

Jorge Alberto Pérez León
Jonatan Torres Pérez
(Coordinadores)

UACJ



*Ciencia en la frontera:
revista de ciencia y tecnología
de la Universidad Autónoma
de Ciudad Juárez*

DIRECTORIO

Ricardo Duarte Jáquez
Rector

David Ramírez Perea
Secretario General

Manuel Loera de la Rosa
Secretario Académico

Luis Enrique Gutiérrez Casas
*Coordinador General de
Investigación y Posgrado*

Daniel Constandse Cortez
Director del ICB

Alejandro Martínez Martínez
Jefe del Departamento de Ciencias Químico Biológicas

Ramón Chavira Chavira
*Director General de Difusión
Cultural y Divulgación Científica*

COMITÉ EDITORIAL

M. en C. María de los Angeles Chamorro Zárate
Universidad Veracruzana

M. en C. Leticia Garibay Pardo
Universidad Veracruzana

Dr. Héctor Zayas Pérez
Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de
Monterrey-CCM

Dr. Jonatan Torres Pérez
Universidad Autónoma de Ciudad Juárez

Dra. Patricia Tamez Guerra
Universidad Autónoma de Nuevo León

M.C. Francisco Javier Grijalva Noriega
Universidad de Sonora

Dr. Joaquín Rodrigo García
Universidad Autónoma de Ciudad Juárez

Dr. Pedro Rafael Valencia Quintana
Universidad Autónoma de Tlaxcala

Dr. José Alberto López Díaz
Universidad Autónoma de Ciudad Juárez

Dr. Abraham Wall Medrano
Universidad Autónoma de Ciudad Juárez

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS QUÍMICO BIOLÓGICAS, INSTITUTO DE CIENCIAS BIOMÉDICAS

Ciencia en la frontera: revista de ciencia y tecnología de la UACJ / Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Coordinación General de Investigación y Posgrado. Vol. 12. (2014). Ciudad Juárez, Chih.: UACJ, 2014. v. ; 21 cm. Seriado.

Apoyado con Recursos PIFI

Ciencia en la frontera: revista de ciencia y tecnología de la UACJ Vol. XII, núm. 3, 2014, es una publicación semestral editada por la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, a través del Instituto de Ciencias Biomédicas y de la Coordinación General de Investigación y Posgrado del ICB y el Departamento de Ciencias Básicas. Editor responsable: Jorge Alberto Pérez León. Reserva al uso exclusivo otorgada por INDAUTOR Núm. 04-2013-03221 300-5400-102 y el ISSN 2007-042X. Copyright © UACJ. Esta obra se terminó de imprimir en noviembre de 2014 en los talleres de la Imprenta Universitaria, Edificio R, Campus ICB, Av. Hermanos Escobar y Av. Plutarco Elías Calles. C.P. 32310. Ciudad Juárez, Chihuahua, México. Tiraje: 100 ejemplares.

Los manuscritos propuestos para publicación en esta revista deberán ser inéditos y no haber sido sometidos a consideración a otras revistas simultáneamente. Al enviar los manuscritos y ser aceptados para su publicación, los autores aceptan que todos los derechos se transfieren a *Ciencia en la frontera: revista de ciencia y tecnología de la UACJ*, quien se reserva los de reproducción y distribución, ya sean fotográficos, en micropelícula, electrónicos o cualquier otro medio, y no podrán ser utilizados sin permiso por escrito de *Ciencia en la frontera: revista de ciencia y tecnología de la UACJ*; véase, además, notas para autores.

Permisos para otros usos: el propietario de los derechos no permite utilizar copias para distribución en general, promociones, la creación de nuevos trabajos o reventa.

CONTENIDO

| | |
|---|----|
| <p>Efecto de compuestos metálicos sobre la movilidad, viabilidad y reacción acrosomal en espermatozoides de cerdo <i>in vitro</i> <i>José Nicolás Lauro Aldama Meza</i> <i>Reyna Fierro Pastrana</i> <i>Mario Altamirano Lozano</i> <i>Eduardo Madrigal Bujaidar</i></p> | 9 |
| <p>Sistemas de gestión ambiental para la ecología industrial. El caso de la industria petroquímica en Altamira-Tampico <i>Graciela Carrillo González</i></p> | 29 |
| <p>Caracterización de un aislado de <i>bacillus simplex</i> nativo de residuos industriales contaminados con cromo hexavalente <i>Hugo Iván Arrieta Oliva</i> <i>Manuel de Jesús Aguilar Casas</i> <i>Alma Rosa Corrales Escobosa</i> <i>Pamela Romo Rodríguez</i> <i>Gloria Alicia Figueroa Aguilar</i> <i>Irving Eduardo Jácome Galarza</i> <i>Félix Gutiérrez Corona</i></p> | 45 |
| <p>Modelación espacial de los contenidos de carbono orgánico en suelos volcánicos de Teziutlán, Puebla, México <i>Gladys Linares Fleites</i> <i>Miguel A. Valera Pérez</i> <i>Maribel Castillo Morales</i>.....</p> | 55 |
| <p>Evaluación ambiental de diferentes escenarios de tratamiento de los residuos sólidos para la ciudad de Chihuahua <i>M. G. Gómez Méndez</i> <i>L. M. Rodríguez Valdéz</i> <i>M. Loya Rivera</i>.....</p> | 65 |

Metabolitos secundarios vegetales con importancia natural y biomédica; fenilpropanoides con actividad estrogénica (isoflavonas, lignanos, cumestanos y lactonas)

María Dolores García Suárez

Ángel Lechuga Corchado

José Luis Gómez Olivares

Alondra Castro Campillo

Arturo Salame Méndez

Héctor Serrano.....75

Valor nutrimental y funcional del cuatomate (*Solanum glaucescens* Zucc), fruto silvestre de la región mixteca

Kati Medina-Dzul

David Muñoz-Rodríguez

Rosa Isela Guzmán-Gerónimo

Pablo Óscar Acereto-Escoffié.....93

ABSTRACTS

Efecto de compuestos metálicos sobre la movilidad, viabilidad y reacción acrosomal en Eepermatozoides de cerdo *In Vitro**José Nicolás Lauro Aldama Meza**Reyna Fierro Pastrana**Mario Altamirano Lozano**Eduardo Madrigal Bujaidar*9

Introduction. The effects of metal exposure on the male reproductive system have been known since the mid-nineteenth century. Many metal compounds have been shown to interfere with normal testicular function in laboratory animals and in occupationally exposed humans. In vitro systems provide a unique experimental access to certain tissues and molecular mechanisms to improve risk assessment.

