and Properties. En: Plant Physiol. 1963. Vol. 38. p. 508 - 513.
155. PIZZOCARO, Danila; and GILARDI, Gianluca.; Op. cit., p. 21 - 30.
156. COLOMBIA. MINISTERIO DE SALUD. *Resolución N°4124 de 1991*. Bogotá: El Ministerio, 1991. p. 3.
157. PIZZOCARO, Danila; and GILARDI, Gianluca.; Op. cit., p. 21 - 30.
158. GUERRERO-BELTRÁN, Barry & BARBOSA, Gustavo.; Op. cit. p. 625-630.
159. DOS SANTOS, R. Energetics of the O-H Bond in Phenol and Substituted Phenols: A Critical Evaluation of Literature Data. En: J. Phys. Chem. 1998. Vol. 27, no. 3. p. 707.
160. FRISCH, M. J.; *et al.* *Gaussian 03 Revision B.05*. Pittsburgh, PA: Gaussian Inc., 2003.
161. HESSE, M.; MEIER, Herbet y ZEEH, Bernd.; Op. cit. p. 219 – 222.

162. PIZZOCARO, Danila; and GILARDI, Gianluca.; Op. cit., p. 21 - 30.
163. YANG, Shuji; *et al.*, Op. cit., p. 2732 - 2735.
164. MARSHALL, Maurice; Op. cit.
165. DOS SANTOS, R.; Op. cit., p. 707.
166. PIETTA, P. S.; *et al.*; Op. cit., p. 223 - 226.
167. LEOPOLDINI, Monica; *et al.* Op. cit. p. 4916 – 4922.
168. WRIGHT, James; JOHNSON, Erin R. & DILABIO, Gino A. ; Op. cit., p. 1173-1183.
169. SACCHETTI, 2005.
170. PRIOR, Ronald L. y K. S.; Op. cit., p. 4290 - 4302.
171. SCHLESIER, H. M.; BOHM, V. & BITSCH, R. Assessment of antioxidant activity by using different in vitro methods. En: Free Radical Res. 2002. Vol. 36, no. 2. p. 177-187.
172. KAHKONEN, Marja; *et al.* ; Op. cit., p. 3954 - 3962.
173. Lagouri, V. B.; *et al.* Composition and antioxidant activity of essential oils from Oregano plants grown wild in Greece. En: Zeitschrift für Lebensmitteluntersuchung und -Forschung A 1993. 1997. p. 20 - 23.
174. V. G. Antioxidant activity and mechanism of action of thymol and carvacrol in two lipid systems. En: Food Chem. 1999. Vol. 64. p. 59–66.
175. BRAND-WILLIAMS, W.; CUVELIER, M. E. y BERSET, C. Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. *Lebensm.-Wiss. U. Technol.* 1995. Vol. 28. p. 25-30.
176. *Ibid.*, p. 25-30.
177. ROJANO, Benjamin; *et al.* Experimental and Theoretical Determination of the Antioxidant Properties for Isoespintanol. En: *Theochem.* 2008. Vol. 877. p. 1 - 16.
178. CHANDRA, A.K. & TADAFUMI. The O-H bond dissociation energies of substituted phenols and proton affinities of substituted phenoxide ions: a DFT study. En: *Int. J. Mol. Sci.* 2002. Vol. 3. p. 407 - 422.
179. LUCARINI, Veronica & PEDULLI, Gian Franco. Bond dissociation enthalpies of polyphenols: the importance of cooperative effects. En: *J. Org. Chem.* 2002. Vol. 67. p. 928 - 931.
180. BENZIE, Iris & STRAIN, J. J.; Op. cit., p. 70 - 76.
181. HANSCH, C. L. & TAFT, R. W. A Survey of Hammett Substituent Constants and Resonance and Field Parameters. En: *Chem. Rev.* 1991. Vol. 91. p. 165-195.

182. WU, Y. *A density functional study of substituent effects on*. En: J. Org. Chem. 1996. Vol. 61. p. 7904 - 7910.
183. ROGINSKY, 2005.
184. PALMER, J. K.; *Op. cit.*, p. 508 - 513.
185. *Ibid.*, p. 508 - 513.
186. YANG, Shuji; *et al.*; *Op. cit.*, p. 2732 - 2735.
187. PALMER, J. K.; *Op. cit.*, p. 508 - 513.
188. GRIFFITHS, L. A. Detection and identification of polyphenol oxidase substrate of banana. En: Nature. 1959. Vol. 184. p. 58 - 59.
189. PALMER, J. K.; *Op. cit.*, p. 508 - 513.
190. YANG, Shuji; *et al.*; *Op. cit.*, p. 2732 - 2735.
191. McEVELILY, Arthur; IYENGARA, Radha & OTWELL, Steven.; *Op. cit.*, p. 253 - 273.
192. TANNENBAUM, S. T. & YOUNG, V. R. Vitamins and minerals, in Food Chemistry, O.R. Fennema, Editor. USA: Marcel Dekker, 1985. p. 477 - 544.
193. YANG, Shuji; *et al.*; *Op. cit.*, p. 2732 - 2735.
194. GALEAZZI, Maria Antonia & SGARBIERI, Valdemiro C.; *Op. cit.*, p. 1404 - 1406.
195. SOJO, M.M.; GARCIA-CARMONA, F. & SANCHEZ FERRER, A. Partial purification of a banana polyphenol oxidase using Triton X-114 and PEG 8,000 for removal of polyphenols. En: J. Agric. Food Chem. 1998. Vol. 46. p. 4924 - 4930.
196. McEVELILY, Arthur; IYENGARA, Radha & OTWELL, Steven.; *Op. cit.*, p. 253 - 273.
197. CONN, E. S.; BRUENING, G. and DOI, R.; *Op. cit.*, p. 131-182
198. MOTULSKY, H. J. & CHRISTOPOULOS, A.; *Op. cit.*
199. GUERRERO-BELTRÁN, Barry & BARBOSA, Gustavo.; *Op. cit.*, p. 625-630.
200. DE HEER, M. I. & Mulder, P. Poly Methoxy Phenols in Solution: O-H Bond Dissociation Enthalpies, Structures, and Hydrogen Bonding. En: J. Org. Chem. 1999. Vol. 6, no. 19. p. 6969 - 6975.
201. DE HEER, M.I.; *et al.* Hydrogen Atom Abstraction Kinetics from Intramolecularly Hydrogen Bonded Ubiquinol-0 and Other (Poly)methoxy Phenols. En: J. Am. Chem. Soc. 2000. Vol. 122, no. 10. p. 2355 - 2360.
202. LUCARINI, Veronica & PEDULLI, Gian Franco.; *Op. cit.*, p. 928 - 931.

203. WRIGHT, James; JOHNSON, Erin R. & DILABIO, Gino A. ; Op. cit., p. 1173-1183.
204. LUCARINI, Veronica & PEDULLI, Gian Franco.; Op. cit., p. 928 - 931.
205. RITCHIE, C. D. Physical organic chemistry. 2ª ed. New York.: Marcel Dekker Inc. p. 91 - 105.
206. ISAACS, N. S. Physical organic chemistry. 2ª ed. L.S. Technical. p. 149 - 165.
207. Ibid., p. 149 - 165.
208. HANSCH, C. L. & TAFT, R. W.; Op. cit., p. 165-195.
209. Ibid., p. 165-195
210. LEOPOLDINI, Monica; *et al.* Op. cit. p. 4916 – 4922.
211. WRIGHT, James; JOHNSON, Erin R. & DILABIO, Gino A.; Op. cit., p. 1173-1183.
212. CHANDRA, A.K. & TADAFUMI.; Op. cit., p. 407 - 422.
213. WU, Y.; Op. cit., p. 7904 - 7910.
214. BORDWELL, F.G.; SATISH, A. V. & Cheng, J. P. Assessment of the Importance of changes in ground-state energies on the bond dissociation enthalpies of the O-H bonds in phenols and the S-H bonds in thiophenols. En: J. Am. Chem. Soc. 1994. Vol. 116. p. 6605 - 6610.
215. WRIGHT, J. S.; McKAY, D. J. & INGOLD, K. U. Theoretical Calculation of Substituent Effects on the O-H Bond Strength of Phenolic Antioxidants Related to Vitamin E. En: J. Am. Chem. Soc. 1997. Vol. 119, no. 18. p. 4245 - 4252.
216. DOS SANTOS, R.; Op. cit., p. 707.
217. BRIGATI, G. L.; *et al.* Determination of the substituent effect on the O-H bond dissociation enthalpies of phenolic antioxidants by the EPR Radical Equilibration technique. En: J. Org. Chem. 2002. Vol. 67. p. 4828-4832.
218. GALEANO, Paula L.; *et al.* Synthesis and antioxidant activity of two isoespintanol derivatives. En: Rev. Colomb. Quim. 2010. Vol. 39, no. 2. p. 173-180.
219. LUCARINI, Veronica & PEDULLI, Gian Franco.; Op. cit., p. 928 - 931.
220. BRIGATI, G. L.; *et al.*; Op. cit., p. 4828-4832.



# Desarrollo de nuevos productos de uchuva y fresa con valor agregado

Ana María Restrepo Duque\*  
Misael Cortés Rodríguez\*\*

## Resumen

**Introducción.** Las tendencias mundiales de la alimentación en los últimos años indican un interés acentuado de los consumidores hacia ciertos alimentos, que además del valor nutritivo aporten beneficios a las funciones fisiológicas del organismo humano, estos son los llamados: “Alimentos funcionales”. **Objetivo.** Desarrollar dos productos a partir de uchuva (*Physalis peruviana* L.) y fresa (*Fragaria ananassa* Duch.) mínimamente procesadas con características funcionales, por incorporación de vitamina E utilizando la ingeniería de matrices como metodología de obtención de alimentos funcionales, a través de la técnica de impregnación a vacío. **Materiales y métodos.** La respuesta a la impregnación se evaluó en términos de fracción volumétrica de impregnación ( $X$ ), fracción másica de impregnación ( $X_{MHD}$ ) y porosidad eficaz ( $\epsilon_{IV}$ ), las cuales se afectan por la microestructura de cada fruto; específicamente para la uchuva fue determinante el área y la distribución de los poros del área del pedúnculo. Se formularon emulsiones de impregnación para cada fruta, con una fase acuosa de sacarosa y una concentración teórica del dl- $\alpha$  tocoferol acetato con

---

\* Corporación Universitaria Lasallista, Facultad de Ingenierías, Ingeniería de Alimentos.

\*\* Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Departamento de Ingeniería Agrícola y Alimentos.

el propósito de incorporar el 73% del Valor Diario de Referencia (VDR) de vitamina E según la norma colombiana (30 UI  $\approx$  30 mg de dl- $\alpha$  tocoferol acetato) en 100 g de fruta fresca. Para estabilizar la emulsión, se utilizaron dos tensoactivos no iónicos: Tween 80, Span 60 y NaCl. La vitamina E se cuantificó por cromatografía líquida de alta resolución (HPLC) previa extracción con hexano de las muestras. Se evaluaron los productos fortificados en términos de contenido de vitamina E, color, textura y valoración sensorial; durante el almacenamiento a 4°C y tiempos de control hasta 9 y 15 días para la fresa y uchuva respectivamente. **Resultados.** Los niveles de vitamina E en el producto final alcanzaron valores de  $117,1 \pm 27,8$  % VDR y  $63,7 \pm 10,0$  % VDR, para la uchuva y fresa respectivamente por cada 100 g de fruta fresca. La textura de la fresa se vio afectada por el proceso IV, siendo las muestras menos duras; mientras que los cambios durante el almacenamiento se consideraron más por variaciones propias del fruto fresco. El proceso de IV fue significativo en el color de los frutos impregnados, siendo más oscuros que los frutos frescos, mientras que no hubo influencia por el tiempo ni por el tipo de envasado. En el análisis sensorial el efecto del proceso IV provocó un grado de aceptación global superior en los productos impregnados al tiempo cero, en comparación con la fruta fresca; contrario a lo que sucedió durante el almacenamiento con las muestras envasadas con y sin vacío. **Conclusiones.** Estos resultados permiten identificar la técnica de impregnación como un mecanismo efectivo en la obtención de alimentos funcionales, generando valor agregado y mejores beneficios para la salud del consumidor.

**Palabras clave:** fresa, uchuva, impregnación al vacío, vitamina E.

## Development of new products from physalis and strawberries with added value

### Abstract

Introduction. World trends for food, in the last few years, show a great interest among consumers about certain food with a high nutritional value and beneficial for the physiological functions of the human body. Such food is called “functional food”. Objective. To develop two products from physalis (*Physalis peruviana* L.) an-

strawberry (*Fragaria ananassa Duch.*), minimally processed and with functional characteristics, with vitamin E incorporated, using the matrix engineering as a method to obtain functional food, through the vacuum impregnation technique. Materials and methods. The response to the impregnation was evaluated under volumetric fraction impregnation terms ( $X$ ), mass impregnation fraction ( $X^{\text{MHD}}$ ) and effective porosity ( $\epsilon^{\text{IV}}$ ), which are affected by the microstructure of each fruit. In the specific case of physalis the area and the pore distribution in the stem area were decisive. Impregnation emulsions for each fruit were formulated, with an aqueous base of sucrose and a theoretical concentration of the dl- $\alpha$  tocopherol acetate aiming to incorporate a 73% of the Daily Reference Value (DRV) of vitamin E according to the Colombian rule (30 UI  $\approx$  30 mg de dl- $\alpha$  tocopherol acetate) in 100 g of fresh fruit. To stabilize the emulsion, two non ionic tensoactives were used: Tween 80, Span 60 and NaCl. The vitamin E was counted by high resolution liquid chromatography, after extracting the samples with hexane. The fortified products were evaluated according to their vitamin E content, color, texture and sensory evaluation, during the storage at 4°C and control periods that reached 9 and 15 days for the strawberry and the physalis, respectively. Results: The vitamin E levels in the final product reached values  $117,1 \pm 27,8$  % DRV and  $63,7 \pm 10,0$  % DRV, for the physalis and the strawberry, respectively, for every 100 g of fresh fruit. The texture of the strawberry was affected by the IV process and the samples were softer, while the changes during the storage were considered to be due to the variations of the fresh fruit. The process of IV was significant in the color of the impregnated fruits, which were darker than the fresh ones, and no influence was exercised by the time or by the type of packaging. In the sensory analysis, the effect of the process IV brought a superior global acceptance degree in the products impregnated at the zero time, in comparison to the fresh fruit. The opposite took place during the storage with the samples packaged with and without vacuum. Conclusions. These results are useful to identify the impregnation technique as an effective mechanism to obtain functional food, bringing an added value and greater benefits to the consumers' health.

**Key words:** strawberry, physalis, vacuum impregnation, added value, vitamin E.

## Introducción

El interés del consumidor por la relación entre la dieta y la salud ha aumentado, la evidencia cada vez más fuerte de que los alimentos que contienen componentes fisiológicamente activos (CFA) cumplen, al igual que los nutrientes esenciales, una función de beneficio que contribuye a reducir la incidencia de ciertas enfermedades crónicas. Tal es el caso de las dietas ricas en frutas y hortalizas, las cuales proporcionan una mezcla óptima de CFA y es por esta razón que su consumo está relacionado con la reducción en el riesgo de enfermedades coronarias y algunos tipos de cáncer<sup>1,2,3</sup>

La presente investigación busca aplicaciones seguras desde la ingeniería de matrices utilizando la técnica de impregnación a vacío (IV)<sup>4,5</sup> como mecanismo de incorporación de líquidos que contienen componentes fisiológicamente activos (CFA) como es el caso de la vitamina E, sobre frutas tropicales propias de nuestra región. Esta herramienta novedosa de la ingeniería de alimentos, proporciona métodos sofisticados capaces de alterar la estructura física y la composición química de los alimentos, mediante transferencia de masa rápidas y mayor ganancia de solutos en tiempos cortos, con el fin de obtener productos con las características de color, sabor y textura propias del alimento fresco<sup>6</sup>.

El desarrollo de nuevos productos con características funcionales a partir de uchuva (*Physalis peruviana* L.) y fresa (*Fragaria ananassa* Duch.) mínimamente procesadas, abre nuevas puertas al desarrollo de la agroindustria Colombiana, al desarrollo de nuevos procesos tecnológicos y lo más importante: a cumplir con las exigencias del consumidor actual que busca en el mercado alimentos de calidad, que además del valor nutritivo le proporcionen beneficios a la salud<sup>7</sup>. La fortificación de frutas como uchuva y fresa se muestra interesante por ser estructuras alimentarias porosas que permiten un proceso de impregnación eficiente debido a que en ellas los poros quedan llenos de la emulsión que contiene la vitamina E.

El interés en la aplicación de la técnica de impregnación a vacío sobre estructuras alimentarias como la fresa y uchuva, está fundamentado en sus excelentes bondades nutricionales que pueden verse potenciadas por la incorporación de la vitamina E dentro de la matriz alimentaria. La combinación de la vitamina E incorporada con las vitaminas y minerales propios de la fruta, permite darle un valor agregado a estas estructuras y lo novedoso es que no existen en el mercado este tipo de productos. La alternativa resulta interesante ya que el consumidor actual apoya y requiere de estos desarrollos por sus cualidades saludables. En la actualidad se están llevando a cabo

acuerdos de competitividad de productos hortofrutícolas promisorios exportables en Colombia que tienen como propósito contribuir al fortalecimiento y la modernización de la producción, comercialización y distribución de las frutas y hortalizas que exporta el país con miras a aprovechar plenamente las oportunidades que se presentan en los mercados internacionales.

En Colombia, las exportaciones de frutas exóticas comenzaron en forma continua a finales de 1986, principalmente a Alemania. La uchuva, tiene como principales destinos los países bajos, seguido de Alemania, Francia e Inglaterra. Durante los últimos años los volúmenes de exportaciones y sus registros económicos, presentan incrementos demasiado importantes, correspondiendo a Europa valores mayores del 95 %. Entre los años 2004 y 2005 se incrementaron las exportaciones en un 48 %, correspondiendo a Europa el 97,3 % y un 2,4 % entre Estados Unidos y Canadá. Otros mercados a muy baja escala son el de Arabia, Brasil y Honk Kong. Es importante resaltar que las perspectivas de crecimiento son cada día mayores, aún más por las aperturas de nuevos mercados como el de Estados Unidos desde el año 2003<sup>8</sup>.

## Uchuva

La uchuva (*Physalis peruviana* L.) es una planta originaria de los Andes Suramericanos perteneciente a la familia de las Solanáceas, con alto potencial de multiplicación. Se caracteriza por tener un fruto azucarado y con buenos contenidos de vitaminas A y C, fibra, proteínas, fósforo, hierro, potasio y zinc<sup>9,10</sup>. La tabla 1 presenta la composición nutricional del fruto por cada 100 gramos de producto. Su jugo, presenta valores de pH entre 3,6 a 4,1; éste parámetro favorece la estabilidad del ácido ascórbico en la fruta, frente a procesos de oxidación, tratamientos térmicos, exposición a la radiación, etc.<sup>11</sup>.