Objective. The aim of this study was to determine the toxic effect produced by treatment with compounds $MnCl_2$, $HgCl_2$, $MnSO_4$, Na_3VO_4 , and V_2O_5 on sperm quality parameters using an in vitro system.

Methodology. In this study, the effect of some metal compounds on an in vitro system of boar spermatozoa was evaluated by assessing the effect on motility, viability, acrosome reaction, previously determining the LC50 for compounds $HgCl_2$, $MnCl_2$, V_2O_5 and Na_3VO_4 .

Results. LC50 was determined for each of the compounds, and mobility, viability, and acrosome reaction in response to fractional concentrations of LC50 was evaluated. The LC50 values established that $HgCl_2$ is more toxic than the other compounds. The mobility was significantly decreased for all concentrations of $HgCl_2$ in the last two times of incubation whereas for V_2O_5 , $MnSO_4$ y at any time. The viability was decreased significantly by $HgCl_2$ and $MnCl_2$ in the two highest concentrations tested, and V_2O_5 and for Na_3VO_4 and $MnSO_4$ only in the highest concentration. The acrosome reaction was significantly affected at all concentrations for all the metal compounds.

Conclusions. Data obtained from the experiments show that in a general way, although the performance of “coarse” parameters such as motility and viability seem no to be greatly affected by exposure to metal compounds tested, the acrosome reaction is significantly affected, which would adversely affect the fertilizing capacity of sperm and thus reproduction success.

Key words: Heavy metals, spermatozoon, in vitro, toxicity

**Sistemas de gestión ambiental para la ecología industrial.
El caso de la industria petroquímica en Altamira-Tampico***Graciela Carrillo González*29

Environmental management systems are processes of planning, implementing, reviewing and improving the actions undertaken by a company to ensure its environmental goals, innovate their processes, address-

sing the social, economic and legal, and establish continuous improvement systems.

Industrial ecology proposes a strategy that results in clear and operational actions to adapt traditional methods based on environmental policy and management system that favors the conditions for the consolidation of synergies and implementation of eco-efficiencies. In this paper we analyze the case of six large companies of the petrochemical industry, installed in the corridor of Altamira-Tampico. We found that companies have a corporate environmental policy, with an environmental management system and environmental indicators system that allows them to follow up on the recommendations of the ongoing environmental audits and move into a dynamic of innovation based on the identification of eco-efficiencies and synergies that enabled them to make a better environmental performance.

Key words: environmental policy, synergy, innovation

Characterization of a bacillus simplex strain indigenous to industrial wastes contaminated with hexavalent chromium

Hugo Iván Arrieta Oliva

Manuel de Jesús Aguilar Casas

Alma Rosa Corrales Escobosa

Pamela Romo Rodríguez

Gloria Alicia Figueroa Aguilar

Irving Eduardo Jácome Galarza

Félix Gutiérrez Corona45

Chromium compounds may occur as environmental contaminants in soils, waters and industrial effluents due to their wide use in different industrial processes. In the present study we characterized a bacterium isolated from industrial wastes containing Cr(VI) and other metals and identified as *Bacillus simplex* by 16S rDNA. Compared to 168 wild type *Bacillus subtilis*, this *B. simplex* strain showed higher tolerance to Cr(VI) and a high efficiency to reduce the levels of Cr(VI) in LB () culture medium. Results demonstrated that *B. simplex* reduced 25 µg/mL Cr(VI) after 6 h, 50 µg/mL within 18-24 h and almost 100 µg/mL in 48 h. In addition, *B. simplex* shows clear resistance to cephalosporins and is a moderately halotolerant organism. The high efficiency of the *B. simplex* strain for biotransformation of Cr(VI) indicates its potential in environmental biotechnology as a tool in industrial waste cleaning.

Modelación espacial de los contenidos de carbono orgánico en suelos volcánicos de Teziutlán, Puebla, México*Gladys Linares Fleites**Miguel A. Valera Pérez**Maribel Castillo Morales*.....55

The soils derived from volcanic materials behave very different from those of non-volcanic origin and with specific characteristics. These features cause a peculiar interest in their study and their behavior in the dynamics of decomposition of soil organic matter and hence its contribution to organic carbon. The aim of this study was to determine the relationship between climate and the spatial distribution of the contents of Soil Organic Carbon (soc) of the volcanic soils of the region Teziutlán, in the state of Puebla, Mexico. The results obtained confirm the strong relationship of climatic variables with the dynamics of soil carbon and establish that the soc is shown in areas with approximate temperatures of 15.5 - 16 °C and measuring approximately 120 to 280 mm annual rainfall.

Environmental assessment of different scenarios of solid waste treatment for Chihuahua city*M. G. Gómez Méndez**L. M. Rodríguez Valdéz**M. Loya Rivera*.....65

The proper disposal of municipal solid waste (msw) presents a problem to government institutions. To properly dispose the msw involves selecting the cleaner treatment. This study environmentally evaluated five scenarios of msw treatment, applying the methodology of life cycle analysis. The scenarios proposed for the environmental assessment are:

first, the current system (rs-actual);

second is a landfill with emission control and treatment (rs-moderno);

third is the combination of treatments: a low percentage recycling and current landfill (rs-actual-rb);

fourth is the combination of treatments: a high percentage of recycling materials and current landfill (rs-actual-ra);

and the fifth stage is the combination of treatments: a high percentage of recycled materials and modern landfill (rs-moderno-ra).

Data were analyzed with the software SimaPro. The major environmental impact scenario corresponds to rs-current and the less contaminant scenario is rs-moderno-ra.

Keywords: municipal solid waste, life cycle assessment

Metabolitos secundarios vegetales con importancia natural y biomédica; fenilpropanoides con actividad estrogénica (isoflavonas, lignanos, cumestanos y lactonas)

María Dolores García Suárez

Ángel Lechuga Corchado

José Luis Gómez Olivares

Alondra Castro Campillo

Arturo Salame Méndez

Héctor Serrano.....75

Plant products have been used as food source, drugs and even construction materials. Primary metabolism products are important for human and associated fauna nutrition. Secondary metabolism has been less studied even though it is an important source of active ingredients for several drugs. Four metabolic pathways are used for synthesis of flavones, coumestans, lignin, and isoflavone which represent two faces of the research: in one way their isolation is well documented as well as their properties and therapeutic effects, whereas in other way, little is known about their role in the physiology of the plant group that produce them.

Nutritional and functional value of cuatomate (*Solanum glaucescens* Zucc), a wild fruit from the mixteca region

Kati Medina-Dzul

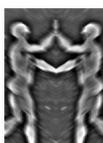
David Muñoz-Rodríguez

Rosa Isela Guzmán-Gerónimo

Pablo Óscar Acereto-Escoffié.....93

The cuatomate is a highly valued wild fruit of the mixteca region. In this study, two sequential crops: autumn 2006 (C1) and winter 2007 (C2) were characterized in terms of proximate composition, dietary fiber, minerals, vitamin C and total phenols. C1 showed a higher protein content than C2, while in C2, the dietary fiber content increased. Statistical differences ($P < 0.05$) between harvests for all components were found. The fruit showed high levels of total dietary fiber (32.44 y 41.05 %), protein (13.17 y 10.53 %) and minerals (0.183-0.123, 2.914-3.385, 0.00473-0.00448, 189-180 mg/100 g for Ca, K, Fe y Mg respectively). The content of phenolic compounds is remarkable high (204.06 mg of gallic acid per 100 g of fresh fruit). This makes the cuatomate an adequate fruit for consumption as food with the potential for preventing chronic diseases related to oxidative stress.

Keywords: Cuatomate, nutritional characteristics, food composition, total phenols, dietary fiber, vitamin C, minerals.



Efecto de compuestos metálicos sobre la movilidad, viabilidad y reacción acrosomal en espermatozoides de cerdo *in vitro*

José Nicolás Lauro Aldama Meza,¹ Reyna Fierro Pastrana,²
Mario Altamirano Lozano,³ Eduardo Madrigal Bujaidar.⁴

RESUMEN

Introducción. Los efectos de la exposición a metales en el sistema reproductor masculino han sido conocidos desde mediados del siglo XIX. Muchos compuestos metálicos han demostrado interferir con las funciones testiculares normales en animales de laboratorio y en humanos ocupacionalmente expuestos. Los sistemas *in vitro* dan un acceso experimental único a ciertos tejidos y mecanismos moleculares para mejorar la evaluación del riesgo. **Objetivo.** El objetivo de este estudio fue determinar el efecto tóxico que produce el tratamiento con compuestos de MnCl_2 , HgCl_2 , MnSO_4 , Na_3VO_4 , y V_2O_5 sobre parámetros de calidad espermáticos, utilizando un sistema *in vitro*.

Metodología. En este estudio se evaluó el efecto de algunos compuestos metálicos sobre un sistema *in vitro* de espermatozoides de cerdo: se estudiaron motilidad, viabilidad y reacción acrosomal, determinando previamente la CL_{50} para los compuestos HgCl_2 , MnCl_2 , V_2O_5 y Na_3VO_4 .

Resultados. Se determinó la CL_{50} para cada uno de los compuestos y se evaluó movilidad, viabilidad y reacción acrosomal a concentraciones fraccionarias de la CL_{50} . Los valores de las CL_{50} permitieron establecer que el HgCl_2 es más tóxico que los otros compuestos. La movilidad fue disminuida de manera significativa para HgCl_2 en todas las concentraciones en los dos últimos tiempos de incubación; para el V_2O_5 , MnSO_4 y MnCl_2 , en todas las concentraciones en el último tiempo de incubación, y para el Na_3VO_4 no fue disminuida de manera significativa. La viabilidad fue disminuida de manera significativa por el HgCl_2 y el MnCl_2 en las dos concentraciones más altas ensayadas, y para el V_2O_5 , MnSO_4 y Na_3VO_4 , solamente en la concentración más alta. La reacción acrosomal fue afectada de manera significativa en todas las concentraciones por todos los compuestos metálicos.

Conclusiones. Los datos obtenidos a través de los experimentos realizados indican que de manera ge-

1 Instituto de Ciencias Biomédicas, UACJ, Anillo Envoltante del Pronaf s/n. Email: jose.aldama@uacj.mx

2 UAM-Iztapalapa

3 Facultad de Estudios Superiores, UNAM-Zaragoza

4 Escuela Nacional de Ciencias Biológicas, IPN

neral, a pesar de que el desempeño de parámetros “gruesos” como la motilidad y la viabilidad no se vea grandemente afectado por la exposición a los compuestos metálicos ensayados, la reacción acrosomal es afectada de manera significativa, lo que repercutiría negativamente en la capacidad fertilizante del espermatozoide y la reproducción.