Se le han atribuido muchas propiedades medicinales tales como anti-tiasmático, diurético, antiséptico, sedante, analgésico, fortifica el nervio óptico, alivia problemas de garganta, dermatitis, hepatitis y reumatismo, elimina parásitos intestinales y amebas; además se reportan sus propiedades antidiabéticas<sup>13,14</sup>.

Tabla 1. Valor nutricional de la Uchuva en 100 g de masa comestible<sup>12</sup>

Factor nutricional	Contenido	
Calorías	54,0	
Agua	79,4	%
Grasa	0,5	g
Proteína	1,5	g
Carbohidratos	13,1	g
Fibra	4,8	g
Ceniza	0,7	g
Calcio	9,0	mg
Fósforo	21,0	mg
Hierro	1,7	mg
Vitamina A	1730,0	U.I
Tiamina	0,01	mg
Riboflavina	0,17	mg
Niacina	0,8	mg
Ácido ascórbico	20,0	mg

## Fresa

La fresa (*Fragaria ananassa* Duch.) es una planta perteneciente a la familia Rosaceae, considerada fruta de placer por excelencia<sup>15</sup>. Se destaca por su contenido de vitamina C, taninos, flavonoides, antocianinas, catequina, quercetina y kaempferol, ácidos orgánicos (cítrico, málico, oxálico, salicílico y elágico) y minerales (K, P, Ca, Na y Fe), además de pigmentos y aceite esencial. Estos compuestos presentes en la fresa tienen un potente poder antioxidante y ayudan a disminuir el riesgo de eventos cardiovasculares, mejoran la función endotelial vascular y disminuyen la trombosis<sup>16</sup>. La tabla 2 presenta la composición de la fresa por 100 g de porción comestible. Por otra parte, se ha demostrado en varios sistemas experimentales la actividad anticancerígena de extractos de fresas, así como su bloqueo de iniciación de la carcinogénesis y proliferación de tumores. Estudios preliminares con animales indican que las dietas ricas en fresas también pueden tener el potencial para proporcionar beneficios para el envejecimiento cerebral<sup>17,18, 19</sup>.

Tabla 2. Composición de la fresa por 100 g de porción comestible<sup>20</sup>.

Factor nutricional	Contenido	
Calorías	37,0	
Agua	80-90	%
Grasa	0,1-0,4	%
Proteína	0,5-0,9	%
Carbohidratos	5,0-10,0	%
Ceniza	1,0-3,0	%
Calcio	21,0	mg
Sodio	1,0	mg
Potasio	164,0	mg
Fósforo	21,0	mg
Hierro	1,0	mg
Vitamina A	60,0	U.I
Tiamina	0,03	mg
Riboflavina	0,03	mg
Niacina	0,6	mg
Ácido ascórbico	20,0-70,0	mg

## Alimentos funcionales

Las tendencias mundiales de la alimentación en los últimos años indican un interés acentuado de los consumidores hacia ciertos alimentos, que además del valor nutritivo aporten beneficios a las funciones fisiológicas del organismo humano. Estas variaciones en los patrones de alimentación generaron una nueva área de desarrollo en la ciencia y tecnología de los alimentos, que corresponde a la de los alimentos funcionales<sup>21</sup>.

El término Alimento Funcional fue propuesto por primera vez en Japón durante la década de 1980 con la publicación de la reglamentación de los “Alimentos de uso específico para la salud” (“Foods for specified health use” o FOSHU) y se refiere a “cualquier alimento o ingrediente alimenticio modificado que pueda proporcionar beneficios a la salud que van más allá de los nutrientes tradicionales que contiene”<sup>22</sup>. El término “funcional” implica que el alimento tiene algún valor identificado que conduce a beneficios para la salud, incluyendo la reducción del riesgo de enfermedad, para la persona que lo consume<sup>23</sup>.

Existen actualmente 11 categorías de ingredientes funcionales incluidos en el sistema FOSHU<sup>24</sup>: fibra alimentaria, oligosacáridos, alcoholes derivados de azúcares, ácidos grasos poliinsaturados, péptidos y proteínas, glucósidos, isoprenoides y vitaminas, alcoholes y fenoles, colinas (lecitina), bacterias del ácido láctico (BAL), Minerales: macrominerales y microminerales, Otros.

En los países occidentales la historia de este tipo de alimentos se remonta a las primeras prácticas de fortificación con vitaminas y minerales, así como también a la práctica de incluir ciertos componentes en los alimentos procesados con el objeto de complementar alguna deficiencia de la población<sup>25</sup>. Hoy en día se vienen desarrollando trabajos de investigación en torno al enriquecimiento y fortificación de diferentes alimentos con disoluciones suspensiones o emulsiones que contienen componentes fisiológicamente activos utilizando la técnica de IV, con el fin de desarrollar productos con características funcionales<sup>26,27,28</sup>.

En Colombia también se ha despertado un reciente interés por el tema de los alimentos funcionales y las universidades y centros de investigación, comienzan a consolidar grupos de trabajo en el tema. Legalmente no existe aún una normativa que defina y regularice la producción, verificación científica de las propiedades saludables, desarrollo tecnológico y comercialización de los alimentos funcionales. Sin embargo algunas normas establecidas regularizan alimentos con propiedades adicionales para la salud, por ejemplo: El Decreto 1944 de 1996 reglamenta la fortificación obligatoria de la harina de trigo con vitamina B1, vitamina B2, niacina, ácido fólico y hierro; La Resolución 11961 de 1989 de la leche cultivada con *Bifidobacterium*; la Resolución 11488 de 1984 que precisa las normas técnicas relacionadas con alimentos infantiles, alimentos o bebidas enriquecidas y alimentos o bebidas de uso dietético, en los cuales se permite la adición de nutrientes y la denominación de fortificados; El Decreto 3636 de noviembre de 2005 por el cual se reglamentan los productos de uso específico, incluidos los productos importados con denominación del país de origen como “suplemento dietario”, “complemento alimenticio”, o “nutracéutico”<sup>29</sup>.

## Vitamina E

El término general vitamina E se utiliza para designar a un grupo de ocho especies naturales de tocoferoles y tocotrienoles ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ , y  $\delta$ ). Junto con las vitaminas A, D y K constituyen el grupo de las vitaminas liposolubles, caracterizadas por ser derivados del núcleo isoprenoide, solubles en lípidos y disolventes orgánicos. Son compuestos esenciales, puesto que el organismo no puede sintetizarlas, por lo que su aporte se realiza a través de la dieta en pequeñas cantidades<sup>30</sup>.

El interés por la vitamina E ha aumentado en los últimos años debido a su potente poder antioxidante<sup>31</sup>. Se caracteriza por tener una función

primordial y es impedir o retrasar la oxidación de diversas sustancias, principalmente de los ácidos grasos, cuyas reacciones se producen tanto en los alimentos como en el organismo humano, en el cual puede provocar alteraciones fisiológicas desencadenando diferentes enfermedades.

Existen evidencias científicas de que la vitamina E está relacionada con la reducción de enfermedades cardiovasculares<sup>32</sup>, prevención de cáncer<sup>33</sup>, mejoramiento del sistema inmune, disminución de enfermedades inflamatorias entre otras<sup>34</sup>.

### Impregnación al vacío

El proceso IV ha sido descrito<sup>35,36</sup> a través de la acción del mecanismo hidrodinámico (MHD), como un proceso de transporte de materia en un sistema sólido poroso-líquido. El sistema durante la acción del MHD experimenta cambios estructurales ocasionados por los cambios de presión, lo que indica que conjuntamente se pueden presentar fenómenos de Deformación-Relajación (FDR) en la matriz sólida del sistema. Este acoplamiento MHD-FDR en la matriz del producto ha sido modelizado, reflejando cambios en el volumen del producto al final de las etapas a vacío y a presión atmosférica<sup>37</sup>.

El modelo establece la relación entre la fracción volumétrica de líquido incorporado a través del mecanismo hidrodinámico ( $X$ ), las deformaciones volumétricas de la estructura al final de la etapa a vacío y al final del proceso ( $\gamma_1$  y  $\gamma$ , respectivamente), la porosidad eficaz ( $\varepsilon^{IV}$ ) del producto y la relación de compresión  $r = P_{atm} / P_{vacío}$  (ecuación 1).

$$\varepsilon^{IV} = \frac{(X - \gamma)r + \gamma_1}{r - 1} \quad (1)$$

La determinación experimental de la deformación volumétrica en la etapa de vacío ( $\gamma_1$ ) es compleja, no obstante cuando se trabaja a presiones muy bajas,  $r$  es muy grande y puede aceptarse, la condición establecida en la ecuación (2). Con esto, la ecuación 1 se simplifica a la 3

$$(X - \gamma)r \gg \gamma_1 \quad (2) \quad \varepsilon^{IV} = \frac{X - \gamma}{\left(1 - \frac{1}{r}\right)} \quad (3)$$

La actuación acoplada del MHD y FDR, está muy afectada por la microestructura y las propiedades mecánicas del sólido, así como por la viscosidad de la solución externa<sup>38</sup>.

La impregnación a vacío está afectada por diversos factores<sup>39</sup>: composición del tejido, estructura del tejido (tamaño y distribución de poros), propiedades mecánicas del alimento, velocidad de flujo del gas y del líquido durante la acción del MHD, que a su vez depende de la estructura del tejido y de la viscosidad de la solución y finalmente el tamaño y forma de la muestra

La impregnación a vacío promueve cambios composicionales muy rápidos en frutas y vegetales por adición a la solución de impregnación de componentes que aseguran una mejor estabilidad del producto (disminución del pH y  $a_w$  incorporación de agentes antimicrobianos o antipardeantes<sup>40</sup> o mejora de algunos atributos de calidad (sabor global del producto, fortificación con nutrientes específicos)<sup>41,42</sup>.

## Materiales y métodos

### Materia prima

Se utilizaron uchuvas enteras de la variedad Ecotipo Colombia cultivadas en el Municipio de la Unión, con un peso entre 6,0 – 7,0 g seleccionadas con un grado de Madurez de 4 según especificaciones de color (Norma Técnica Colombiana) y fresas enteras de la variedad Camarrosa, cultivadas en el Municipio de Santa Rosa de Osos, Antioquia; cosechadas según características homogéneas de color, con un peso aproximado entre  $12,0 \pm 2,0$  g y con un grado de madurez de 5. Como componente fortificante con actividad de vitamina E se utilizó acetato de dl- $\alpha$ -tocoferol con una pureza 96,9 % (Merck). Se utilizó una fase acuosa a partir de sacarosa, dos tensoactivos no iónicos: Tween 80 (Polioxietileno Sorbitano Monooleato, BHL=15) y Span 60 (Monoésterato de sorbitano, BHL=4,7) y NaCl como estabilizante de las fuerzas electrostáticas de la emulsión de impregnación<sup>43</sup>.

### Emulsiones de impregnación

Las emulsiones se prepararon en lotes de 500 g en un homogenizador Ultraturrax Tipo 45 S5 - Janke y Kunkel IKA- Labortechnik, las condiciones de emulsificación fueron 10.000 rpm, durante 20 minutos, utilizando un recipiente de vidrio con baño de enfriamiento. Las emulsiones se diseñaron con una composición definida para cada fruto, siendo la fase acuosa de cada emulsión una disolución isotónica de sacarosa con actividad de agua ( $a_w$ ) igual a la del fruto: 14 °Brix (fresa) y 20 °Brix (uchuva). La composición de la emulsión utilizada para la fresa fue la siguiente: Vitamina

E sintética; 0,78 %, Tween 80; 0,17 %, Span 80; 0,16 %, NaCl; 0,05 %, sacarosa; 14 % y agua: 84,80 % p/p y para uchuva la composición de la emulsión fue: Vitamina E sintética; 0,67 %, Tween 80; 0,17 %, Span 80; 0,16 %, sal; 0,05 %, sacarosa; 20 % y agua; 78,90 % p/p.

### Caracterización Físicoquímica

A las muestras frescas e impregnadas, se le realizaron pruebas de acidez por titulación con NaOH 0.1N, utilizando fenolftaleína como indicador (Norma técnica Colombiana: NTC 4103<sup>44</sup>); el contenido de humedad se determinó según la norma oficial 7003<sup>45</sup>, el pH con un potenciómetro Schott CG840B, la  $a_w$  con un higrómetro de punto de rocío a 25°C (Aqualab Decagón serie 3TE), los sólidos solubles se midieron a partir de los índices de refracción en un refractómetro Leica auto ABBE (escala de 0-32 %) a 20 °C, la densidad aparente del fruto ( $\rho_{apm}$ ) se determinó a partir de la relación de la masa de la muestra y el volumen desplazado por la muestra en una probeta y la densidad del líquido de impregnación se determinó por el método del picnómetro a 20°C<sup>46</sup>. La valoración de las propiedades físicoquímicas fue realizada a partir de 3 lotes, de 6 muestras/lote para un total de 18 lecturas.

El color se determinó utilizando el espectrocolorímetro X-RITE, modelo SP60, el iluminante D65 y el observador de 10° como referencia; las medidas se realizaron con componente especular incluida. A partir de los espectros de reflexión se obtuvieron las coordenadas de color del CIE-L\*a\*b, donde L\* es un indicador de la luminosidad, a\* (cromaticidad verde (-) a rojo (+)) y b\* (cromaticidad azul (-) a amarillo (+)). La textura se determinó a partir de ensayos mecánicos de punción en uchuvas enteras, utilizando un analizador de textura TA.XT2, de la firma Stable Micro Systems (SMS), el Software Texture Expert Exceed, versión 2,64 y una sonda metálica de 5 mm de diámetro, a una velocidad de penetración de 2 mm/s hasta una distancia de penetración de 10 mm. En todos los casos se registró la curva de fuerza (F) - distancia (D) y su pendiente inicial ( $\epsilon^*$ ). El color y la textura se evaluaron durante el almacenamiento para cada condición con un total de 10 muestras, en el caso del color se tomaron 3 lecturas/muestra.

### Caracterización microestructural

El análisis estructural de las muestras impregnadas se realizó en un microscopio electrónico de barrido (SEM) marca JEOL JSM 5950 LV, a 25

Pa de vacío y 15 kv de corriente eléctrica, previo tratamiento de las muestras haciendo cortes apropiados e inmersión durante 30 seg en N<sub>2</sub> líquido.

### Estabilidad de la emulsión de impregnación

La estabilidad de la emulsión de impregnación se fundamentó en las propiedades de dispersión de la luz, la cual está relacionada con el tamaño promedio de las gotas. Se utilizó el criterio de índice de estabilidad (R), a partir de medidas de absorbancia (A) a dos longitudes de onda: 800 y 400 nm ( $R = A_{800} / A_{400}$ )<sup>47</sup>. Las medidas se realizaron en un espectrofotómetro Thermospectonic Genesys 10UV. La muestra de emulsión recién preparada se diluyó con agua destilada en la proporción 99:1 (agua: emulsión) y se agitó durante 15' manualmente antes de la medida espectrofotométrica. La evaluación de la estabilidad de la emulsión se realizó durante 4 días de almacenamiento.

### Proceso de impregnación

Los ensayos de IV se realizaron en un sistema conformado por cámara de impregnación en vidrio, acoplada a través de mangueras sanitarias a un eyector, el cual proporcionó un vacío de 8,4" Hg (presión barométrica local = 25,4" Hg). Los frutos de uchuva y fresa, se impregnaron inicialmente con una disolución isotónica de sacarosa de 20 y 14 °Brix (DS20°, DS14°) respectivamente. Durante la 1ª etapa del proceso IV, las frutas fueron sometidas a vacío durante 10 minutos en la cámara de impregnación y en la 2ª etapa se restableció la presión atmosférica por 5 minutos más; a cada muestra impregnada se le determinaron los parámetros de impregnación: fracción volumétrica de impregnación, X (m<sup>3</sup> emulsión / m<sup>3</sup> fruta fresca); fracción másica de impregnación, X<sub>MHD</sub> (kg emulsión / kg fruta impregnada) y porosidad efectiva a la IV, ε (m<sup>3</sup> gas / m<sup>3</sup> fruta fresca) ( $\epsilon = X r / (r-1)$ ), donde  $r = P_{atm} / P_{vacío}$ . La valoración de X y X<sub>MHD</sub> se determinó a partir de las masas antes y después de la impregnación<sup>4</sup>, además se consideró que en el proceso de IV la deformación en las etapas a presión de vacío y atmosférica son despreciables<sup>48</sup>.

La composición de la emulsión de impregnación se determinó en el sistema de impregnación bajo las siguientes consideraciones: los niveles de vitamina E en los frutos frescos son despreciables, no existe degradación de la vitamina E durante el proceso de IV, la masa total del sistema fruta - disolución no cambia durante el proceso IV y la composición de la vitamina E en la disolución de impregnación y sus características fisicoquímicas se

mantienen constantes. Las ecuaciones 4 y 5, resultado del balance de materia, permiten determinar la fracción másica de la vitamina E en la emulsión de impregnación ( $Y_{Vit.E}$ ) ( $g_{Vit.E} / g_{emulsión}$ ) y la fracción másica de la vitamina E en la fruta impregnada,  $x_{Vit.E}^{IV}$  ( $g_{Vit.E} / g_{fruta\ impregnada}$ ).

$$Y_{Vit.E} = \frac{x_{Vit.E}^{IV} (\rho_{apm} + X\rho_{emulsión})}{X\rho_{emulsión}} \quad (4)$$

$$x_{Vit.E}^{IV} = \frac{100\% \text{ VDR}}{(100 + 100X \frac{\rho_{emulsión}}{\rho_{apm}})} \quad (5)$$

### Almacenamiento

Las muestras fortificadas fueron almacenadas a una temperatura de 4°C y envasadas en bolsas plásticas con multicapa de poliamida-polietileno marca ALICO S. A., con barrera al vapor de agua (< 15 g/m<sup>2</sup>/24hr/atm, T=38 °C), O<sub>2</sub> (60 cc/m<sup>2</sup>/24hr/atm, 23 °C), N<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub>. El envasado se realizó en condiciones atmosféricas (SV) y con aplicación de vacío (CV). Se evaluó la evolución de la estabilidad de las muestras en cuanto a la degradación del dl- $\alpha$ -tocoferol acetato y los cambios de color y textura. El contenido de dl- $\alpha$ -tocoferol acetato fue evaluado en las frutas frescas e impregnadas, durante un tiempo de almacenamientos de 15 días (uchuva) y 9 días (fresa); los atributos color y textura fueron evaluados cada 3 días.

### Extracción y cuantificación de CFA

El proceso de extracción fue descrito por Cortés, 2004<sup>49</sup>. La cuantificación de la vitamina E en las muestras frescas y fortificadas se determinó en un HPLC Agilent 1100. Condiciones de operación: columna Synergi 4  $\mu$ m Hydro-RP 80 (código 00G-4375-E0), dimensiones 250 x 4,6 mm ID., fase móvil (Acetonitrilo/metanol: 75/25), velocidad de flujo 2mL/min, método: Isocrático, temperatura: ambiente (25°C), detector: UV-visible a 280 nm. La recta de calibración se determinó a partir del estándar de referencia dl- $\alpha$ -tocoferol acetato 99,9 % (Supelco).