Palabras clave: Metales pesados, espermatozoide, in vitro, toxicidad

INTRODUCCIÓN

El desarrollo industrial y las prácticas modernas en agricultura han contribuido de una forma significativa al bienestar de la humanidad. Sin embargo, los efectos del desarrollo de ambas actividades han llevado a efectos adversos indeseables en la calidad ambiental y en la integridad de los ecosistemas (Johnson, 1996). La exposición de humanos a tóxicos químicos puede afectar la fertilidad; hay evidencia epidemiológica de que exposiciones a tóxicos químicos pueden disminuir la cantidad y calidad del esperma (Wyrobek, 1993). Por otro lado, se ha establecido que muchos químicos industriales y ambientales son espermatóxicos en el hombre (Working y Chellman, 1989; Linder y colaboradores, 1997).

Los efectos de la exposición a metales en el sistema reproductor masculino han sido conocidos desde mediados del siglo XIX, cuando el plomo se asoció con esterilidad (Sager y colaboradores, 1986).

Diversos estudios han permitido detectar la presencia de una variedad de metales pesados en el sistema reproductor de hombres con problemas reproductivos, ocupacionalmente expuestos o no (Abou-Shakra y colaboradores, 1989; Umeyama y colaboradores, 1986; Hanf y colaboradores, 1996; Alexander y colaboradores, 1996; Henkel y colaboradores, 1999; Telisman y colaboradores, 1997; Oldereid y colaboradores, 1993).

Por otro lado, también se ha evaluado su toxicidad en el sistema reproductor en otras especies

como ratón (Hsu y colaboradores, 1998; Llobet y colaboradores, 1993; Wadi y Ahmad, 1999; Llobet y colaboradores, 1995; Forgács y colaboradores, 1998), cerdo (Altamirano-Lozano y colaboradores, 1998; D’Cruz y colaboradores, 2000), bovinos (Alexaki y colaboradores, 1990; Lapointe y colaboradores, 1996), conejo (D’Cruz y Uckun, 2001) y rata (Bataneh y colaboradores, 1998; Thoreaux-Manlay y colaboradores, 1995; Sokol y Berman, 1991; Sokol y colaboradores, 1994; Mulkey y Oheme, 1993). Sin embargo, la información acerca de exposición a metales pesados en bajas concentraciones ambientalmente realistas, sobre los resultados reproductivos en machos, es limitada (Wirth y Mijal, 2010).

EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD REPRODUCTIVA

La función primaria del sistema reproductor masculino es producir esperma que fertilizará un óvulo para producir una descendencia sana. Esto implica la producción de espermatozoides en número suficiente, con adecuada movilidad y capacidad de fertilización (Chapin y colaboradores, 1992; Yanagimachi, 1994).

Hsu y colaboradores (1998) han sugerido que, dado que la reacción acrosomal es el mayor requerimiento para llevar a cabo la fertilización del ovocito, exposiciones tempranas a químicos capaces de inducir o afectar dicha reacción pueden ser deletéreas para la fertilización. La reacción acrosomal puede evaluarse por distintas metodologías; una de ellas es la tinción con aglutininas marcadas con isotiocianato de fluoresceína (FITC), como la Concanavalina A (Con A) que se obtiene de la planta *Concanavalia ensiformis*, y la aglutinina producida por la planta *Pisum sativum* (PSA). Éstas se fijan a la membrana acrosomal interna al monosacárido D-manosa y en la membrana externa a D-galactosa respectivamente (Lassalle y Testart, 1994; Menkveld y colaboradores, 1996).

Mercurio. El mercurio y casi todos sus compuestos son muy tóxicos para humanos y animales.

Se usa en la manufactura de aparatos eléctricos, producción electrolítica de cloro y sosa cáustica, productos farmacéuticos, pinturas, plásticos, uretano y cloruro de vinilo; está presente en el 40% de los pesticidas que contienen metales (Pffeifer y colaboradores, 1993; Rodges y colaboradores, 1995). En estudios generacionales, se han identificado efectos adversos del mercurio sobre la fertilidad y reproducción (Atkinson y colaboradores, 2001). Se han identificado efectos adversos en la fertilidad masculina, como la aparición de formas anormales y efectos tóxicos a nivel bioquímico, causados por los compuestos de mercurio, tanto en estudios animales como en humanos (Rao y Sharma, 2001). Choy y colaboradores (2002) han descrito una relación de las concentraciones de mercurio, en sangre y fluido seminal, con los parámetros seminales. Asimismo, se han descrito efectos tóxicos en las funciones testiculares y sobre los espermatozoides en monos (Mohamed y colaboradores, 1986 y 1987) y ratas (Chowdhury y colaboradores, 1989). Igualmente, se ha establecido que el mercurio tiene un efecto tóxico importante sobre la movilidad espermática (Altamirano-Lozano y colaboradores, 1997).

Manganeso. El manganeso es un constituyente ubicuo del ambiente y compone cerca de 0.1% de la corteza terrestre. La comida es la fuente más importante de manganeso para la población en general y la ingesta diaria varía de 2 a 9 mg, dependiendo de los hábitos nutricionales (Barceloux, 1999). Los usos del manganeso incluyen la producción de carbón y acero, baterías secas, catalizadores, vidrio, cerámica y fungicidas, así como desinfectantes, preservativos para flores y frutas y aditivos para aceites y gasolina (Agency for Toxic Substances and Disease Registry [ATSDR], 1997). Este metal se ha encontrado en hombres con problemas reproductivos en plasma seminal (Umeyama y colaboradores, 1986; Hanf y colaboradores, 1996); en animales de laboratorio se ha observado disminución de la fertilidad y de la conducta sexual (Bataineh y

colaboradores, 1998). Wu y colaboradores (1996), encontraron una relación entre las concentraciones de manganeso en esperma y parámetros espermáticos tales como volumen, concentración, viabilidad y porcentaje de movilidad, sugiriendo un efecto tóxico directo del manganeso sobre la producción de esperma.

Vanadio. El vanadio es un metal traza ampliamente distribuido. Ocupa el lugar número 21 en abundancia en la corteza terrestre (ATSDR, 1977). El uso del vanadio incluye: producción de acero y aleaciones no ferrosas, catalizador en la fabricación de plásticos, en la fabricación de semiconductores, reveladores fotográficos, agentes colorantes, pigmentos amarillos y cerámicas (Barceloux, 1999). Grandes cantidades de vanadio pueden aparecer en los depósitos de chimeneas de hornos que utilizan petróleo, particularmente del que proviene de Iraq, Irán, Kuwait, Venezuela y el Golfo de México (Sjoberg, 1955; Llobet y colaboradores, 1993). Se ha reportado que 66 000 toneladas de vanadio son liberadas a la atmósfera cada año y que esta emisión es responsable del 40% de la carga de vanadio en fuentes de agua (Nriagu y Pacyna, 1988). Por otro lado, se ha encontrado vanadio en plasma seminal de hombres con problemas de fertilidad (Abou-Shakra y colaboradores, 1989). D'Cruz y colaboradores (1998 y 2000) han evaluado la actividad espermática de compuestos orgánicos e inorgánicos con base de vanadio en espermatozoides humanos y de cerdo.

JUSTIFICACIÓN

Debido a que la exposición generalizada y la carga corporal de metales pesados han sido demostradas en humanos, hay una preocupación creciente sobre sus efectos adversos en la salud a bajas concentraciones ambientales. Evidencias encontradas, tanto en humanos como en animales, sugieren que concentraciones relativamente bajas de estos metales pueden tener impactos negativos sobre la salud reproductiva masculina (Meeker y colaboradores, 2008).

En años recientes, se ha registrado un interés creciente en el estudio de la correlación de exposiciones ambientales y ocupacionales en el declinamiento de concentraciones espermáticas, así como en la infertilidad masculina.

Los estudios de reprotoxicidad para estos metales y algunos de sus derivados sólo se han hecho de manera parcial. En la mayoría de los casos se han hecho estudios empleando animales completos; son muy pocos los estudios en células gaméticas, y menos aún a nivel de la reacción acrosomal, a pesar de la importancia de ésta para la fertilización.

OBJETIVO GENERAL

Evaluar la toxicidad de los compuestos metálicos: cloruro de mercurio (HgCl_2), cloruro de manganeso (MnCl_2), sulfato de manganeso (MnSO_4), pentóxido de vanadio (V_2O_5) y ortovanadato de sodio (Na_3VO_4) en espermatozoides de cerdo *in vitro*.

OBJETIVOS PARTICULARES

Determinar la concentración letal 50 (CL_{50}) de los compuestos químicos cloruro de mercurio (HgCl_2), cloruro de manganeso (MnCl_2), sulfato de manganeso (MnSO_4), pentóxido de vanadio (V_2O_5) y ortovanadato de sodio (Na_3VO_4). Evaluar el efecto tóxico de dichos compuestos sobre la movilidad, viabilidad y reacción acrosomal de los espermatozoides de cerdo *in vitro*.

MATERIALES Y MÉTODOS

Obtención y transporte del semen. Se utilizaron muestras de semen de cerdo, obtenidas de sementales sanos y fertilidad comprobada, de granjas porcícolas aledañas a la ciudad de México, DF. Se determinaron concentración de espermatozoides, movilidad progresiva, viabilidad y número de formas anormales. Se utilizaron solamente las muestras que se clasificaron como normales de acuerdo a criterios ya establecidos, tales como una concentración mayor a 300×10^6 espermatozoides/ml,

movilidad progresiva igual o mayor al 85% y menos de 5% de formas anormales (Garner y Hafez, 1993; WHO, 2003).

1. Determinación de la CL_{50} , movilidad, y viabilidad. Placas de micropozos (Nunc, Denmark) con suspensiones de espermatozoides a una concentración de 15×10^6 espermatozoides/ml en una placa de 24 micropozos y compuestos metálicos. Fueron incubadas en medio de capacitación TALP-HEPES suplementado con BSA (6 mg/ml) y Piruvato de Sodio 1 mM a un pH de 7.4 y temperatura de 39 °C, con una osmolaridad de 280-300 mOsm, esterilizado por filtración con una membrana de 0.22 μm en atmósfera húmeda y con 5 % de CO_2 (Betancourt y colaboradores, 1998). Se agregaron las soluciones de metales en el mismo medio para lograr las concentraciones finales de HgCl_2 5 μM , 10 μM , 15 μM , 20 μM y 25 μM ; V_2O_5 y Na_2VO_4 32.2 μM , 62.5 μM , 90.9 μM , 117.6 μM y 166.6 μM ; MnCl_2 y MnSO_4 76.9 μM , 142.8 μM , 250 μM , 250 μM y 285.7 μM , a volumen final de 1 ml por pozo (todos los compuestos de Sigma Chemical Company, USA, excepto el V_2O_5 de Aldrich Chemical Company, USA). En la obtención de las CL_{50} para los compuestos metálicos, se empleó el método Probit, empleando la versión 1.5 del programa distribuido por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de Norteamérica (US EPA, 1999) y usando los datos de la quinta hora de incubación. Para determinar la viabilidad se extrajeron alícuotas de la suspensión de espermatozoides a las 1, 2, 3, 4 y 5 horas de incubación y se determinó su viabilidad mediante la tinción de eosina-nigrosina. La movilidad se determinó haciendo observaciones de las suspensiones celulares en microscopio invertido a las 1, 2, 3, 4 y 5 horas del proceso de incubación y asignándoles porcentajes de movilidad progresiva comparadas con el control.