### Evaluación sensorial

La evaluación sensorial se realizó mediante pruebas descriptivas escalares para cada fruto, con el objetivo de cuantificar las diferencias sensoriales de los

atributos, introducidas por la emulsión de impregnación, respecto al fruto fresco (control). Las pruebas escalares fueron de nueve bloques<sup>50</sup>, donde el control fue posicionado en el parte central y los jueces evaluaron el grado de intensidad del atributo en comparación con el control, calificando la muestra en casillas más o menos alejadas del centro a la derecha o a la izquierda (calificación 1, 2, 3, 4 y -1, -2, -3, -4 respectivamente), donde los valores positivos representan una mayor intensidad en el atributo y los negativos una disminución del atributo con respecto al control. Los jueces podían ubicar su calificación en la misma casilla del control (calificación: 0). Los atributos evaluados fueron; color, sabor ácido, sabor dulce, sensación grasa, dureza, jugosidad y aceptación global.

La valoración de los atributos en los frutos fortificados con vitamina E fueron realizados por un panel de 10 jueces entrenados y por triplicado, en muestras recién impregnadas ( $t=0$ ) y en el tiempo de almacenamiento de 9 y 15 días para la fresa y la uchuva respectivamente. Las muestras fueron almacenadas con y sin vacío a una temperatura de 4°C y en bolsas plásticas multicapa de poliamida-poliétileno marca ALICO S. A., con barrera al vapor de agua ( $< 15 \text{ g/m}^2/24\text{hr/atm}$ ,  $T=38 \text{ }^\circ\text{C}$ ),  $\text{O}_2$  y  $\text{CO}_2$  ( $60 \text{ cc/m}^2/24\text{hr/atm}$ ,  $23 \text{ }^\circ\text{C}$ ) En todos los casos se realizaron un total de 30 evaluaciones por atributo; que es igual al número de respuestas mínimas que se consideran necesarias para tomar una decisión apropiada<sup>51</sup>.

### Análisis de datos

Los resultados fueron analizados a partir de ANOVA, utilizando el método LSD (mínimas diferencias significativas) como método de comparaciones múltiples, con un nivel de confianza del 95 % ( $\alpha=0,05$ ). El análisis de varianza fue realizado con el paquete estadístico STATGRAPHICS PLUS versión 5.1.

## Análisis y resultados

### Caracterización fisicoquímica de uchuva y fresa

Las Figura 1 y 2 presentan los valores medios con intervalos LSD (95%) de los parámetros % Humedad, °Brix, % acidez, pH y  $a_w$ , en los lotes de uchuva y fresa fresca (F1, F2, F3) y en las uchuvras y fresa recién impregnadas (IV-01, IV-02, IV-03).

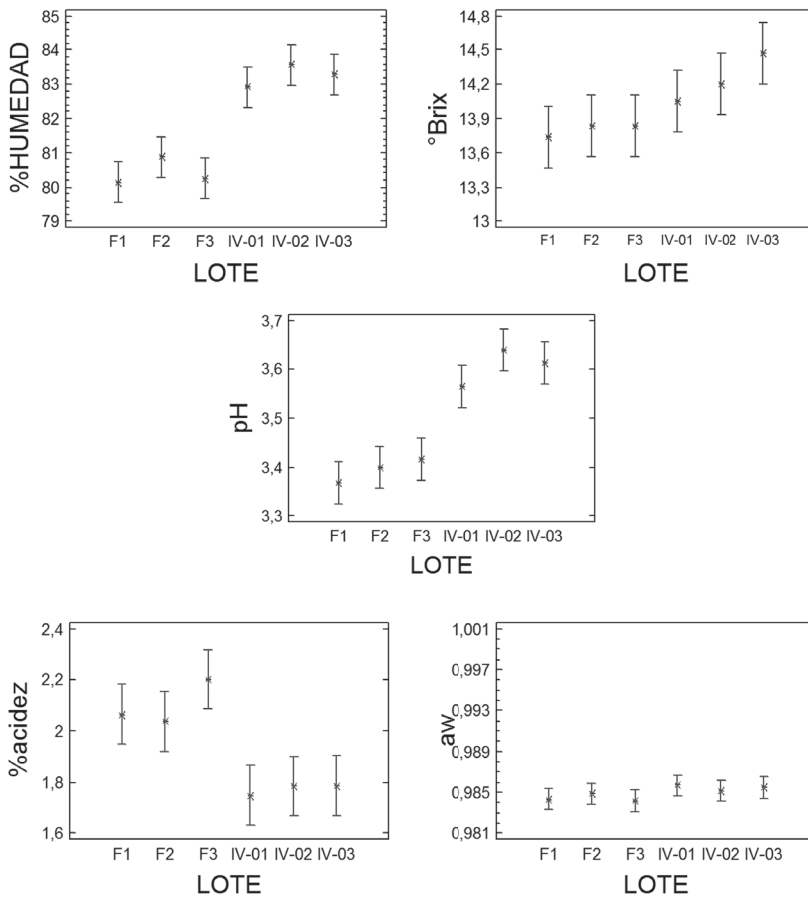


Figura 1. Valores medios con intervalos LSD (95%) de los parámetros de caracterización de los lotes de uchuvas frescas e impregnadas

Fuente: Elaboración propia

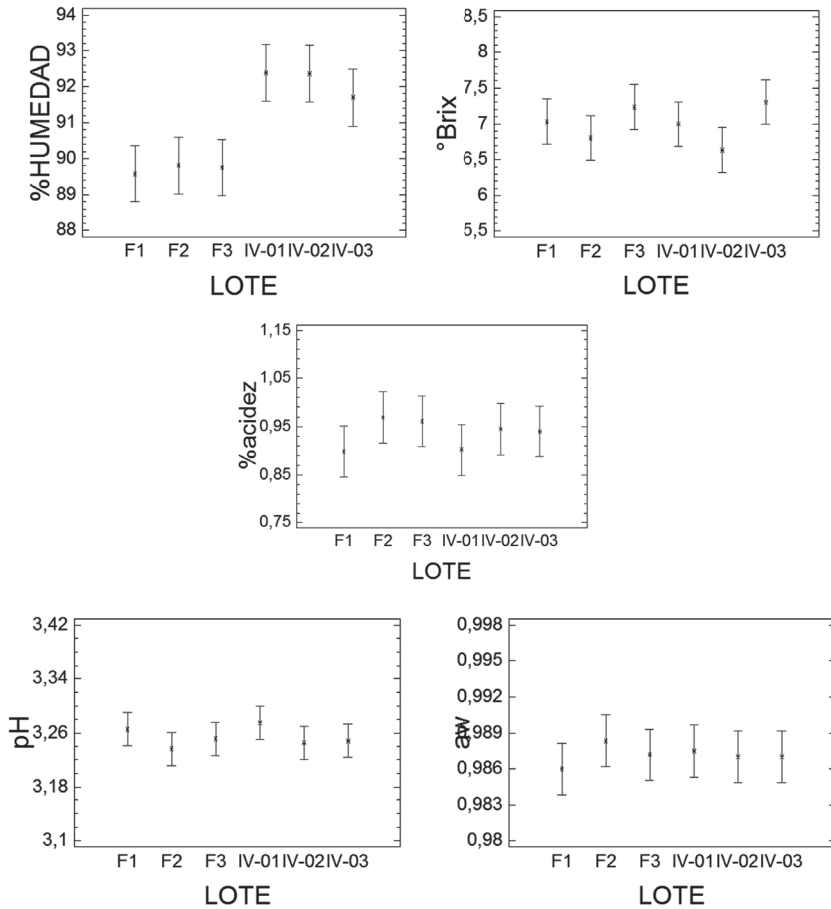


Figura 2. Valores medios con intervalos LSD (95%) de los parámetros de caracterización de los lotes de fresas.

Fuente: Elaboración propia

Para la uchuva, el ANOVA no presentó diferencias significativas por efecto de los lotes en los parámetros % humedad, °Brix, pH y % acidez, pero si por efecto del tratamiento de impregnación. El incremento del % humedad y del pH, la disminución del % acidez, por efecto del tratamiento se atribuye a la cantidad de emulsión incorporada en la estructura interna del fruto, la cual presenta en su formulación un contenido de agua y un % acidez del 79 y  $0,23 \pm 0,1\%$  respectivamente, lo cual causa un efecto de “dilución” en las muestras. Sin embargo los °Brix, presentan una tendencia ligeramente creciente, pero se considera que los mínimos cambios en este parámetro son absorbidos por la misma variabilidad de las muestras y en el caso de la  $a_w$ , el resultado es acorde con el criterio de impregnar a partir de una solución isotónica de sacarosa, para evitar la transferencia de masa por mecanismos diferentes al MHD<sup>52,53</sup>. Los valores promedios de los parámetros para la uchuva fresca e impregnada fueron respectivamente: % humedad ( $80,42 \pm 0,87$  y  $83,22 \pm 0,91$ ), °Brix ( $13,80 \pm 0,32$  y  $14,24 \pm 0,55$ ), % acidez ( $2,10 \pm 0,26$  y  $1,77 \pm 0,07$ ) y pH ( $3,39 \pm 0,06$  y  $3,61 \pm 0,09$ ).

En general los resultados obtenidos para la uchuva fresca revalidan lo reportado por algunos autores para un grado de madurez de 4 según especificaciones de color de la Norma técnica Colombiana: NTC 4580 (°Brix: 13,2 – 15,0, pH: 3,6 – 3,8, acidez: 1,6 – 2,2)<sup>54</sup> y coinciden en que los °Brix varían según el tiempo y condiciones de almacenamiento; para el caso de la uchuva impregnada, los valores del % humedad son correspondientes al aplicar el balance de materia al sistema de impregnación.

Para la fresa, El ANOVA no presenta diferencias significativas en el % humedad por efecto de los lotes, pero si por efecto del tratamiento de impregnación, esto debido a que la cantidad de emulsión incorporada en la estructura interna del fruto según su formulación tiene una composición de agua del 84,8 %. Los valores promedio de todas las muestras para la fruta fresca e impregnada son respectivamente:  $89,71 \pm 0,74$  y  $92,15 \pm 1,66$ . El resto de parámetros, no presentó diferencias significativas por efecto de los lotes ni por la impregnación, Los mínimos cambios son absorbidos por la misma variabilidad de las muestras y en el caso de la  $a_w$ , el resultado es acorde con el criterio de impregnar a partir de una solución isotónica de sacarosa, para evitar la transferencia de masa por mecanismos diferentes al MHD<sup>55,56</sup>.

Los resultados son coherentes con algunos autores que han caracterizado la fresa fresca en términos de propiedades fisicoquímicas como: humedad,  $a_w$ , acidez, °Brix, densidad aparente<sup>57,58</sup>, en frutas impregnadas con solución

isotónica de glucosa<sup>59</sup> y en frutas impregnadas con solución isotónica de sacarosa<sup>60</sup>.

### Diseño de la emulsión de impregnación

La composición teórica de vitamina E ( $Y_{vit.E}$ ) necesaria para la emulsión, fue determinada a partir valores preliminares de X por ensayos de impregnación con disoluciones isotónicas de sacarosa correspondiente a 20 °Brix para la uchuva y 14° Brix para la fresa y según la ecuación 1. Los valores de X preliminar,  $X^{IV}_{vit.E}$  y  $Y_{vit.E}$  fueron respectivamente:  $0,03240 \text{ m}^3_{DS20^\circ} / \text{m}^3_{\text{uchuva fresca}}$ ,  $0,00021 \text{ kg}_{vit.E} / \text{kg}_{\text{uchuva fresca impregnada}}$ ,  $0,006678 \text{ kg}_{vit.E} / \text{kg}_{\text{emulsión}}$  para la uchuva, y  $0,02570 \text{ m}^3_{DS14^\circ} / \text{m}^3_{\text{fresa fresca}}$ ,  $0,00021 \text{ kg}_{vit.E} / \text{kg}_{\text{fresa impregnada}}$ ,  $0,00759 \text{ kg}_{vit.E} / \text{kg}_{\text{emul}}$  para la fresa. La tabla 3 presenta las formulaciones de las emulsiones para la uchuva y la fresa.

Tabla 3. Formulaciones de las emulsiones de impregnación para las uchuvas y fresas

Formula de la emulsión	%	
	UCHUVA	FRESA
Sacarosa	20,00	14,00
Agua	78,95	84,83
Vitamina E	0,67	0,78
Tween 80	0,17	0,17
Span 60	0,16	0,16
NaCl	0,05	0,05

Fuente: Elaboración propia

### Estabilidad de la emulsión de impregnación

La figura 3 presenta la evolución de la emulsión de impregnación en términos del índice de estabilidad R con respecto al tiempo.

Se observa una tendencia de disminución hasta el día 2, a partir del cual R tiende a mantenerse, convergiendo a valores en un intervalo 0,21 y 0,29. Este comportamiento puede atribuirse a una reorganización en la distribución de tamaño de gota en la emulsión tendiendo a un valor de equilibrio relacionado con el tamaño óptimo de las micelas de tensoactivos, dada que la pequeña cantidad de fase oleosa podría ubicarse en el *core* lipófilo de las mismas.

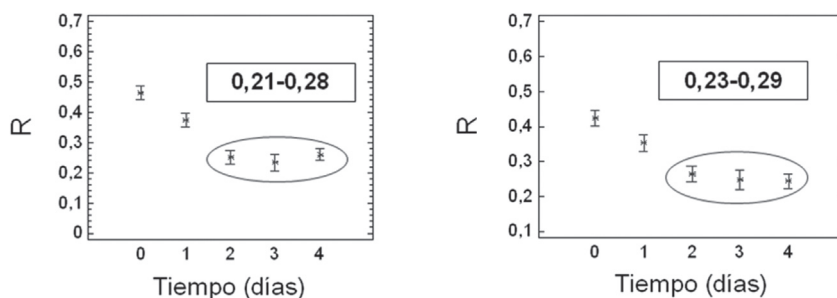


Figura 3. Evolución del índice de estabilidad R con respecto al tiempo en las emulsiones de impregnación para uchuva y fresa.

Fuente: Elaboración propia

La figura 4 representa una micrografía obtenida por SEM a 3000 aumentos, tomada en el área del pedúnculo de la uchuva impregnada. Se evidencia la presencia de la vitamina E en los espacios intercelulares del tejido en las proximidades internas del pedúnculo con un tamaño aproximado entre 2 y 3 micras. Este tamaño pequeño de partícula dispersa es correspondiente con los resultados obtenidos a partir del índice de estabilidad “R”. A menor tamaño de partícula menor es el índice de estabilidad R, que corresponde a una emulsión mas estable.

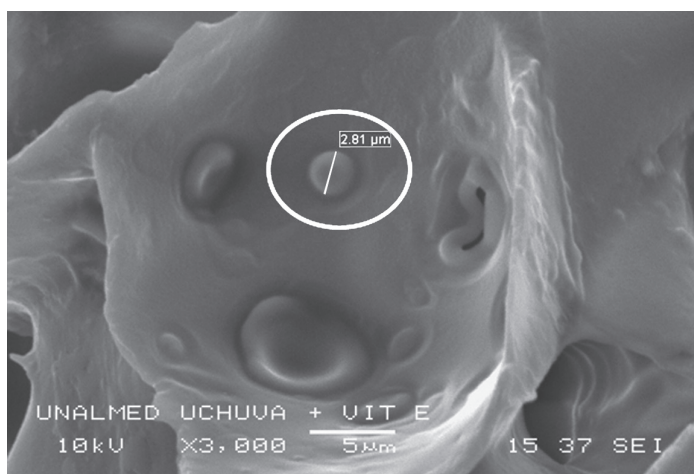


Figura 4. Micrografía del tejido de uchuva impregnada obtenida por SEM

Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, la fuerza iónica del medio juega un papel muy relevante en la estabilización por carga del sistema. Las cargas superficiales de las gotas se originan por la disociación de grupos ionizables (carboxilo, amino,...) del material de interfase o por absorción de iones desde la fase continua. En presencia de electrolitos disueltos en el medio continuo, alrededor de las partículas se forma una doble capa de iones o longitud de Debye ( $\kappa^{-1}$ ), constituida por una capa sencilla de contraiones de signo opuesto al de los grupos ionizables superficiales fuertemente adsorbida y una capa difusa de coiones repartida en la disolución próxima a la interfase. Desde el punto de vista práctico, pequeñas cantidades de electrolitos monovalentes como el utilizado en la emulsión (NaCl), favorece la estabilización del sistema coloidal por la formación de anchas dobles capas eléctricas sobre las partículas. La fuerza iónica del medio ( $I = \sum C_i Z_i^2$ ), calculada a partir de concentración de los iones con diferente carga ( $C_i$ ) y las cargas de los iones ( $Z_i$ ), obteniéndose para la concentración de NaCl un valor de  $I = 18 \times 10^{-3}$  (mol / L). El ancho de la doble capa eléctrica ( $\kappa^{-1} = 0,304 / I^{1/2}$ ), evaluada a partir de la fuerza iónica del medio fue de 2.2 nm, la cual representa un valor alto, similar al orden de la encontrada en los refrescos que es de 3 nm.<sup>61,62</sup>

### Caracterización de la respuesta a la impregnación

La figura 5 y 6 presenta los valores medios con intervalos LSD (95 %) de los parámetros de impregnación: X (%),  $X_{MHD}$  (%) y  $\varepsilon$  (%), para la uchuva con la DS (20°Brix) y para la fresa con la DS (14°) y la respuesta a los mismos parámetros con la emulsión de fortificación con vitamina E.

Se encontró que los parámetros X,  $X_{MHD}$  y  $\varepsilon$ , presentan diferencias significativas con respecto a los dos líquidos de impregnación, lo cual se explica por factores combinados de composición del líquido de impregnación, permeabilidad de la capa cérica superficial, el área y la porosidad del pedúnculo de la uchuva (punto de corte del capacho). Estos dos últimos factores se consideran los de mayor incidencia, ya que durante la experimentación se evidenció una mayor salida de aire en el interior de la estructura en el pedúnculo, lo cual es correspondiente también a una mayor incorporación de líquido de impregnación por esta misma vía; sin embargo la capa cérica no se comporta en forma impermeable ya que igualmente presenta una ligera salida de aire de su interior y así mismo habrá un ligero ingreso de líquido de impregnación. Debido a la complejidad de la matriz, y a la no existencia de una tendencia entre el tamaño del fruto y el área del pedúnculo, no fue posible cuantificar los niveles de ingreso por cada zona.