A partir de los datos de CL_{50} obtenidos, se realizó otra ronda de estudios en las mismas condiciones descritas previamente y resuspendiendo las células de manera periódica. Se extrajeron alícuo-

tas de 10 ml de suspensión celular a las 1, 2, 3, 4 y 5 horas y se les determinó la viabilidad, así como determinaciones de la movilidad a $CL_{50/5}$, $CL_{50/10}$ y $CL_{50/20}$. Todos los experimentos se realizaron por triplicado para cada compuesto.

2. *Evaluación de la reacción acrosomal.* Al término del proceso de incubación de 5 horas, en condiciones y concentraciones iguales a los anteriores experimentos, se indujo la reacción acrosomal agregando solución de progesterona en los micropozos a una concentración final de 10 $\mu\text{g/ml}$ y se continuó con la incubación por 20 minutos.

Se tomó una alícuota de la suspensión celular previamente fijada con etanol y se realizó la evaluación de la reacción acrosomal con el uso de la lectina Concanavalina A, usando un microscopio

de epifluorescencia para evaluar el estado del acrosoma.

3. *Análisis estadístico.* El análisis de los datos se realizó mediante la prueba *t* de Student con un nivel de confianza de $p < 0.05$. Los resultados se expresaron en promedios \pm la desviación estándar.

RESULTADOS

Viabilidad. Para todos los compuestos metálicos ensayados: HgCl_2 , V_2O_5 , MnSO_4 , MnCl_2 , y Na_3VO_4 , los resultados indican una disminución de la viabilidad con respecto al tiempo de incubación y a la concentración del compuesto utilizado. Las siguientes tablas muestran los resultados de viabilidad. Se describen promedios \pm desviación estándar.

Tabla 1. Viabilidad de espermatozoides tratados con HgCl_2

| Tiempo (horas) | | | | | | |
|------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Tratamientos | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Control | 93.7 \pm 0.6 | 92.7 \pm 0.6 | 91.3 \pm 0.6 | 90 \pm 1 | 88.7 \pm 0.6 | 87 \pm 1 |
| 5 μM | 85 \pm 3.6 | 82.7 \pm 3.2 | 80.7 \pm 2.5 | 76.7 \pm 2.5 | 75.7 \pm 2.5 | 70 \pm 1 |
| 10 μM | 82.3 \pm 3.6 | 80.3 \pm 3.2 | 77.7 \pm 3.5 | 72.7 \pm 2.5 | 70.7 \pm 2.5 | 66.3 \pm 0.6 |
| 15 μM | 81.7 \pm 3.6 | 82 \pm 3.6 | 63.3 \pm 2.5 | 64.3 \pm 2.5 | 51.7 \pm 3.2 | 41 \pm 3.2 |
| 20 μM | 73.7 \pm 3.6 | 66 \pm 2.5 | 56.3 \pm 2.5 | 50.7 \pm 3.5 | 46.7 \pm 3.5 | 34 \pm 3.5 |
| 25 μM | 56 \pm 3.6 | 55.7 \pm 2.5 | 49.3 \pm 3.5 | 43.3 \pm 2.5 | 36.7 \pm 3.5 | 23.7 \pm 1.5 |

Se hizo cada experimento tres veces, corriendo un duplicado para cada caso, contando 100 células por preparación. Existe diferencia significativa con respecto al control en todos los casos. Prueba t de Student $p < 0.05$.

Tabla 2. Viabilidad de espermatozoides tratados con MnCl₂

| Tiempo (horas) | | | | | | |
|----------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Tratamientos | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Control | 93.3±0.6 | 92±1 | 88.7±3.1 | 86.7±3.2 | 85.±4.4 | 81.7±3.2 |
| 76.9µM | 90.7±0.6 | 81.7±1.1 | 73.7±1.1 | 67.3±1.5 | 59±1 | 52.3±0.6 |
| 142.8µM | 86.3±0.6 | 79.7±0.6 | 72±0.6 | 64.7±1.9 | 56±1 | 48.7±0.6 |
| 200µM | 83.3±0.6 | 76.3±0.6 | 69.3±0.6 | 60.7±0.6 | 50.3±1.5 | 41.7±0.6 |
| 250µM | 80.3±1.1 | 74.7±0.6 | 67.7±0.6 | 53.3±0.6 | 47.3±1.5 | 37.3±0.6 |
| 285.7µM | 79±1 | 72.7±1.1 | 66±1 | 49.3±1.5 | 41.7±2 | 31.7±1 |

Se hizo cada experimento tres veces corriendo un duplicado para cada caso, contando 100 células por preparación. Existe diferencia significativa con respecto al control en todos los casos. Prueba t de Student $p < 0.0$

Tabla 3. Viabilidad de espermatozoides tratados con V2O₅

| Tiempo (horas) | | | | | | |
|----------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Tratamientos | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Control | 93.3±0.6 | 91.7±0.6 | 90.7±1.5 | 88.3±2.1 | 86±2.6 | 82.7±2.5 |
| 32.2µM | 86±4 | 80.7±3.5 | 75.3±6.5 | 72.3±7.8 | 68.7±4. | 64.3±3.1 |
| 62.5µM | 83±4.6 | 77±4 | 72.3±8.1 | 69±7.9 | 65±3 | 58.7±4.7 |
| 90.9µM | 81±5.6 | 74.7±3.1 | 68.7±5 | 65±5.2 | 60.7±1.1 | 46.7±4.2 |
| 117.6µM | 78.7±4.5 | 72.3±0.6 | 64.7±4.7 | 62.3±5.9 | 57.7±3.1 | 40.3±3. |
| 166.6µM | 75.7±4.7 | 69.3±2.6 | 61±5.6 | 58±4 | 54±3 | 34.7±1.1 |

Se hizo cada experimento tres veces corriendo un duplicado para cada caso, contando 100 células por preparación. Existe diferencia significativa con respecto al control en todos los casos. Prueba t de Student $p < 0.05$.