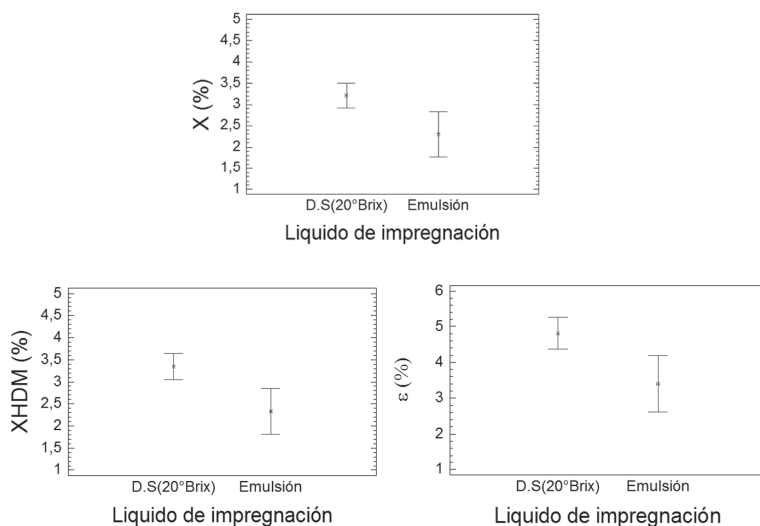


Figura 5. Valores medios con intervalos LSD (95%) de los parámetros: X (%),  $X_{MHD}$  (%) y  $\epsilon$  (%) en función del tratamiento de impregnación para la uchuva

Fuente: Elaboración propia

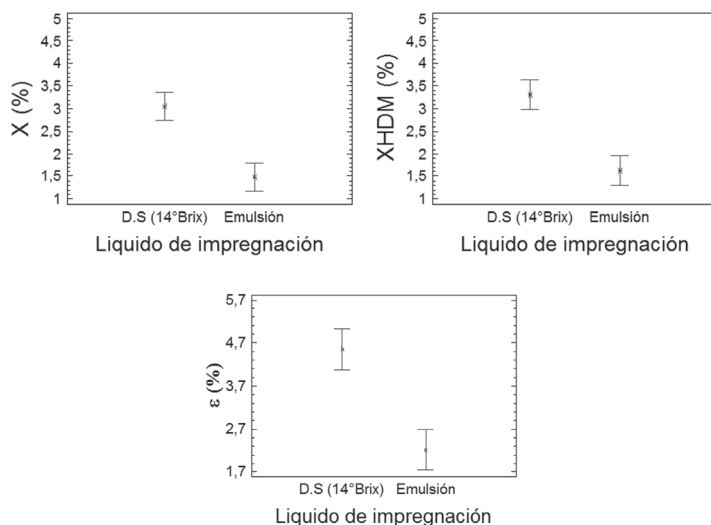


Figura 6. Valores medios con intervalos con intervalos LSD (95 %) de los parámetros: X (%),  $X_{MHD}$  (%) y porosidad eficaz (%) en función del tratamiento de impregnación para la fresa

Fuente: Elaboración propia

La figura 7, representa micrografías del tejido de uchuva fresca obtenidas por SEM a 100 aumentos (a) y 500 aumentos (b). La figura (a) muestra el tejido heterogéneo de la uchuva fresca, donde la película cerosa es más compacta (lado derecho) y el pedúnculo más poroso (lado izquierdo). La micrografía (b) a 500 aumentos revalida la mayor porosidad del pedúnculo y por donde ocurre la mayor impregnación.

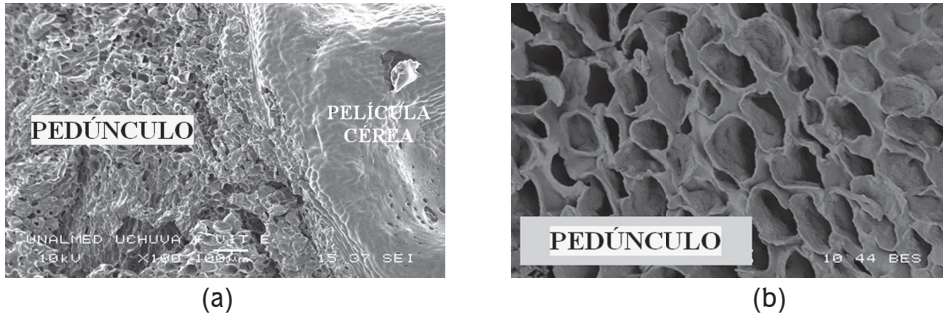


Figura 7. Micrografías del tejido de la uchuva fresca obtenidas por SEM

Fuente: Elaboración propia

Algunos trabajos de investigación reportan diferencias entre los parámetros de impregnación con las disoluciones preliminares y con las disoluciones o emulsiones de impregnación con los componentes fortificantes: hongo comestible *Pleurotus ostreatus* (disolución de NaCl 1% p/p y disolución de fortificación sacarosa -  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  + Selenio + vitamina C<sup>63</sup>, mango Tommy Atkins (disolución de sacarosa de 16°Brix y disolución de fortificación sacarosa -  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )<sup>64</sup>.

### Cuantificación y estabilidad de la vitamina E

El método de determinación analítica por HPLC de los componentes con actividad de vitamina E, identificó los tiempos de retención en: 11,27 y 12,94 min, para RRR- $\alpha$ -tocoferol (vitamina E natural) y dl- $\alpha$ -tocoferol acetato (vitamina E sintética) respectivamente. El resultado obtenido para la fresa fresca (F-F) como RRR-  $\alpha$ -tocoferol fue: 0,27 mg/100 g de fresa. En la uchuva fresca los valores registrados fueron insignificantes por lo que se consideraron despreciables.

La figura 8 presenta los valores medios con intervalos LSD (95%) de la concentración de vitamina E ( $C_{vit.E}$ ), expresados como mg dl- $\alpha$ -tocoferol acetato/100 g fruta fresca. El ANOVA no presentó diferencias significativas en ambas frutas por efecto del factor envasado (CV y SV), ni por el tiempo de almacenamiento, debido a la misma estabilidad de la vitamina E sintética y a la protección que ofrecen estas matrices al servir como medio de encapsulamiento de la vitamina E, ante los factores externos de degradación (oxidación, luz, temperatura, etc.)<sup>65</sup>. Para el análisis de la influencia del tiempo, la  $C_{vit.E}$  se evaluó sobre valores unificados a partir de los datos de las muestras IV-0, CV y SV, obteniéndose para los productos de uchuva y fresa, una concentración de:  $35,15 \pm 8,35$  y  $19,12 \pm 3,01$  mg de vitamina E sintética/100 g de fruta fresca.

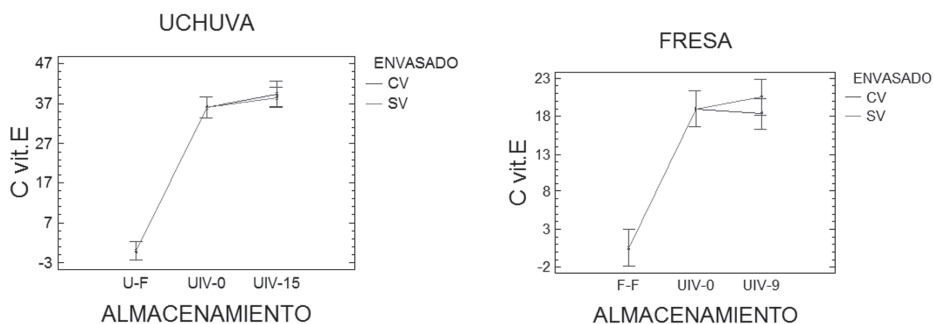


Figura 8. Concentración de vitamina E sintética/ 100 g fruta fresca en uchuva y fresa

Fuente: Elaboración propia

Estos valores reflejan la efectividad de la metodología de obtención de alimentos funcionales por ingeniería de matrices, aplicando la técnica de IV, en la fortificación de estas matrices alimentarias. La metodología ha sido aplicada en diferentes matrices alimentarias obteniéndose resultados satisfactorios<sup>66</sup>.

## Color

La figura 9 presenta los valores medios con intervalos LSD (95 %) de los parámetros de color para la uchuva, en términos de  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  durante el almacenamiento.

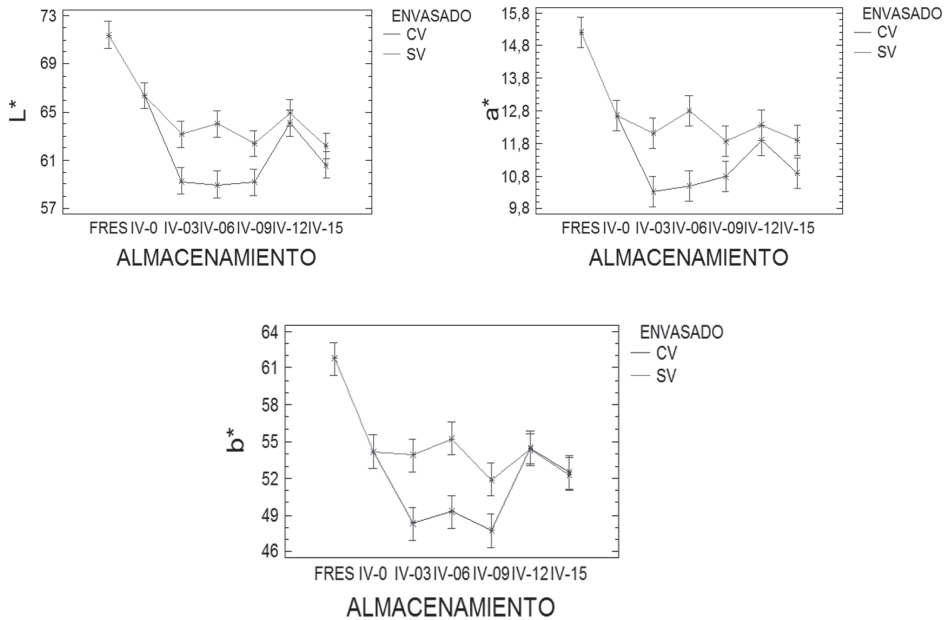


Figura 9. Evolución los parámetros de color  $L^*$ ,  $a^*$ ,  $b^*$  en uchuva fortificada con vitamina E en función del tiempo de almacenamiento a  $4^{\circ}\text{C}$ .

Fuente: Elaboración propia

El ANOVA reportó diferencias estadísticamente significativas en todos los parámetros de evaluación del color por efecto del proceso de impregnación (caso similar ocurre en la fresa). En general el comportamiento de los parámetros de color fueron similares, la presencia de la emulsión en los espacios intercelulares hace más homogéneo el índice de refracción, potenciando la absorción de la luz en la zona superficial, por lo que las muestras IV se observan más oscuras ( $< L^*$ ), la cual se acentúa entre los valores de 66 – 58 durante el almacenamiento para ambos empaques. Es importante resaltar que las muestras IV no presentan un color homogéneo debido a que solo en los espacios intercelulares reemplazados con emulsión se observa la muestra más oscura, principalmente alrededor del ápice en la uchuva y la fresa (figura 10).

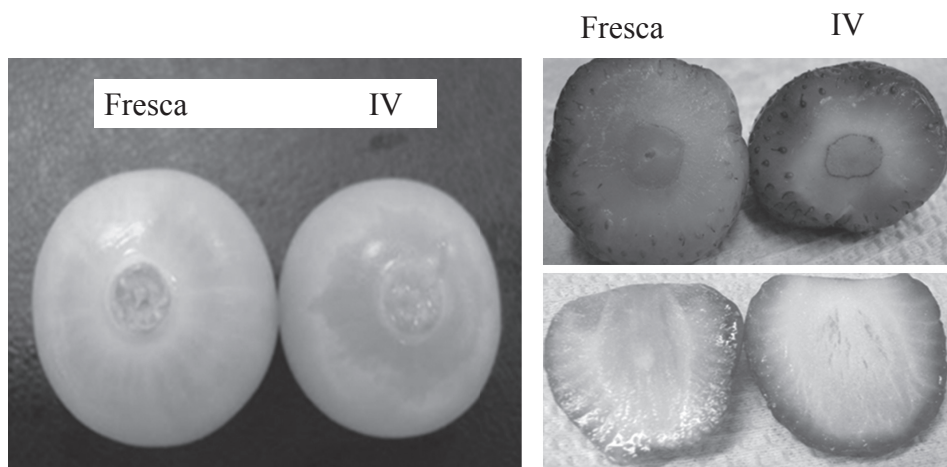


Figura 10. Muestras de uchuva y fresa frescas e impregnadas.

Fuente: Elaboración propia

Esto genera unos coeficientes de variación apreciables en las muestras IV. La disminución de las coordenadas de color  $a^*$  y  $b^*$ , se asocia principalmente al fenómeno de dilución de pigmentos rojos y amarillos y principalmente en los espacios intercelulares que ocupa la emulsión de impregnación. Un comportamiento similar ha sido reportado para diferentes frutas impregnadas: Manzana, papaya, kiwi, fresa, mango<sup>67,68,69</sup>.

## Textura

En la figura 11 se presenta una curva típica fuerza-distancia obtenida para las muestras de uchuvas y fresas (frescas e impregnadas). Se puede observar el punto donde la fuerza es máxima (Fr) que coincide con el punto en que la muestra se rompe a una distancia de ruptura (Dr). Este fruto presenta una relación esfuerzo-deformación lineal antes de la ruptura que refleja un comportamiento elástico de la película cerosa que protege el fruto. Posteriormente se presenta una zona donde la fuerza es prácticamente constante, que corresponde a la resistencia de la pulpa a la deformación.

El ANOVA presentó diferencias significativas en la fuerza media de la pulpa por efecto del tratamiento IV, y no hubo diferencia ni por el tiempo de almacenamiento ni con el envasado. Esta situación se atribuye a la solubilización del componente péctico de las paredes celulares que las hace más blandas. Los valores obtenidos de la fuerza media de la pulpa para las

uchuvas frescas e impregnadas fueron de  $2,72 \pm 0,32$  N y  $1,96 \pm 0,33$  respectivamente

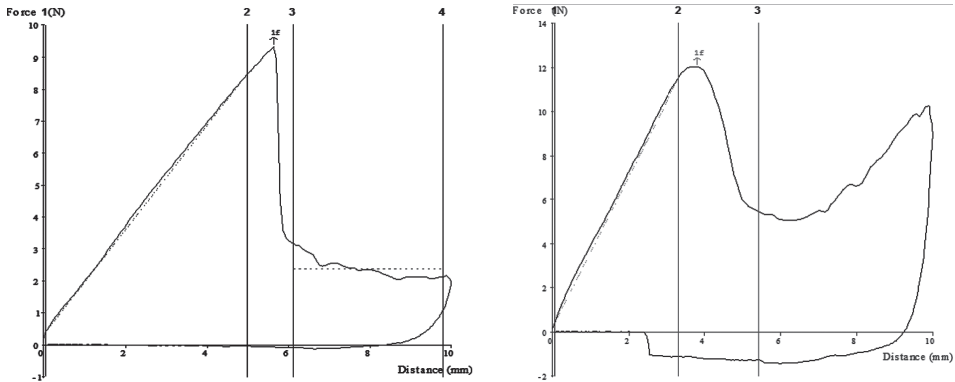


Figura 11. Curvas típica fuerza–distancia obtenida en el ensayo de punción en uchuva y fresa fresca.

Fuente: Elaboración propia

La figura 12 presentan los valores medios con intervalos LSD (95 %) de la relación  $Fr/Dr$  y la pendiente inicial ( $\epsilon^*$ ) para la uchuva fresca e impregnada durante el almacenamiento. El ANOVA presentó diferencias significativas por efecto del tratamiento de impregnación para  $Fr/Dr$  y no para  $\epsilon^*$ , sin embargo esta situación se presenta en un rango de variación muy pequeño ( $2,1 - 1,3$  N/mm) por lo que se considera atribuible a las características propias de la película cerosa del fruto. En las muestras envasadas SV, el tiempo de almacenamiento no influyó en ninguno de los parámetros, mientras que en las muestras CV si fue significativo, con una tendencia a disminuir principalmente a partir del día 9, este cambio puede estar asociado a la evolución de la maduración del fruto y a los cambios fisiológicos durante el almacenamiento, al ser un producto climatérico<sup>70</sup>.

## Análisis Sensorial

### Color de fresas y uchuvas impregnadas

Las figura 13 y 14 ilustran los resultados unificados de los jueces para las evaluaciones del color de las fresas y uchuvas impregnadas al vacío en

el tiempo cero (IV-0) y las impregnadas y envasadas con vacío: IV-9 (CV) y sin vacío IV-9 (SV) durante 9 días para la fresa y 15 días para la uchuva: IV-15 (CV) y IV-15 (SV).

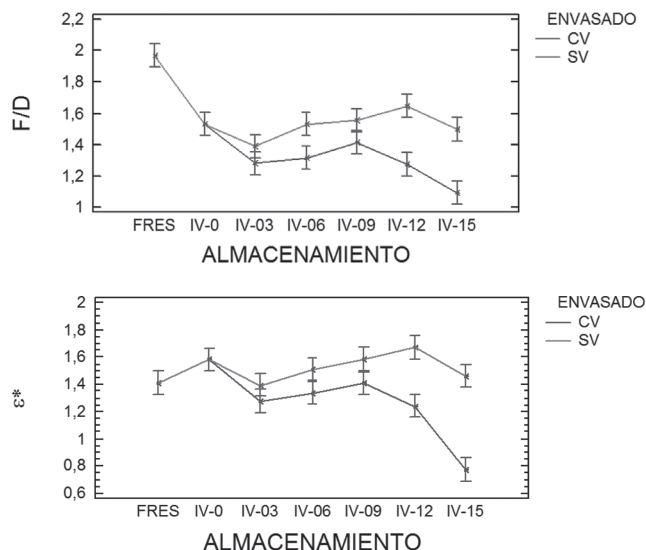


Figura 12. Valores medios e intervalos LSD (95 %) de la relación Fr / Dr y la pendiente inicial ( $\epsilon^*$ ) en uchuvas frescas y fortificadas con vitamina E en función del tiempo de almacenamiento a 4°C.

Fuente: Elaboración propia

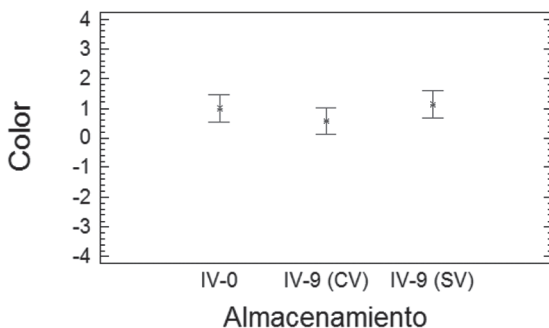


Figura 13. Valores medios con intervalos LSD (95%) de las puntuaciones de color para fresa impregnada en el tiempo 0 (IV-0) y almacenada 9 días con y sin vacío (IV-9 (CV) y IV-9 (SV)).

Fuente: Elaboración propia

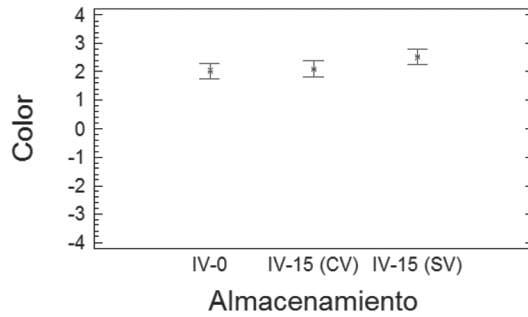


Figura 14. Valores medios con intervalos LSD (95%) de las puntuaciones de color para uchuva impregnada en el tiempo 0 (IV-0) y almacenada 15 días con y sin vacío (IV-15 (CV) y IV-15 (SV)).

Fuente: Elaboración propia

El ANOVA presentó diferencias significativas para la fresa y la uchuva debidas al factor juez, tanto para las muestras impregnadas en el tiempo cero como para las impregnadas y almacenadas con y sin vacío. Lo anterior debido a que la impregnación en el interior de los espacios intercelulares no se presenta en forma homogénea, lo que conduce a que exista una variabilidad de color en la superficie. La eliminación del gas del tejido durante el proceso de impregnación a vacío, implica una mayor homogeneidad en el índice de refracción de la luz, lo que hace que las muestra sean menos claras, aumentando la relación entre la cantidad de luz absorbida y la dispersada o reflejada<sup>71</sup>. Es importante resaltar que el 100% de los jueces identificó la falta de homogeneidad del color de las muestras. Por otro lado, independiente de las diferencias encontradas, los panelistas observaron las muestras de un color mas intenso que el control. Tanto en fresa como en uchuva el ANOVA no reporto diferencias estadísticamente significativas debidas al factor envasado y tiempo de almacenamiento. En general todos los tratamientos mostraron una mayor intensidad de color con respecto al control, es decir que la impregnación y el tiempo de almacenamiento combinados con el factor envasado aumentaron la intensidad del color de la fresa y uchuva, lo cual se explica porque la emulsión de impregnación continua con el tiempo difundándose a través de los espacios intercelulares de las matrices.

#### Sabor ácido de fresas y uchuvas impregnadas

En la Figura 15 se observan los valores medios con intervalos LSD (95%) de las puntuaciones unificadas para los diferentes jueces en las muestras de fresa evaluadas.

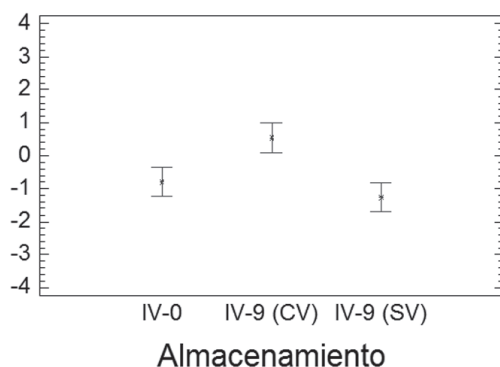


Figura 15. Valores medios con intervalos LSD (95%) de las puntuaciones de sabor ácido para fresa impregnada en el tiempo 0 (IV-0) y almacenada 9 días con y sin vacío (IV-9 (CV) y IV-9 (SV)).

Fuente: Elaboración propia

El ANOVA presentó diferencias estadísticas significativas con respecto a los jueces en las muestras almacenadas con y sin vacío, presentando en el envasado con vacío una tendencia ácida comparadas con el control. Este resultado puede ser consecuencia del desarrollo de procesos fermentativos que tienen lugar en ausencia de oxígeno. La inhibición de la respiración por ausencia de oxígeno se traduce en la inactivación de ciertas enzimas que tienen como sustratos algunos ácidos, con la consecuencia de un incremento en la concentración de ácidos libres (especialmente de ácido málico) en la fruta envasada 9 días con vacío<sup>72</sup>.

Entre las fresas impregnadas en el tiempo cero y las impregnadas y envasadas SV para 9 días de almacenamiento, no se presentaron diferencias significativas y además estas últimas mostraron una menor intensidad del sabor ácido con respecto al control. Lo anterior podría explicarse probablemente debido a la incorporación de la emulsión de impregnación que tiene como componentes mayoritarios agua y sacarosa, que provocan un efecto de "Dilución" de los ácidos presentes en la fruta. Además la disminución en la intensidad del sabor ácido para las fresas almacenadas durante 9 días y envasadas SV, podría explicarse porque durante este periodo continúan todos sus procesos metabólicos en donde hay consumo de ácidos orgánicos, especialmente en el ciclo de los ácidos tricarboxílicos, además algunos de estos compuestos pueden estar involucrados en la producción de sustancias aromáticas o volátiles típicas del fruto maduro<sup>73</sup>.

La figura 16 muestra los resultados unificados de los jueces para las evaluaciones del sabor ácido de las uchuvas impregnadas al vacío en el tiempo cero y las impregnadas y envasadas con vacío y sin vacío para un tiempo de almacenamiento de 15 días.

El ANOVA presentó diferencias estadísticamente significativas en la evaluación del sabor ácido debidas al factor juez para las muestras impregnadas en el tiempo cero. Sin embargo no presentan diferencias significativas debidas al tiempo de almacenamiento ni entre los tipos de envasado.

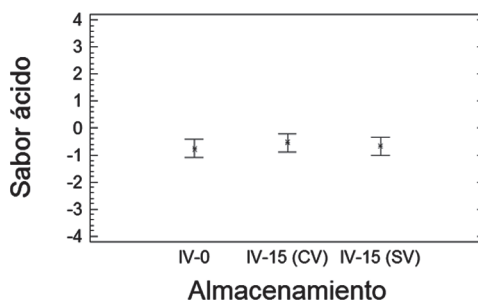


Figura 16. Valores medios con intervalos LSD (95%) de las puntuaciones de sabor ácido para uchuva impregnada en el tiempo 0 (IV-0) y almacenada 15 días con y sin vacío (IV-15 (CV) y IV-15 (SV)).

Fuente: Elaboración propia

En resumen se puede decir que los jueces percibieron los tres tratamientos iguales estadísticamente y de menor intensidad en el grado de acidez con respecto al control, lo cual podría atribuirse a la impregnación a vacío, que proporciona un incremento en el contenido de sólidos totales debido a la sacarosa y por tanto afecta a la relación dulce / ácido de la matriz. Esto también fue comprobado con la medida del porcentaje de acidez de las uchuvas frescas ( $2,1 \pm 0,26$  %) en relación a las impregnadas en el tiempo cero ( $1,77 \pm 0,07$  %).

#### Sabor dulce de fresas y uchuvas impregnadas

En las figuras 17 y 18 se presentan los valores medios con intervalos LSD (95%) de las evaluaciones sensoriales para los frutos de fresa y uchuva impregnados en el tiempo cero envasadas con vacío y sin vacío y almacenadas durante 9 días para fresa y 15 días para uchuva.

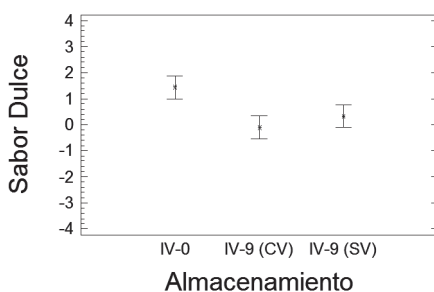


Figura 17. Valores medios con intervalos LSD (95%) de las puntuaciones de sabor dulce para fresa impregnada en el tiempo 0 (IV-0) y almacenada 9 días con y sin vacío (IV-9 (CV) y IV-9 (SV)).

Fuente: Elaboración propia

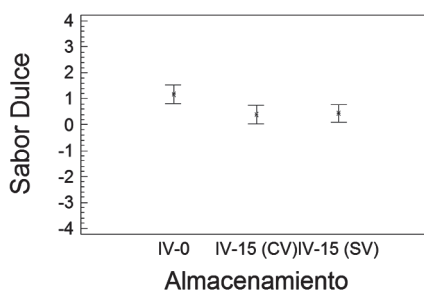


Figura 18. Valores medios con intervalos LSD (95%) de las puntuaciones de sabor dulce para uchuva impregnada en el tiempo 0 (IV-0) y almacenada 15 días con y sin vacío (IV-15 (CV) y IV-15 (SV)).

Fuente: Elaboración propia

El ANOVA mostró diferencias significativas entre las fresas y uchuvas impregnadas en el tiempo cero y el control, teniendo mayor aceptación para el atributo de dulzura las muestras impregnadas en el tiempo cero, incluso con respecto a los demás tratamientos. Lo anterior debido a la incorporación de la sacarosa presente en las emulsiones de impregnación. En general la evaluación sensorial para este atributo fue mayor para todos los tratamientos con respecto al control, situación que también puede ser atribuida a la concentración de los solutos por evapotranspiración en los frutos y por actividades enzimáticas de amilasas que puedan desdoblar algunos restos de sustrato en disacáridos y monosacáridos más simples<sup>74</sup>.

### Sensación grasa de fresas y uchuvas impregnadas

Las figuras 19 y 20 presentan los valores medios con intervalos LSD (95%) de las evaluaciones sensoriales para los frutos de fresa y uchuva impregnados en el tiempo cero envasados con vacío y sin vacío y almacenados durante 9 días para fresa y 15 días para uchuva.

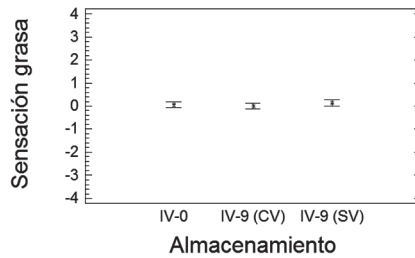


Figura 19. Valores medios con intervalos LSD (95%) de las puntuaciones de sensación grasa para fresa impregnada en el tiempo 0 (IV-0) y almacenada 9 días con y sin vacío (IV-9 (CV) y IV-9 (SV)).

Fuente: Elaboración propia

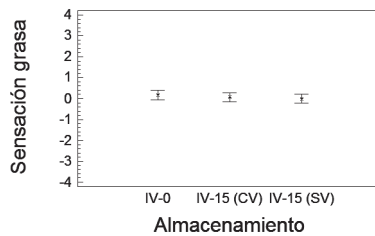


Figura 20. Valores medios con intervalos LSD (95%) de las puntuaciones de sensación grasa para uchuva impregnada en el tiempo 0 (IV-0) y almacenada 15 días con y sin vacío (IV-15 (CV) y IV-15 (SV)).

Fuente: Elaboración propia

La evaluación de la sensación grasa en la boca, a causa de la incorporación de vitamina E, no mostró diferencias significativas debidas al tratamiento de impregnación, envasado y tiempo de almacenamiento, lo que indica que los jueces no aprecian ningún efecto en las muestras fortificadas con vitamina E comparadas con el control. Lo anterior debido a que la concentración de vitamina E en la emulsión de impregnación es

tan pequeña que no alcanza a ser percibida en la evaluación sensorial. La interacción de la vitamina E con los frutos es estabilizada por la acción emulsificante de los tensoactivos utilizados, por lo tanto su distribución es totalmente homogénea.

#### Dureza de fresas y uchuvas impregnadas

En las figuras 21 y 22 se presentan los valores medios con intervalos LSD (95%) de las evaluaciones sensoriales para los frutos de fresa y uchuva impregnados en el tiempo cero envasadas con vacío y sin vacío y almacenadas durante 9 días para fresa y 15 días para uchuva.

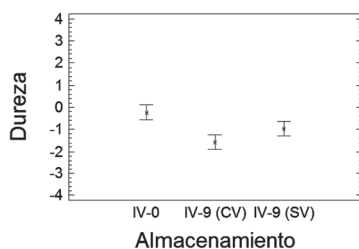


Figura 21. Valores medios con intervalos LSD (95%) de las puntuaciones de dureza para fresa impregnada en el tiempo 0 (IV-0) y almacenada 9 días con y sin vacío (IV-9 (CV) y IV-9 (SV)).

Fuente: Elaboración propia

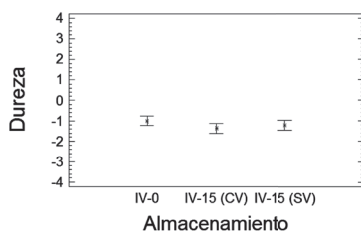


Figura 22. Valores medios con intervalos LSD (95%) de las puntuaciones de sensación grasa para uchuva impregnada en el tiempo 0 (IV-0) y almacenada 15 días con y sin vacío (IV-15 (CV) y IV-15 (SV)).

Fuente: Elaboración propia

Todos los tratamientos para fresa y uchuva presentaron una menor dureza con respecto al control. Para el tiempo cero la firmeza es mayor con respecto los demás tratamientos tanto en fresa como en uchuva, esto de-

bido principalmente a que durante el almacenamiento se presenta pérdida de turgencia de las células, ruptura de conexiones intercelulares por disolución de la lamina media de la pared celular y por hidrólisis debidas a las acciones enzimáticas sobre compuestos pécticos y amiláceos<sup>75</sup>.

### Jugosidad de fresas y uchuvas impregnadas

En las figuras 23 y 24 se presentan los valores medios con intervalos LSD (95%) de las evaluaciones sensoriales para los frutos de fresa y uchuva impregnados en el tiempo cero envasadas con vacío y sin vacío y almacenadas durante 9 días para fresa y 15 días para uchuva.

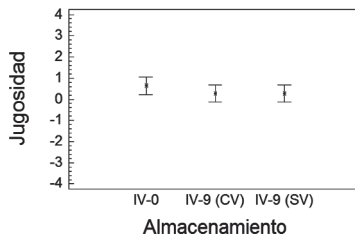


Figura 23. Valores medios con intervalos LSD (95%) de las puntuaciones de jugosidad para fresa recién impregnada 0 (IV-0) y almacenada 9 días con y sin vacío (IV-9 (CV) y IV-9 (SV)).

Fuente: Elaboración propia

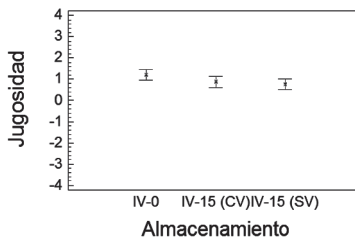


Figura 24. Valores medios con intervalos LSD (95%) de las puntuaciones de jugosidad para uchuva impregnada en el tiempo 0 (IV-0) y almacenada 15 días con y sin vacío (IV-15 (CV) y IV-15 (SV)).

Fuente: Elaboración propia

En el análisis del atributo jugosidad, los jueces evaluaron la percepción de la fase líquida por las papilas gustativas al masticar la muestra, encontrando diferencias significativas de las muestras comparadas con el patrón.

Entre los tratamientos no se presentaron diferencias estadísticamente significativas. Las muestras impregnadas son evaluadas como más jugosas, esto puede deberse a la ausencia de fase gaseosa en ambas muestras y la presencia de la emulsión de impregnación en los espacios intercelulares<sup>76</sup>.

#### Acceptación Global de fresas y uchuvas impregnadas

En las figuras 25 y 26 se presentan los valores medios con intervalos LSD (95%) de las evaluaciones sensoriales para los frutos de fresa y uchuva impregnados en el tiempo cero envasados con vacío y sin vacío y almacenados durante 9 días para fresa y 15 días para uchuva.

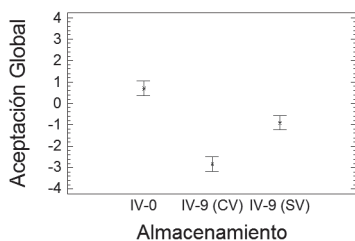


Figura 25. Valores medios con intervalos LSD (95%) de las puntuaciones de aceptación global para fresa impregnada en el tiempo 0 (IV-0) y almacenada 9 días con y sin vacío (IV-9 (CV) y IV-9 (SV)).

Fuente: Elaboración propia

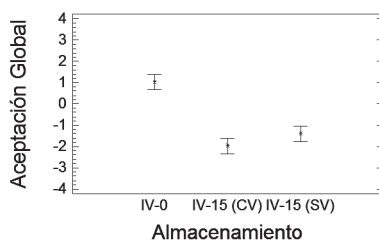


Figura 26. Valores medios con intervalos LSD (95%) de las puntuaciones de aceptación global para uchuva impregnada en el tiempo 0 (IV-0) y almacenada 15 días con y sin vacío (IV-15 (CV) y IV-15 (SV)).

Fuente: Elaboración propia

En general, la calidad de los productos evaluados en el tiempo cero presentaron mejor aceptación con respecto al control y a los demás tra-

tamientos, lo anterior debido a que los frutos impregnados exhibieron atributos de calidad similares a la fruta fresca en términos de: dulzura, acidez y firmeza, con características de madurez o punto de sazón propio para el consumo<sup>77</sup>. Los tratamientos de los frutos envasados y almacenados presentaron las características típicas de productos en sobremaduración lo cual fue evaluado negativamente por los jueces<sup>78</sup>.

## Conclusiones

- La emulsión de fortificación utilizada de acuerdo al comportamiento observado en el índice de estabilidad “R”, garantiza una buena estabilidad.
- La respuesta a la impregnación y los niveles de fortificación están principalmente afectados por la porosidad y el área del pedúnculo de la uchuva; alcanzando niveles de ingesta de  $117,1 \pm 27,8$  %VDR/100 g uchuva fresca. Para la fresas se alcanzaron niveles de  $63,7 \pm 10,0$  %VDR/100 g fresa fresca con un tiempo de vida útil de equivalente a 9 días. El tipo de envasado, ni el tiempo no fueron influyentes en los niveles de la vitamina.
- El color estuvo afectado por el tratamiento IV, observándose las muestras más oscura y con un grado de variabilidad causado por la distribución heterogénea de la emulsión de impregnación en los espacios intercelulares. Por otro lado las tonalidades rojas y amarillas estuvieron afectadas por el efecto de dilución de los pigmentos por la fase acuosa de la emulsión de impregnación.
- La firmeza de las frutas, estuvo afectadas por el tratamiento IV (menos duras), mientras que las variaciones con respecto al tiempo de almacenamiento y el tipo de envasado se consideraron más por variaciones propias del fruto fresco. El tiempo de vida útil se fijó en 15 días para la uchuva y 9 días para la fresa, de acuerdo a valoraciones del color, textura y estabilidad de la vitamina E en la matriz impregnada.
- Del estudio realizado se concluye que los tratamientos de impregnación con la emulsión, mejoran la calidad sensorial de las uchuvas y las fresas recién impregnadas, en términos de sabor y aceptación global. Estas muestras fueron evaluadas como más jugosas, más dulces y menos acidas que las muestras frescas. Además no se evidencia sensación grasa por efecto de la vitamina E de la emulsión.