Tabla 4. Viabilidad de espermatozoides tratados con Na₃VO₄

| Tiempo (horas) | | | | | | |
|----------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Tratamientos | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Control | 93.7±0.6 | 91.7±0.6 | 88.7±0.6 | 86.7±0.6 | 85.7±0.6 | 81.3±0.6 |
| 32.2µM | 87.3±0.6 | 83±1 | 79.7±0.6 | 78.3±0.6 | 70.3±1.5 | 67.7±0.6 |
| 62.5µM | 84±1 | 79.7±0.6 | 77.3±0.6 | 76±1 | 67.3±1.5 | 64.7±0.6 |
| 90.9µM | 81±1.7 | 74.3±3.5 | 69.7±6.5 | 63±3.6 | 57.3±0.6 | 50.7±3.5 |
| 117.6µM | 77.3±2.5 | 72.3±3.2 | 65.7±5.5 | 58.7±5 | 46.7±0.6 | 44.7±4.7 |
| 166.6µM | 72.7±0.6 | 60.3±1.5 | 58.7±2.1 | 46.3±1.6 | 41.3±1.5 | 28.3±1 |

Se hizo cada experimento tres veces corriendo un duplicado para cada caso, contando 100 células por preparación. Existe diferencia significativa con respecto al control en todos los casos. Prueba t de Student $p < 0.05$.

Tabla 5. Viabilidad de espermatozoides tratados con MnSO₄

| Tiempo (horas) | | | | | | |
|----------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Tratamientos | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Control | 93.3±0.6 | 91.7±0.6 | 89±1 | 86.3±0.6 | 83.3±0.6 | 81±1 |
| 76.9µM | 85±0.6 | 69±1 | 57±1 | 54.7±1.5 | 49.7±0.6 | 47.7±0.6 |
| 142.8µM | 80.3±0.6 | 56.7±0.6 | 52.3±2.5 | 47±3 | 43.3±2.1 | 39.7±0.6 |
| 200µM | 76.7±1.5 | 52±2 | 44.3±3.5 | 43.7±3.2 | 38.7±2.3 | 36.3±3.1 |
| 250µM | 73.3±1.1 | 48±2 | 42.8±3.6 | 35±1 | 31.7±1.1 | 29.7±0.6 |
| 285.7µM | 69.7±2.5 | 43.3±1.1 | 38.3±1.5 | 30±1 | 25.7±2.5 | 23.3±1.1 |

Se hizo cada experimento tres veces corriendo un duplicado para cada caso, contando 100 células por preparación. Existe diferencia significativa con respecto al control en todos los casos. Prueba t de Student $p < 0.05$.

Determinación de la CL₅₀. El valor más bajo obtenido, y por lo tanto indicativo de que es el compuesto más tóxico, corresponde al HgCl₂. En los demás compuestos se obtuvieron valores más altos, siendo mayores en los compuestos de manganeso; el V₂O₅ fue 8 veces más alto; el Na₃VO₄, 8.3 veces; el MnSO₄, 9.5 veces; y el MnCl₂, 10 veces más alto. Los valores obtenidos se muestran en la siguiente tabla.

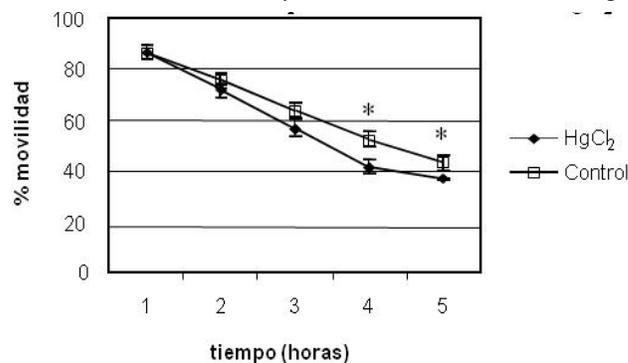
Tabla 6. CL_{50} para los diferentes compuestos

| Compuesto | CL_{50} (μM) |
|--------------------------|-----------------------------|
| HgCl_2 | 11.83 |
| V_2O_5 | 95.01 |
| Na_3VO_4 | 97.81 |
| MnSO_4 | 112.23 |
| MnCl_2 | 118.70 |

Movilidad a concentraciones $CL_{50/5}$, $CL_{50/10}$ y $CL_{50/20}$. En el caso del HgCl_2 , para las concentraciones de $0.59 \mu\text{M}$, $1.12 \mu\text{M}$ y $2.37 \mu\text{M}$ ($CL_{50/5}$, $CL_{50/10}$ y $CL_{50/20}$, respectivamente), se encontró una diferencia significativa en todas las concentraciones a las 4 y 5 horas de incubación con respecto al control. Con respecto al V_2O_5 a concentraciones de $4.75 \mu\text{M}$, $9.5 \mu\text{M}$, y $19 \mu\text{M}$, la movilidad tuvo una diferencia significativa con respecto al control en todas las concentraciones a las 5 horas de incubación. Para el MnSO_4 a concentraciones de $5.61 \mu\text{M}$, $11.22 \mu\text{M}$ y $22.45 \mu\text{M}$, sólo se determinó una diferencia significativa con respecto al control en el tiempo 5 de incubación para todas las concentraciones utilizadas, al igual que para MnCl_2 a concentraciones de $5.93 \mu\text{M}$, $11.87 \mu\text{M}$ y $23.74 \mu\text{M}$. Con el Na_2VO_4 a concentraciones de $4.89 \mu\text{M}$, $9.78 \mu\text{M}$ y $19.56 \mu\text{M}$, no se encontró diferencia significativa con respecto al control para ninguna de las concentraciones ensayadas y en ningún tiempo de incubación.

Las siguientes gráficas muestran los resultados de movilidad. Se grafican promedios \pm desviación estándar (DS).