### Referencias bibliográficas

1. SCHAEFER, Sandra; *et al.* Polyphenolic apple juice extracts and their major constituents reduce oxidative damage in human colon cell lines. En: Molecular Nutrition & Food Research. 2006. Vol. 50, no. p. 24–33.
2. ZHANG, Yanjun; *et al.* Isolation and identification of strawberry phenolics with antioxidant and human cancer cell antiproliferative properties. En: J. Agric. Food Chem. 2008; Vol. 56, no.1. p. 670–675.
3. ZHANG, Yanjun; VAREED, Shaiju K. & NAIR, Muraleedharan G. Human tumor cell growth inhibition by nontoxic anthocyanidins, the pigments in fruits and vegetables. En: Life Sci. 2005. Vol. 76, no. 13. p. 1465–1472
4. FITO, Pedro. Modelling of vacuum osmotic dehydration of foods. En: Journal of Food Engineering. 1994. Vol. 22. p. 313-328.
5. FITO, Pedro & PASTOR, R. On some diffusional mechanism occurring Vacuum Osmotic Dehydration (VOD). En: Journal of Food Engineering, 1994. Vol. 21. p. 513-519.
6. CHIRALT, Amparo; *et al.* Vacuum impregnation: a tool in minimally processing of foods. En: Processing of Foods: Quality Optimization and Process Assessment. Eds: F.A.R. Oliveira y J.C. Oliveira. Boca Ratón: CRC Press, 1999. p. 341-356.
7. CORTÉS RODRÍGUEZ, Misael. Desarrollo de productos de manzana deshidratados enriquecidos con vitamina E. Valencia (España), 2003. , Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia.
8. MEJÍA, Ana Gabriela. Exportación de la uchuva a la Unión Europea y a otros países. En: Avances en cultivo, poscosecha y exportación de la uchuva *Physalis peruviana L.* En Colombia.. En: Exportaciones de la uchuva a la Unión europea y a otros países (eds). Bogotá: Editorial Universidad Nacional de Colombia, 2005. p 131-145.
9. WU, S.; *et al.* Supercritical carbon dioxide extract exhibits enhanced antioxidant and anti-inflammatory activities of *Physalis peruviana*. En: J. Ethnopharmacol. 2006. Vol. 108, no. 3. p. 407–413.
10. COLOMBIA. INSTITUTO COLOMBIANO DE BIENESTAR FAMILIAR.. Tabla de Composición de Alimentos Colombianos. Bogotá: El Instituto, 1992. p. 58.
11. GUTIÉRREZ, Tania; HOYOS, Olga & PÁEZ, Martha. Determinación del contenido de ácido ascórbico en uchuva (*Physalis peruviana L.*), por cromatografía líquida de alta resolución (HPLC). En: Revista de la Facultad de Ciencias Agropecuarias. 2007. Vol. 5, no. 1. p. 70-79.

12. COLOMBIA INSTITUTO COLOMBIANO DE BIENESTAR FAMILIAR. Op. Cit. p. 58.
13. WU, S.; *et al*, Op. Cit. p.407–413
14. GUTIÉRREZ, Tania; HOYOS, Olga & PÁEZ, Martha; Op. Cit. p.70-79
15. BELLO, J. L. & SANTOS, A. Imagen del fresón en el consumidor. México: Especial Huelva, 1990. p. 27–29.
16. PINTO, Marcia da Silva; LAJOLO, Franco Maria & GENOVESE, Maria Inés.. Bioactive compounds and quantification of total ellagic acid in strawberries (*Fragaria x ananassa* Duch.). En: Food Chemistry. 2008. Vol. 107. p. 1629–1635.
17. BELLO, J. L. & SANTOS, A. Op. Cit. p.27–29
18. PINTO, M., LAJOLO, M. & GENOVESE, M. Op. Cit. p. 1629–1635.
19. BELLO, J. L. & SANTOS, A. Op. Cit. p.27–29
20. BEATTIE, Julie ; CROZIER, Alan & DUTHIE, Garry. Potential health benefits of berries. En: Current Nutrition and Food Science. 2005, Vol. 1, p. 71–86.
21. DIPLOCK, A. T.; *et al* Scientific concepts of functional foods in Europe: Consensus document. British Journal of Nutrition. 1999. Vol. 81, Suppl. 1. p. 1–27.
22. MAZZA, G. Alimentos funcionales: aspectos bioquímicos y de procesado. Zaragoza. España: Editorial Acribia, 2000. 457 p.
23. ALVÍDREZ, Alicia; GONZÁLEZ MARTÍNEZ, Blanca Edelia & JIMÉNEZ, Zacarías.. Tendencias en la producción de alimentos: alimentos funcionales. En: Revista salud pública y Nutrición. Julio-Septiembre 2002. Vol. 3, no. 3. p. 576-587.
24. MAZZA, G. Op. Cit. 457 p.
25. DIPLOCK, A. T.; *et al*. Op. Cit. p. 1-27.
26. GARCÍA, Andrea. Desarrollo de hongos comestibles *Pleurotus ostreatus* mínimamente procesados fortificados con Calcio, Selenio y vitamina C, por aplicación de la técnica de impregnación al vacío. Bogotá, 2007. Proyecto de grado. Ingeniería de Alimentos. Universidad Jorge Tadeo Lozano.
27. CORTÉS RODRÍGUEZ, Misael; GUARDIOLA, LUÍS FERNANDO & PACHECO, Roger. Aplicación de la ingeniería de matrices en la fortificación de mango (var. tommy atkins) con calcio. En: Dyna. Noviembre de 2007. Vol. 74, no. 153. p. 19-26.
28. BETORET, N.; *et al*. Development of Probiotic-enriched Dried Fruits by Vacuum Impregnation. En: Journal of Food Engineering. 2003. Vol. 56 no. 2-3. p. 273-277.

29. GARCÍA, A. Op. Cit.
30. SAYAZO, A. 2007. Vitamina E y aceites vegetales. En: Grasas y aceites. Enero-Marzo 2007. Vol. 58, no. 1. P. 74-86.
31. ZHENG, Wei; *et al.* Retinol, antioxidant vitamins, and cancer of the upper digestive tract in a prospective cohort study of postmenopausal women. En: Am. J. Epidemiol. 1995. Vol. 142, no. 9. p. 955-960.
32. VIRTAMO, Jarmo; *et al.* Effect of vitamin E and betacarotene on the incidence of primary non fatal myocardial infarction and fatal coronary heart disease. En: Arch Interh Med. March 1998. Vol. 158, no. 6. p. 668-675.
33. HEINONEN, Olli; ALBANES, Demetrius & VIRTAMO, Jarmo.. Prostate cancer and supplementation with  $\alpha$ -tocopherol and  $\beta$ -carotene: incidence and mortality in a controlled trial. En: J. Natl. Cancer Inst., 1998. Vol. 90. P. 440-446.
34. MEYDANI, S. N.; *et al.* Vitamin E supplementation and in vivo immune response in healthy elderly subjects. A randomized controlled trial. En: F Am. Med. Ass. 1997. Vol. 277. p. 1380-1386.
35. FITO, P.; Op. Cit. p. 313-328.
36. FITO, P. & PASTOR.; Op. Cit. p.513-519.
37. FITO, Pedro; *et al.* Coupling of Hydrodynamic Mechanism and Deformation-Relaxion Phenomena During Vacuum Treatments in Solid Porous Food-Liquid Systems. En: Journal of Food Engineering. 1996. Vol. 27. p. 229-240.
38. CHIRALT, Amparo; *et al.*, Op. Cit. p. 341-356.
39. FITO, Pedro & PASTOR. Op. Cit. p.513-519
40. FITO, Pedro; Op. Cit. p. 313-328.
41. CHIRALT, Amparo; *et al.*, Op. Cit. p. 341-356.
42. MARTÍNEZ-MONZÓ, Javier. Cambios físico-químicos en manzanas Granny Smith asociados a la impregnación a vacío. Aplicaciones en congelación. Valencia (España), 1998. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia.
43. CORTÉS, Misael. Op. Cit
44. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Fresa variedad Chandler: especificaciones técnicas. Bogotá: ICONTEC, 1997. 14 p. (NTC 4103)
45. AOAC. Official Methods of analysis. 13<sup>th</sup> Edition. Washington, D.C.: Association of Official Analytical Chemists, 1980.
46. AOAC Official Methods of analysis. 15<sup>th</sup> Edition. Washington, D.C.: Association of Official Analytical Chemists, 1990.

47. KAUFMAN, V. R. & GARTI, N. Spectral Absorption for Determination of ease of Formation and Stability of oil in water emulsions. En: J Dispersion Science and Technology. 1981. Vol. 2, no. 4. p. 475-490.
48. FITO, Pedro; Op. Cit. p. 313-328.
49. CORTÉS, Misael. Op. Cit
50. MEILGAAR, Morten; CIVILLE, Gail Vance & Carr, B. Thomas. Sensory Evaluation techniques. 3<sup>th</sup> edition. Washington D.C.: CRS PRESS LLC. 1999. 416 p.
51. IBAÑEZ, F. C. y BARCINA, Y. Análisis sensorial de alimentos. Métodos y aplicaciones. Barcelona: Springer Ibérica, 2001. 179 p.
52. BETORET, N.; Op. Cit. p. 273-277
53. FITO, Pedro y CHIRALT, Amparo; Op. Cit. p.189-204.
54. ALVARADO, Paola Andrea; VERDUGO, Carlos Andrés y FISHER, Gerhard. Efecto de un tratamiento de frío (a 1,5° C) y la humedad relativa sobre las características físico-químicas de frutos de uchuva *Physalis peruviana* L. durante el posterior transporte y almacenamiento. En: Agronomía Colombiana. 2004. Vol. 22, no. 2. p. 147-159
55. FITO, Pedro; Op. Cit. p. 313-328.
56. FITO, Pedro y CHIRALT, Amparo; Op. Cit. p.189-204.
57. ALMENAR ROSALENY, Eva María. Envasado activo de fresas silvestres. Valencia (España), 2005. 271 p. Tesis Doctoral. Universitat de València. Departament de Medicina Preventiva, Salut Pública, Bromatologia, Toxicologia i Medicina Legal
58. GIRALDO, German. El efecto del tratamiento de impregnación a vacío en la respiración de frutas (manzana, fresa, melocotón y sandía) mínimamente procesadas. En: Vitae. 2006. Vol. 13, no. 2. p. 21-25
59. ALVARADO, Paola Andrea; VERDUGO, Carlos Andrés y FISHER, Gerhard.; Op. Cit. p. 147-159.
60. FITO, Pedro; *et al.*; Op. Cit. P. 175-183.
61. DICKINSON, E.; Op. Cit. p. 175-199, 1992.
62. LARSSON, Kare & FRIBERG, Stig. Food Emulsions. En Surface Forces in Emulsions, 2<sup>a</sup> edition. New York : Marcel Dekker Inc, 1990. p. 41-96 Food science and technology series
63. GARCÍA, A. Op. Cit
64. CORTÉS, M. ; GUARDIOLA, L. & PACHECO R. Op. Cit. p. 19-26.
65. CORTÉS, M. Op. Cit

66. GARCÍA, A. Op. Cit
67. FITO, Pedro y CHIRALT, Amparo. Op. Cit. p.189-204.
68. ALZAMORA, S. M. & GERSCHENSON, L. N. Effect of water activity depression on textural characteristics of minimally processed fruit. In: New Frontier in Food Engineering. En: Proceedings of the 5th Conference of Food Engineering. Barbosa-Canovas, G.V.; Lombardo,S.; Narsimhan, G.; Okos, M.R, eds. New York: AICHE, 1997. p. 72-75.
69. IGUAL, M.; *et al.* Influence of vacuum impregnation on respiration rate, mechanical and optical properties of cut persimmon. En: Journal of Food Engineering. 2008. Vol. 86, no. 3. p. 315–323.
70. NOVOA, R.; *et al.* La madurez del fruto y el secado del cáliz influyen en el comportamiento poscosecha de la uchuva, almacenada a 12 °C (*Physalis peruviana* L.). En: Agronomía Colombiana. 2006. Vol. 24, no. 1 p. 77-86.
71. GILABERT PÉREZ, Eduardo. Medida del color. En: Interacción de la radiación con la materia. Valencia: Editorial Universidad Politécnica de Valencia, 2002. 464 p.
72. SALISBURY, Frank & ROSS, Cleon. Fisiología vegetal. , México: Iberoamérica, 1992. 759 p.
73. TAIZ, Lincoln & ZEIGER, Eduardo. Plant physiology. Sunderland, Massachusetts : Sinauer Associates Inc., 2002. 690 p.
74. FENNEMA, Owen. Química de los Alimentos. 2ª edición. Editorial Acribia S.A., 2000. p. 633-734.
75. AZCÓN-BIETO, Joaquin & TALÓN, Manuel. Fundamentos de fisiología vegetal. España: McGraw Hill, 2003. 522 p.
76. FITO, Pedro, CHIRALT, Amparo.; Op. Cit. p.189-204.
77. AZCÓN-BIETO, Joaquin & TALÓN, Manuel. Op. Cit. p. 522.
78. VILLAMIZAR, Fanny. Manejo tecnológico poscosecha de frutas y hortalizas: manual de prácticas. Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia - Facultad de Ingeniería, 2001. 130 p.



# Seis sigma: un enfoque teórico y aplicado en el ámbito empresarial basándose en información científica\*

Rodrigo Andrés Gómez Montoya\*\*

Santiago Barrera Rendón \*\*\*

## Resumen

El Seis Sigma es una filosofía de la calidad que permite reducir la variación en los procesos y productos e impactar la satisfacción de los clientes. **Objetivo.** Elaborar el estado del arte y las tendencias del Seis Sigma respecto a sus metodologías, enfoques de utilización, beneficios, y factores críticos de éxito y fracaso que faciliten su implementación. **Metodología.** Revisión y análisis de información secundaria científica que permita elaborar el estado del arte y las tendencias. **Conclusión.** Se identifica la importancia de gestión por procesos, la cultura organizacional, la utilización de técnicas estadísticas y el empleo de un programa o metodología planificada para la adecuada implementación del Seis Sigma en las empresas como herramienta para reducir costos, aumentar la satisfacción de las necesidades de los clientes y crear una ventaja competitiva desde el mejoramiento continuo de las operaciones, lo cual puede considerarse como una capacidad difícil de imitar.

**Palabras clave:** Metodología Seis Sigma, diseño de Seis Sigma, TQM (gestión total de la calidad), la mejora de procesos, proyectos de Six Sigma, gestión de la calidad.

---

\* Proyecto financiado por el Fondo para el Desarrollo de la Investigación de la Corporación Universitaria Lasallista: Elaboración de una metodología de apoyo para el diseño o mejoramiento de las operaciones y recursos de la gestión del almacén de productos terminados utilizando Seis Sigma y diseño de experimentos, 201.

\*\* MSc Ingeniero Administrador. Ingeniero Industrial. Docente Ingeniería Industrial Corporación Universitaria Lasallista y Docente logística - DFI Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid.

\*\*\* Estudiante Ingeniería Industrial, Corporación Universitaria Lasallista.

## Six sigma: a theoretical focus applied in companies with a scientific information basis

### Abstract

Six Sigma is a quality philosophy that allows a reduction on the variation of the processes and products, and an impact on the clients' satisfaction. **Objective.** To elaborate the state of the art and the trends of Six Sigma concerning its methodologies, focuses for the use, benefits and the critical failure and success factors that facilitate its implementation. **Methodology.** Revision and analysis of secondary scientific information, considered useful for making the state of the art and for establishing the trends. **Conclusion.** The importance of process management is identified, and so are the organizational culture, the use of statistical techniques and the programs or planning methods to implement Six Sigma in companies as a tool to reduce costs, improve the satisfaction level, of clients and create a competitive advantage from the continuous improvement of the operations, which can be considered a difficult to imitate capability.

**Key words:** Six Sigma methodology, Six Sigma design, TQM, process improvement, Six Sigma projects, quality management.

### Introducción

En el ámbito empresarial, las organizaciones han utilizado diferentes enfoques de la calidad para satisfacer las necesidades de los clientes y garantizar que los productos cumplan con especificaciones técnicas. Dentro de los enfoques, se consideran: el control estadístico de calidad, el sistema de gestión ISO, el Seis Sigma, entre otros.

El Seis Sigma es una técnica que utiliza herramientas de gestión de calidad y estadística para reducir la variación en los procesos y productos, y busca aumentar la satisfacción de las necesidades de los clientes y disminuir los costos de operación<sup>1</sup>. Generalmente es utilizada por grandes compañías a escala mundial por los cambios en la dirección, los procesos, la cultura organizacional y las inversiones que implica su implementación como filosofía de negocio<sup>2</sup>. Otro elemento importante a considerar es que la literatura comúnmente describe los aspectos generales y casos de éxito del Seis Sigma, sin considerar factores de éxito y fracaso en su implementación en empresas de diferentes sectores y tamaños<sup>3,4</sup>.

Por los motivos expuestos, el presente artículo tiene como objetivo elaborar el estado del arte y las tendencias del Seis Sigma respecto a sus metodologías, enfoques de utilización, beneficios y factores críticos de éxito y fracaso que faciliten su implementación en el ámbito empresarial y motiven investigaciones alrededor del tema.

La metodología propuesta se basa en la revisión y análisis de información secundaria relacionada con Seis Sigma, la cual se obtiene de libros y revistas científicas de bases de datos como: EBSCO, Taylor and Francis, Google Scholar, entre otras. A partir de la información recolectada, se describen las generalidades del Seis Sigma, incluyendo definiciones, objetivos, principios y metodologías. Posteriormente, se elabora un cuadro con el estado del arte y las tendencias futuras del Seis Sigma, considerando los aportes y conclusiones de los autores analizados.

Finalmente, se puede indicar que el artículo se divide en tres partes: la primera parte considera las generalidades del Seis Sigma; en la segunda, se presentan el estado del arte y las tendencias, y finalmente, en la tercera, se presentan las conclusiones y recomendaciones que se obtienen.

## Generalidades del Seis Sigma

A continuación se describen conceptos básicos y objetivos del Seis Sigma, incluyendo herramientas y metodologías que permiten su implementación en organizaciones de manufactura y servicios, cuando éstas desarrollan actividades de diseño y mejora.

### ¿Qué es Seis Sigma?

Es una estrategia enfocada al cliente que, basada en hechos y datos, intenta alcanzar un nivel de la calidad tal en los procesos que reduzca la cantidad de defectos y minimice su variabilidad, lo cual permite efectuar mejoras de desempeño planificadas y aumentar la eficiencia<sup>5</sup>. Por su parte, Fontalvo<sup>6</sup> la define como una herramienta que articula el uso de diferentes técnicas propias de la gestión de la calidad, el control estadístico y el diseño de experimentos que, combinadas con la medición del desempeño de procesos, permite centrarse en mejoras focalizadas o de toda la organización; de esta manera se puede impactar en la reducción de costos de operación y aumentar la rentabilidad. Seis Sigma no solo puede ser considerado como un proyecto de mejora, sino también como una metodología que contribuye al desarrollo de metodologías basadas en la planificación, y enfocadas a la obtención de resultados en los procesos de producción y servicios<sup>7</sup>.

El término Seis Sigma puede ser definido como una medida estadística que describe la satisfacción de los clientes, el desempeño de un proceso o producto, e, inclusive, un sistema de dirección para buscar un liderazgo sostenible en el mercado y un desempeño de clase mundial<sup>8</sup>.

Para identificar el nivel de Seis Sigma de una organización, se utiliza una medida de desempeño denominada Defectos por Millón de Oportunidades (DPMO), la cual puede ser usada como referente de comparación de calidad y defectos de empresas de diferentes tamaños y características<sup>9</sup>. A continuación, se presenta la cantidad DPMO por nivel sigma que pueden alcanzarse en las empresas (figura 1)<sup>10</sup> (tabla 1).<sup>11</sup>

Tabla 1. DPMO por niveles sigma

Nivel de sigma	Defectos por millón de oportunidades
6	3,4
5	233
4	6210
3	66807
2	308537
1	690000

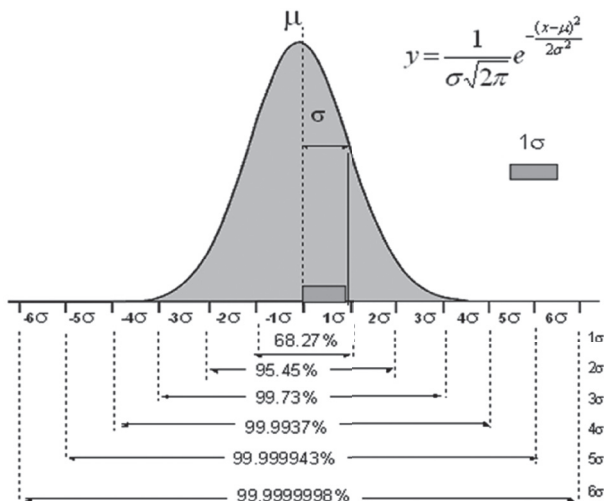


Figura 1. Niveles Seis Sigma en procesos

Fuente: Elaboración propia

Las empresas que implementan la filosofía seis sigma buscan que los procesos que se diseñen o mejoren funcionen a un 99.99% de aceptación o a un nivel de 3.4 Defectos por Millón de Oportunidades (DPMO), lo cual garantiza la satisfacción de las necesidades de los clientes y la reducción de los costos de operación.

### Objetivos del Seis Sigma

El Seis Sigma se basa en la reducción de variaciones y el mejoramiento del desempeño de los procesos y productos de una organización, y se fundamenta en la identificación, medición y minimización de errores, defectos y retrasos que afectan los costos y la satisfacción de los clientes. Adicionalmente, tiene como objetivos permitir la eliminación de las actividades que no generan valor, maximizar la calidad y aumentar la rentabilidad<sup>12</sup>.

Por su parte, Pande y Holpp<sup>13</sup> indican que el Seis Sigma es una forma inteligente y planificada de dirigir un negocio o proceso buscando el cumplimiento de tres objetivos:

- Mejorar la satisfacción del cliente
- Reducir el tiempo de ciclo
- Reducir los defectos

A partir de los objetivos descritos, se puede indicar que el Seis Sigma debe permitir ahorros en los costos, así como oportunidades para retener a los clientes, capturar nuevos mercados y desarrollar un enfoque de empresa de clase mundial.

### Principios del Seis Sigma

A continuación, se presentan algunos de los principios del Seis Sigma que permiten que éste alcance sus objetivos de una manera estratégica y ordenada.

#### **Principio 1: Enfoque en el cliente** <sup>14,15</sup>

Los clientes suelen ser considerados como una de las prioridades de las empresas, ya que ellos dinamizan los ingresos y el posicionamiento de la marca en el mercado. A medida que se utiliza Seis Sigma, se facilita la identificación de las necesidades de los clientes. Por tal motivo, se puede indicar que las mejoras del Seis Sigma se definen por su impacto en la satisfacción y creación de valor para los clientes<sup>16,17</sup>.

## **Principio 2: Dirección basada en datos y hechos**

La disciplina Seis Sigma se basa en el establecimiento de indicadores que permiten medir, analizar y determinar el desempeño de los productos y los procesos en la organización, de tal manera que los problemas pueden ser definidos, analizados y resueltos de una forma más efectiva y permanente, atacando las causas raíz o fundamentales que los originan y no sus síntomas<sup>5</sup>.

Este enfoque en datos ayuda a la dirección a resolver dos preguntas clave para dar soporte a la toma de decisiones:

¿Qué datos e información se requieren?

¿Cómo usamos esos datos e información para identificar problemas y oportunidades, y mejorar o controlar el proceso?

## **Principio 3: Orientación a procesos**

Cuando se desarrollan proyectos Seis Sigma, es fundamental la aplicación de un enfoque en procesos, con independencia de si se requiere medir el desempeño, mejorar la eficiencia, incrementar la satisfacción del cliente, o incluso hacer funcionar el negocio. Una de las mejoras importantes cuando se implementa Seis Sigma ha sido convencer a los directores y ejecutivos de que los procesos son un medio para generar ventaja competitiva y aumentar la eficiencia respecto al uso de recursos<sup>18</sup>.

## **Principio 4: Dirección proactiva**

Ser proactivo significa actuar con antelación a los sucesos en vez de reaccionar de manera correctiva en ellos. En el ámbito empresarial, la proactividad significa adoptar prácticas empresariales que se orienten a la planificación, análisis de riesgos y desarrollo de planes de contingencia que permitan reducir los errores, variaciones o desperdicios en los procesos, servicios o dirección de la empresa<sup>19</sup>.

## **Principio 5: colaboración en la organización**

Para un adecuado funcionamiento del Seis Sigma, se requiere eliminar barreras que impiden el trabajo en equipo entre los miembros de la organización, y dificultan los flujos de información y el aumento de la productividad. Por estos motivos, se deben diseñar estrategias que mejoren la coordinación y colaboración entre los procesos del negocio y la dirección, lo cual impacta en la satisfacción y generación de valor al cliente<sup>20</sup>.

## Metodología del Seis Sigma DMAIC<sup>21-23</sup>

Seis Sigma se apoya en una metodología denominada *DMAIC* (*Define o Definir, Measure o Medir, Analyze o Analizar, Improve o Mejorar, Control o Control*), la cual facilita el mejoramiento de procesos y productos basándose en cinco fases que se describen a continuación<sup>24</sup>:

Definir: Definir problemas y métricas que permitan establecer cómo los procesos y productos afectan los requerimientos de los clientes, los cuales se denominan CTQ (por sus siglas en inglés: *Critical to Quality*)<sup>25</sup>. En esta fase, también se determina el alcance del proyecto o las fronteras que delimitarán el inicio y el final del proceso que se busca mejorar. Como herramienta de apoyo a esta fase se recomienda elaborar un mapa del flujo del proceso: ¿qué?, ¿por qué?, ¿dónde?, ¿quiénes?

Medir: Esta fase permite medir el desempeño actual del proceso que se busca mejorar a través de la medición de los CTQ<sup>26</sup>, los cuales permiten establecer cuantitativamente los defectos u oportunidades que se desarrollarán en las fases posteriores del proyecto. Esta medición se soporta en el diseño y ejecución de un plan de recolección de datos que incluye las fuentes primarias o secundarias de los mismos. Por último, se comparan los resultados actuales con los requerimientos del cliente para determinar la magnitud de la mejora requerida. En esta fase se recomienda la utilización de herramientas como diagramas de Pareto, causa efecto (espina de pescado) e indicadores de gestión que ayudan en la recolección de los datos relacionados con costos, eficiencia, eficacia, satisfacción y productividad.

Analizar: Identificar las fuentes de variación (las X) como se genera el problema, y confirmar las X vitales con datos. En esta etapa se lleva a cabo el análisis de la información recolectada para determinar las causas raíz de los defectos y oportunidades de mejora. Posteriormente, se tamizan las oportunidades de mejora, de acuerdo con su importancia para el cliente, y se identifican y validan sus causas de variación. En este punto, se utilizan las herramientas analíticas y estadísticas para identificar las causas de los problemas.

Mejorar: evaluar e implementar soluciones, asegurar que se cumplan los objetivos. Se diseñan soluciones que ataquen el problema raíz y lleven los resultados hacia las expectativas del cliente. También se desarrolla el plan de implementación; en este punto se ponen en práctica las soluciones para eludir los susodichos problemas, se someten a prueba y se validan las soluciones.

**Controlar:** diseñar un sistema para mantener mejoras logradas (controlar X vitales), cerrar proyecto y aprender lecciones. Tras validar que las soluciones funcionan, es necesario implementar controles que aseguren que el proceso se mantendrá en su nuevo rumbo. Para prevenir que la solución sea temporal, se documenta el nuevo proceso y su plan de monitoreo.

### Metodología del Seis Sigma (DMADV)<sup>27</sup>

La metodología de *DMADV* (*define o definir, measure o medir, analyze o analizar, design o diseñar, verification o verificación*) es utilizada cuando las empresas requieren diseñar o rediseñar los productos y procesos buscando alcanzar un nivel Seis Sigma<sup>28</sup>. En los ámbitos académico y empresarial, este enfoque es denominado Diseño para Seis Sigma (DPSS). A continuación, se describen las fases de DMADV.

**Definir:** Identificar el nuevo producto, servicio o proceso que requiere ser diseñado (o rediseñado). En esta fase se desarrollan las mismas actividades descritas para la etapa definir del ciclo DMAIC, en donde se elabora el marco del proyecto, se asignan actividades, responsables y recursos. Además, se definen las metas del proyecto y las variables (internas y externas) del cliente<sup>29,30</sup>.

**Medir:** Planear y conducir las investigaciones necesarias para entender las necesidades del cliente y definir los requerimientos de una manera cuantitativa y cualitativa. En esta etapa de medición la herramienta más utilizada es la Casa de Calidad o Función de Desarrollo de Producto.

**Analizar:** Revisar, evaluar y seleccionar alternativas de diseño de productos o procesos, que permitan satisfacer los requerimientos de los clientes, los cuales se miden a través del CTQ<sup>31</sup>. Además, se debe analizar qué características técnicas deben elegirse para reducir los defectos y la variabilidad que permitan alcanzar un nivel Seis Sigma<sup>32</sup>.

**Diseñar:** Desarrollar los detalles del diseño. Por tal motivo, se debe evaluar la capacidad del diseño propuesto y elaborar los planes para realizar pruebas piloto o prototipos del nuevo producto, servicio o proceso, buscando el cumplimiento de las especificaciones técnicas, la reducción de errores y los criterios de calidad. En esta fase, se pueden utilizar técnicas como la ingeniería concurrente, el diseño para la excelencia, la función de desarrollo de producto, entre otros. Finalmente, se sugiere la utilización de tecnologías CAD/CAM/CAE, en el caso de los productos, y simulación discreta, para el diseño de procesos.

Verificar: Construir o desarrollar un producto o proceso piloto para verificar el cumplimiento de los CQT. A partir de las generalidades, objetivos y metodologías de mejoramiento y diseño del Seis Sigma, se puede identificar que esta herramienta se enfoca en la satisfacción de las necesidades de los clientes y la disminución de costos a través de la reducción de la variabilidad de los procesos y productos, la cual se alcanza cuando la compañía opera con un nivel seis sigma o 3.4 Defectos por Millón de Oportunidades (DPMO).

### Estructura organizacional del Seis Sigma

Cuando las empresas toman la decisión de implementar Seis Sigma, deben estructurar o mejorar la organización, ya que se requiere involucrar e integrar líderes de negocios, de proyectos, expertos, facilitadores y empleados participantes, quienes se encargan de la planeación y dirección de la filosofía dentro de la empresa, búsqueda de problemas u oportunidades de mejora y coordinación de proyectos de solución para disminuir los desperdicios y aumentar los rendimientos y la satisfacción de los clientes.

Otro aspecto importante en la estructura organizacional es la coordinación con el proceso de gestión del talento humano para diseñar o ajustar los perfiles de los cargos relacionados con el Seis Sigma. Además, se debe considerar la elaboración de una estrategia de gestión del cambio que permita que esta técnica de calidad contribuya con los beneficios y objetivos antes descritos.

La estructura organizacional típica del Seis Sigma está conformada por los *Champion o patrocinadores*, *Master Black Belt* (maestro de cinturón negro), *Black Belt* (cinturón negro), *Green Belt* (cinturón verde) y *Yellow Belt (cinturón Amarillo)*<sup>2</sup>. A continuación, se describen los roles, características, capacitación y acreditación de cada uno de los roles (tabla 2)<sup>33</sup>.

Finalmente, se debe considerar que el Seis Sigma no es solo una técnica de calidad que busca diseñar o mejorar procesos y disminuir errores, y aumentar la satisfacción del cliente y la rentabilidad, sino que también puede considerarse como una herramienta para fortalecer el talento humano de la compañía y mejorar su impacto en la productividad. Por estos motivos, esta técnica tiene incidencia en los ámbitos gerencial y operacional.

Tabla 2. Roles en el Seis Sigma

Nombre	Rol	Características	Capacitación a recibir	Acreditación
<b>LIDER DE IMPLEMENTACION</b>	Dirección de comité directivo para seis sigma, que suele estar precedido por un líder ejecutivo de la organización.	Profesional con experiencia en la mejora empresarial en calidad, es muy respetado en la estructura directiva.	Liderazgo, calidad, conocimiento estadístico básico, entendimiento del programa seis sigma y de su metodología (DMAIC).	
<b>Champion o patrocinadores</b>	Gerente de planta o gerente de área, son los dueños de los procesos; establecen problemas y prioridades, responsables de garantizar el éxito de seis sigma en sus áreas de influencia.	Dedicación, entusiasmo, fe en su proyecto, capacidad para administrar.	Liderazgo, calidad, conocimiento estadístico básico y un buen entendimiento en el programa seis sigma, así como su metodología de desarrollo de proyectos (DMAIC).	Aprobar examen teórico-práctico acerca de las generalidades de seis sigma y el proceso (DMAIC)
<b>Máster black belt (MBB)</b>	Dedicados 100% al seis sigma, brindan asesoría y tienen la responsabilidad de mantener una cultura de calidad dentro de la organización. Dirigen o asesoran proyectos claves. Son mentores de los BB.	Habilidades y conocimientos técnicos, estadísticos y en liderazgo de proyectos.	Requiere ampliar información en estadística y en los métodos de seis sigmas y recibir el entrenamiento de BB.	Haber dirigido por lo menos un proyecto exitoso y asesorado 20 proyectos exitosos aprobar examen teórico-práctico acerca de currículo BB y aspectos críticos del seis sigma.
<b>Black Belt (BB)</b>	Personas dedicadas tiempo completo a seis sigmas, realizan y asesoran proyectos.	Capacidad de comunicación. Reconocido por el personal por su experiencia y conocimientos.	Recibir el entrenamiento BB con una base estadística sólida.	Haber dirigido dos proyectos exitosos y haber asesorado cuatro. Aprobar examen teórico-práctico acerca de currículo BB y aspectos críticos del seis sigma.

Continuación Tabla 2

Nombre	Rol	Características	Capacitación a recibir	Acreditación
<b>Green Belt (GB)</b>	Ingenieros, analistas, financieros, técnicos expertos en el negocio atacan problemas de su área y están dedicados tiempo parcial al seis sigma.	Trabajo en equipo, motivación, aplicación de metodología (DMAIC), capacidad para dar seguimiento.	Recibir el entrenamiento BB con una base estadística sólida.	Haber sido el líder de dos proyectos exitosos. Aprobar examen teórico-práctico acerca de currículo BB.
<b>Yellow Belt</b>	Personal de piso que tiene problemas con su área.	Conocimiento de los problemas, motivación y voluntad de cambio.	Cultura básica en calidad y entrenamiento en herramientas estadísticas básicas, DMAIC y en soluciones de problema.	Haber participado en un proyecto, aprobar examen teórico-práctico acerca del entrenamiento básico que recibe.

FUENTE: Elaboración propia

## Estado actual y tendencias del Seis Sigma: una mirada científica y empresarial

Este numeral tiene como objetivo revisar el estado del arte del Seis Sigma respecto a metodologías, enfoques, beneficios, factores de éxito y fracaso en su utilización, lo cual puede convertirse en la base para desarrollar investigaciones futuras y explorar criterios para su adecuada implementación en el ámbito empresarial. Para alcanzar este objetivo, se hace una revisión y un análisis de artículos científicos publicados en bases de datos como: EBSCO, Science Direct, Dialnet, Taylor and Francis, entre los años 2005 y 2010.

De otra parte, con la elaboración del estado del arte, se busca conocer qué información científica puede ser utilizada en el ámbito empresarial para una adecuada implementación del Seis Sigma que genere impacto en los negocios.

A continuación, se presentan los resultados del estado del arte haciendo énfasis en los objetivos, aportes, trabajos futuros y tendencias del Seis Sigma planteados por los diferentes autores analizados (tabla 3).

Tabla 3. Revisión del estado del arte Seis Sigma

SOKOVIC, Marina; et al. <sup>34</sup>	Application of Six Sigma methodology for process design	2005
<p>Seis Sigma es un programa de mejora de la calidad que tiene como objetivo reducir el número de defectos a un mínimo de 3,4 partes por millón en los procesos y productos. Se basa en la utilización de la distribución normal y fuerte relación entre las no conformidades de producto, o defectos, y el rendimiento del producto, procesos, fiabilidad, tiempo de ciclo, inventario, horario, entre otros.</p> <p>El Seis Sigma también puede considerarse como un proceso de mejoramiento continuo cuyo objetivo es infundir una conciencia de calidad en el día a día de la operación, partiendo de una adecuada gestión de la cultura organizacional.</p> <p>El objetivo del artículo es aplicar la metodología de análisis modo de la falla y análisis de los efectos (<i>Failure Mode and Effect Analysis, FMEA</i>), junto a mapas de procesos con el fin de desarrollar un enfoque de diseño de procesos basado en Seis Sigma.</p> <p>En la fase de planificación del FMEA, se busca simular fallos, detectar su causa y analizar su efecto en el sistema, lo cual puede considerarse como una fuente de diseño de procesos robustos con baja variabilidad. De otra parte, se debe considerar que la utilización del método FMEA puede dificultarse proporcionalmente según la cantidad de <i>KPIV</i> (<i>key process input variables</i>), las cuales son variables claves de entrada que pueden tener o no impacto en las variables de salida del proceso o <i>KPOV</i> (<i>key process output variables</i>), las cuales determinan la calidad de los productos o servicios generados por el proceso en diseño.</p> <p>El artículo también describe la utilización herramientas como mapas de procesos como complemento al FMEA para diseñar procesos con la metodología Seis Sigma buscando mejorar la preparación de la máquinas y aumento de la eficiencia en el uso de materiales, lo reduce los costos, la cantidad de desperdicios y la robustez del proceso.</p> <p>Finalmente, como trabajo futuro los autores plantean complementar la metodología de diseño de procesos con Seis Sigma con herramientas estadísticas buscando un enfoque más robusto respecto a la eficiencia y eficacia.</p>		

Continuación Tabla 3

<p><b>HOON KWAK, Young &amp; ANBARI, Frank<sup>35</sup></b></p>	<p><b>Benefits, obstacles, and future of six sigma approach</b></p>	<p><b>2006</b></p>
<p>El objetivo de este artículo es revisar y analizar la evolución, los beneficios y retos de las prácticas Seis Sigmas, incluyendo la identificación de factores clave que influyen en el éxito de su implementación, las principales características, obstáculos y deficiencias del método Seis Sigma, lo cual permite a las organizaciones desarrollar un enfoque estratégico en las operaciones buscando de esta manera aumentar la eficiencia y calidad de los productos, la satisfacción al cliente y el análisis del desempeño de los procesos en el tiempo. Finalmente, los autores indican que los trabajos futuros en Seis Sigma se orientan con la coordinación y participación de la alta dirección, el compromiso organizacional, el cambio cultural y la gestión de proyectos eficaces.</p>		
<p><b>CHAO TON, Su and CHIA JEN, Chou<sup>37</sup></b></p>	<p><b>A systematic methodology for the creation of Six Sigma projects: A case study of semiconductor foundry</b></p>	<p><b>2008</b></p>
<p>El Seis Sigma ha sido adoptado en una variedad de industrias en el mundo y se ha convertido en uno de los temas más importantes de debate en la gestión de la calidad. En la implementación del Seis Sigma surgen algunas preguntas, tales como: ¿cómo se generan proyectos viables? ¿Qué proyectos de Seis Sigma son fundamentales para optimizar los recursos de la organización? Por estos motivos, el artículo en análisis tiene como objetivo desarrollar un nuevo enfoque para crear proyectos de Seis Sigma y determinar su importancia.</p> <p>En primer lugar, los proyectos se crean a partir de dos aspectos. El primero considera las políticas de la organización al nivel de la estrategia del negocio y la voz de los clientes. En segundo lugar, se utiliza la metodología de análisis de decisiones de Proceso Analítico Jerárquico (AHP); este modelo se lleva a cabo para evaluar los beneficios de cada proyecto buscando identificar el más importante.</p> <p>Otro aspecto importante en el desarrollo de proyectos Seis Sigma consiste en realizar un FMEA (Failure Mode and Effect Analysis), la cual es una técnica que se utiliza para mejorar la fiabilidad, calidad y seguridad, y reducir el riesgo potencial para los procesos y productos. En particular, FMEA puede ayudar a una organización para identificar, definir y eliminar los fallos conocidos o potenciales, problemas y errores.</p> <p>Finalmente, se puede indicar que un aporte del artículo es desarrollo de una metodología sistemática para proyectos Seis Sigma que incluye etapas como: generación del proyecto, evaluación de beneficios, riesgos y diseño de un plan de implementación.</p>		
<p><b>SCHROEDER, Roger; et al<sup>37</sup></b></p>	<p><b>Six Sigma: Definition and underlying theory</b></p>	<p><b>2008</b></p>
<p>El Seis Sigma ha cobrado importancia en la industria por su impacto en la satisfacción de los clientes y la reducción de errores. El artículo busca describir una definición conceptual e identificar la teoría relacionada con Seis Sigma. Como resultado del artículo, se obtiene el siguiente planteamiento: las herramientas y técnicas de Seis Sigma son similares a los enfoques anteriores de la gestión de la calidad, lo que presenta variaciones es la administración de la estructura organizacional y la gestión del cambio.</p> <p>La organizacional emergente para la gestión de calidad con Seis Sigma ayuda a las organizaciones a desarrollar el control de las actividades de mejora de procesos de una manera rigurosa y crear un contexto que permite la exploración problema en los diferentes procesos de la organización. Como trabajos futuros de investigación, los autores indican describen la teoría de la contingencia, el aprendizaje y teoría de la organización en la implementación y gestión del Seis Sigma.</p>		

## Continuación Tabla 3

<b>CHAKRAVORTY, Satya<sup>38</sup></b>	<b>Six Sigma programs: An implementation model</b>	<b>2009</b>
<p>Para la implementación de un modelo de Seis Sigma se debe seguir una serie de pasos. El primero consiste en hacer un análisis estratégico impulsado por el mercado y el cliente. El segundo busca establecer un equipo multifuncional para conducir la iniciativa de mejora (motivación a los trabajadores). El tercero es identificar las herramientas de mejora. El cuarto paso es llevar a cabo mapas de procesos y dar prioridad a las oportunidades de mejora. El quinto paso tiene como objetivo desarrollar un plan detallado para los equipos de mejora de bajo nivel. De otra parte, el sexto paso busca implementar, documentar y revisar las oportunidades de mejora.</p> <p>Esta investigación proporciona un modelo para orientar eficazmente la aplicación de programas Seis Sigma buscando reducir la variación de los procesos, disminución en los desperdicios de tiempos y piezas defectuosas en la producción. Adicionalmente, el modelo busca convertirse en una propuesta base para desarrollo de investigaciones en Seis Sigma que puedan ser apropiada en el ámbito empresarial.</p>		
<b>SUNG, Park; et al<sup>39</sup></b>	<b>A new paradigm of Six Sigma: Knowledge-based Digital Six Sigma. Total Quality Management &amp; Business Excellence.</b>	<b>2009</b>
<p>El artículo propone un enfoque denominado Knowledge-based Digital Six Sigma (KDSS), el cual se basa en el uso de herramientas como Data Technology (DT) y knowledge management (KM) para crear una conciencia de mejora en la organización a través de proyectos de Seis Sigma soportados en la gestión de la calidad y tecnología. El principal objetivo del KDSS es recopilar, procesar y analizar datos de tal forma que estos puedan convertirse en información útil para la toma de decisiones, y aplicar modelos estadísticos y computacionales que apoyen el diseño o mejoramiento de procesos.</p> <p>El artículo plantea que el conocimiento basado en el uso de tecnología es una herramienta crítica en el Seis Sigma que facilita y apoya las capacidades de mejoramiento de procesos y servicios, para aumentar la eficiencia en la decisiones o predicciones de eventos futuros.</p>		
<b>LAWRENCE, Fredendall; et al<sup>40</sup></b>	<b>Mapping the critical links between organizational culture and TQM/Six Sigma practices</b>	<b>2010</b>
<p>El artículo describe cómo la cultura organizacional influye en la aplicación de diferentes prácticas como el Seis Sigma, así como la relación de esta con el sistema de mejoramiento de la calidad total (<i>TQM o Total Quality Management</i>). Los resultados de este estudio revelan que los distintos tipos de culturas organizacionales influyen en las prácticas de TQM y Seis Sigma. El modelo presentado por los autores describe cómo la cultura organizacional del grupo está significativamente relacionada con siete de las diez prácticas de la implementación exitosa del Seis Sigma como: apoyo de la alta dirección, relaciones con los proveedores, gestión de fuerza de trabajo, de productos y diseño de servicios, gestión de procesos, seis sigma en el mejoramiento de procesos y centro indicadores. La investigaciones futuras alrededor del tema deberán plantear un enfoque más profundo para explorar la dirección causal y las posibles relaciones recíprocas entre la aplicación TQM / Seis Sigma y la cultura organizacional. OK</p>		

### Continuación Tabla 3

THONG NGEE, Goh <sup>41</sup>	Six Triumphs and Six Tragedies of Six Sigma	10, 2010
<p>En este artículo se exponen los factores que contribuyen al desarrollo del Seis Sigma, incluyendo las extensiones al Diseño para Seis Sigma y Lean Six Sigma, las cuales permiten que la mejora de la calidad en la organización se alcance de una manera integral. Adicionalmente, el artículo describe los “triumfos” y “tragedias” del Seis Sigma, lo cual ofrece una orientación importante para su implementación y definición de áreas de investigación de interés.</p> <p>¿Qué constituye un triunfo? Cuando se presentan soluciones o propuestas en campos empresariales o académicos que no se han trabajado en la ingeniería, la metodología no ha tenido enfoques meritorios o simplemente son temas que no se han trabajado antes. Estos deben conducir a unos impactos significativos en pro del mejoramiento de la organización.</p> <p>¿Qué constituye una tragedia o fracaso en seis sigma? Si una etapa del proceso se deja de controlar, podría negar un triunfo, crear acciones equivocadas o, incluso, destruir lo que originalmente ha sido útil. OK</p> <p>En Seis Sigma algunos triunfos que se puede referenciar son: a) el uso eficiente de las medidas para la evaluación y mejora de la calidad como DPMO (defectos por millón de oportunidades); b) asignación de roles y responsabilidades para la mejora del rendimiento de la empresa: la calidad es asunto de todos; c) utilización eficiente de las herramientas estadísticas; d) Importancia del factor tiempo en los procesos; e) mejor uso de la información apoyándose en la utilización de tecnología, y f) capacidad para participar en negocios importantes competitivamente.</p> <p>En Seis Sigma algunas tragedias que se pueden considerar son: a) Ignorancia en temas afines al Seis Sigma como teoría de colas, simulación discreta, entre otras técnicas cuantitativas y cualitativas, b) Obsesión a logros personales, c) La idea de que las herramientas estadísticas no son necesarias, d) Exageración irresponsable de algunos directivos del Seis Sigma en proyectos los beneficios del Seis Sigma, e) Tomar decisiones apresuradas por falsos modelos estadísticos que no representan los sistemas en diseño o mejora y f) Ignorancia o descuido en las prácticas de la teoría DMAIC, este proceso debe ser adaptado en cualquier proceso que requiera de Seis Sigma.</p>		

De la revisión de los artículos del estado del arte se puede indicar que:

- La utilización de herramientas de la gestión de calidad como FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) y el mapa de procesos permiten identificar y caracterizar las variables clave de entrada (*KPIV o key process input variables*) que afectan las variables de salida (*KPOV o key process output variables*) del proceso o producto, cuando este se diseña o mejora utilizando la metodología Seis Sigma.
- Se identifica como tendencia del Seis Sigma desarrollar metodologías que permitan una coordinación de factores críticos para su implementación como: participación de la alta dirección, compromiso organizacional, cambio cultural y gestión de proyectos.
- En el estado del arte, se identifica la importancia de utilizar una metodología sistemática para proyectos Seis Sigma que incluya etapas como:

- generación del proyecto, evaluación de beneficios y riesgos, y diseño de un plan de implementación. Con este enfoque, las empresas pueden facilitar la utilización de la técnica y orientarse a desarrollar proyectos que aumenten los beneficios y minimicen los riesgos. Adicionalmente, se promueve el uso de técnicas de apoyo a las decisiones como el AHP, lo cual puede considerarse como una línea de investigación potencial en el tema.
- Las estructuras organizacionales y la gestión del cambio son dos aspectos fundamentales en la implementación y utilización del Seis Sigma como herramienta de calidad. De allí la importancia de que las metodologías que se diseñen o desarrollen en investigaciones las consideren como factores críticos. Otro aspecto importante que se identifica en el estado del arte es una adecuada gestión de la cultura organizacional como factor crítico del Seis Sigma, la cual puede considerarse como una línea de investigación potencial que debe desarrollarse por profesionales de Ingeniería Industrial, Administración, Sociología y Psicología, entre otros, buscando un enfoque integral e impactante en el desarrollo de ventajas competitivas para las organizaciones.
  - Se identifica un enfoque novedoso en la metodología Seis Sigma, denominado *Knowledge-based Digital Six Sigma (KDSS)*, que consiste en utilizar el conocimiento basado en el uso de tecnologías para facilitar y mejorar los procesos y servicios, y aumentar la eficiencia en las decisiones o predicciones de eventos futuros en la organización. Este enfoque puede ser considerado como una línea de investigación que mejore potencialmente las capacidades del Seis Sigma debido al uso de las Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC).
  - En el artículo, se describen los triunfos y fracasos del Seis Sigma, los cuales permiten identificar aspectos relevantes y tendencias de esta filosofía. Respecto a los triunfos se puede resaltar la promoción del uso de técnicas estadísticas, utilización de TIC y reorientación de las estructuras organizacionales, representadas en la asignación de roles y actividades del personal en los procesos de mejora. Respecto a los fracasos, se identifican oportunidades de investigación con la integración al Seis Sigma de técnicas de investigación de operaciones como metaheurísticos, simulación discreta y dinámica de sistemas. Adicionalmente, caracterización de modelos estadísticos como diseño de experimentos que permitan identificar soluciones de diseño y mejora, utilizando un enfoque cuantitativo, y reducir la variación en los procesos e incrementar la satisfacción del cliente.

## Conclusiones

- Del artículo se puede concluir que el Seis Sigma es una filosofía que permite el diseño o mejora de procesos o productos buscando la minimización de su variabilidad, la reducción de costos y el incremento de la satisfacción de los clientes. Se debe resaltar que un proceso o producto es Seis Sigma cuando los Defectos por Millón de Oportunidades (DPMO) son 3.4, lo cual implica gestionar adecuadamente los procesos y alinearlos con la estrategia de la organización.
- Para la implementación del Seis Sigma se suelen utilizar las metodologías DMAIC y DMADV, las cuales apoyan el mejoramiento y diseño de productos y procesos, respectivamente. Se puede indicar que el éxito de la implementación del Seis Sigma se encuentra en la adecuada planeación, ejecución y control de las etapas de dichas metodologías.
- Del estado del arte y las tendencias del Seis Sigma, se identifica que los factores críticos para su implementación se relacionan con el diseño de estructuras organizacionales, gestión del cambio, identificación y gestión de proyectos, uso adecuado de la estadística, y utilización apropiada del DMAIC y el DMADV.
- Respecto a oportunidades y líneas de investigación, se considera la integración del uso de técnicas de investigación de operaciones como simulación discreta, dinámica de sistemas y metaheurísticos, junto a las metodologías DMAIC, DMADV y modelos estadísticos en el Seis Sigma para identificar proyectos y soluciones de diseño o mejora de productos o servicios. Otra línea se relaciona con el estudio del impacto y utilización de la gestión del cambio y rediseño de estructuras organizacionales, factores que son críticos en la implementación del Seis Sigma.
- Como trabajo futuro, se pretende desarrollar una metodología de apoyo al diseño o mejoramiento de procesos de producción y logística que permitan integrar inicialmente técnicas de investigación de operaciones en el Seis Sigma, lo cual se considera como un aporte al estado del arte del tema y un enfoque para facilitar la apropiación de la herramienta en el ámbito empresarial.

## Referencias bibliográficas

1. PANDE, Peter y HOLPP, Larry ¿Qué es Seis Sigma?. 1ª ed. Aravaca (Madrid): Mc Graw Hill 2002. 81 p.

2. GUTIÉRREZ PULIDO, Humberto y DE LA VARA SALAZAR, Román. Control estadístico de calidad y Seis Sigma. 2ª ed. México, D. F.: Mc Graw Hill 2009. p. 418-464
3. GÓMEZ FRAILE, Fermín; *et al.* Seis Sigma. 2ª ed. Madrid: Fundación Confemetal. 390 p.
4. GONZÁLEZ ALEU GONZÁLEZ, Fernando. Seis Sigma para gerentes y directores. 1ª ed. España: Libros En Red, 2006. 772 p. Colección Negocios, Empresa y Economía.
5. GUTIÉRREZ PULIDO, Op. cit., p. 418-464
6. PANDE, Op. cit., 81 p.
7. *Ibíd.*
8. GUTIÉRREZ PULIDO, Op. cit., p. 418-464
9. GÓMEZ FRAILE, Op. cit., 390 p.
10. GUTIÉRREZ PULIDO, Op. cit., p. 418-464
11. PANDE, Op. cit., 81 p.
12. MAGNUSSON, Kjell; *et al.* Seis Sigma una estrategia pragmática. 1ª ed. Barcelona: Ediciones Gestión, 2000. p. 83-124.
13. PANDE, Op. cit., 81 p.
14. *Ibíd.*
15. GONZÁLEZ ALEU GONZÁLEZ; Op. cit., 772 p.
16. PANDE, Op. cit., 81 p.
17. GONZÁLEZ ALEU GONZÁLEZ; Op. cit., 772 p.
18. HEIZER, Jay y RENDER, Barry. Principio de administración de operaciones. 5ª ed. México: Pearson Educación, 2004. p. 185-193.
19. GONZÁLEZ ALEU GONZÁLEZ; Op. cit., 772 p.
20. *Ibíd.*
21. GUTIÉRREZ PULIDO, Op. cit., p. 418-464.
22. GÓMEZ FRAILE, Op. cit., 390 p.
23. GONZÁLEZ ALEU GONZÁLEZ; Op. cit., 772 p.
24. PANDE, Op. cit., 81 p.
25. MAGNUSSON, Op. cit., p. 83-124.
26. *Ibíd.*, p. 94
27. LÓPEZ, Carlos. La metodología 6 sigma ¿qué es? ¿Para qué sirve? ¿Cómo se aplica? ¿Requerimientos para su implementación? ¿Etapas de implementación?.

- [En línea] abril 2001. disponible en: <http://www.gestiopolis.com/recursos/experto/catsexp/pagans/ger/no12/6sigma.htm>.
28. MAGNUSSON, Op. cit., p. 99.
  29. PANDE, Op. cit., 81 p.
  30. GONZÁLEZ ALEU GONZÁLEZ; Op. cit., 772 p.
  31. ASHLEY, Rawlins. Total quality management (TQM). 1ª Ed. Bloomington, Indiana: Author House, 2008. 322 p.
  32. CHAO TON, Su & CHIA JEN, Chou. A systematic methodology for the creation of Six Sigma projects: A case study of semiconductor foundry. En: Expert Systems with Applications. April 2008. Vol. 34, no. 4. p. 2693-2703.
  33. GUTIÉRREZ PULIDO, Op. cit., p. 434.
  34. SOKOVIC, Marina; *et al.* Application of six sigma methodology for process design. En: Journal of Materials Processing Technology. April 2005. Vol. 162-163. p. 777-783.
  35. HOON KWAK, Young & ANBARI, Frank. Benefits, obstacles, and future of six sigma approach. En: Technovation. June 2006. Vol. 26, no. 5-6. p. 708-715.
  36. CHAO TON, Op. cit., p. 2697.
  37. SCHROEDER, Roger G.; *et al.* Six sigma: definition and underlying theory. En: Journal of operations Management. July 2008. Vol. 26, no. 4. p. 536-554.
  38. CHAKRAVORTY, Satya. Six sigma programs: an implementation model. En: International Journal of Production Economics. June 2009. N° 1. p. 1-16.
  39. SUNG, Park; *et al.* A new paradigm of Six Sigma: Knowledge-based Digital Six Sigma. En: Total Quality Management & Business Excellence. 2009. Vol. 20, no. 9. p. 945-952.
  40. LAWRENCE, Fredendall; *et al.* Mapping the critical links between organizational culture and TQM/Six Sigma practices. En: International Journal of Production Economics. January 2010. Vol. 123, no. 1. p. 86-106.
  41. THONG NGEE, Goh. Six Triumphs and Six Tragedies of Six Sigma. En: Quality Engineering. October 2010. Vol. 22, no. 4. P. 299-305.



**Desarrollo y Transversalidad**  
serie Lasallista Investigación y Ciencia

Se terminó de imprimir en la  
Editorial Artes y Letras S.A.S., en julio de 2011.