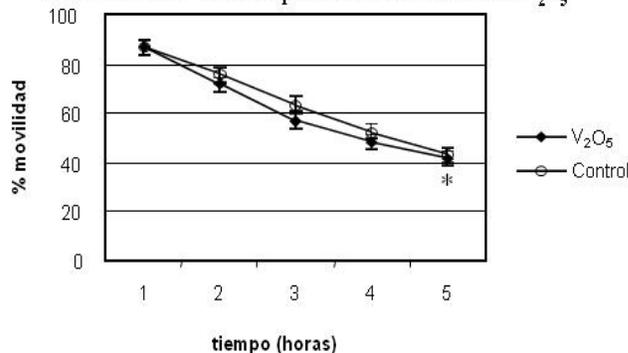
Gráfica 1.- Movilidad de espermatozoides tratados con HgCl_2



*Diferencia significativa a $p < 0.05$. Prueba t de Student.
La curva representa todas las concentraciones

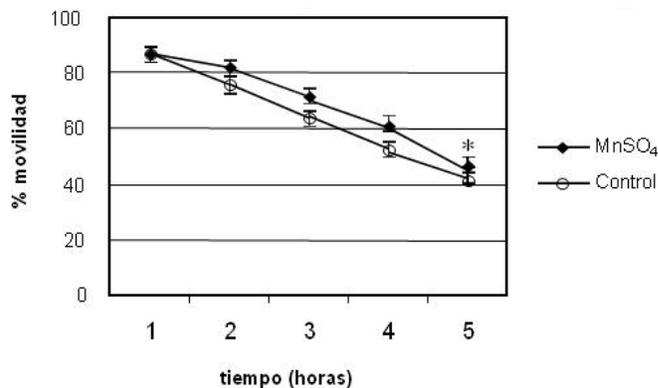
Gráfica 2.- Movilidad de espermatozoides tratados con V_2O_5

Gráfica 2.- Movilidad de espermatozoides tratados con V_2O_5



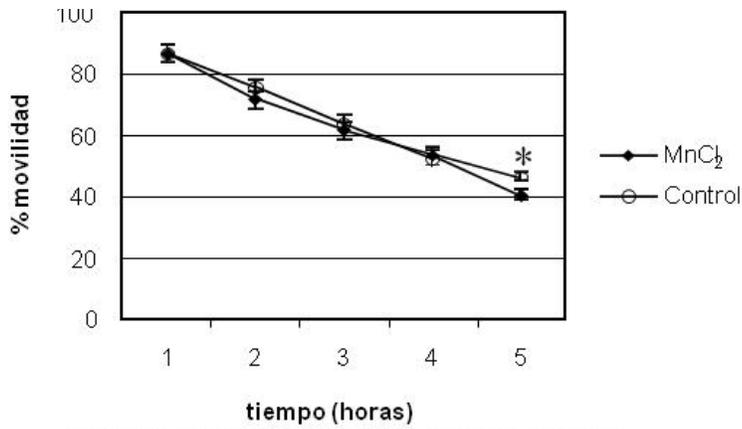
* Diferencia significativa a $p < 0.05$. Prueba t de Student.
La curva representa todas las concentraciones.

Gráfica 3.- Movilidad de espermatozoides tratados con MnSO_4



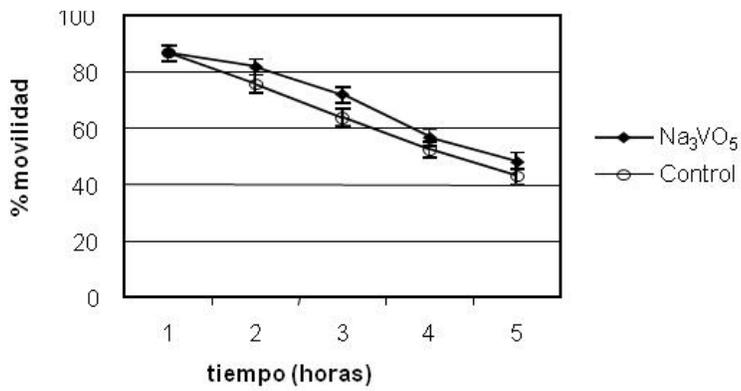
* Diferencia significativa a $p < 0.05$. Prueba t de Student.
La curva representa todas las concentraciones.

Gráfica 4.- Movilidad de espermatozoides tratados con $MnCl_2$



*Diferencia significativa a $p < 0.05$. Prueba t de Student
La curva representa todas las concentraciones.

Gráfica 5.- Movilidad de espermatozoides tratados con Na_3VO_5

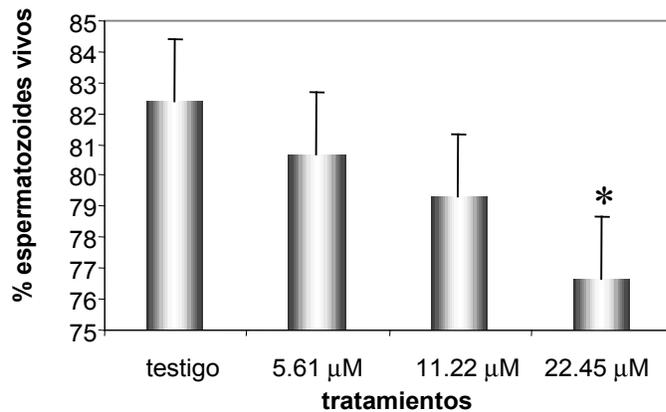


*Diferencia significativa a $p < 0.05$. Prueba t de Student
La curva representa todas las concentraciones

Viabilidad a concentraciones $CL_{50/5}$, $CL_{50/10}$ y $CL_{50/20}$. En el caso del $MnSO_4$, V_2O_5 y Na_3VO_4 , se encontró una diferencia significativa en la concentraciones más altas en

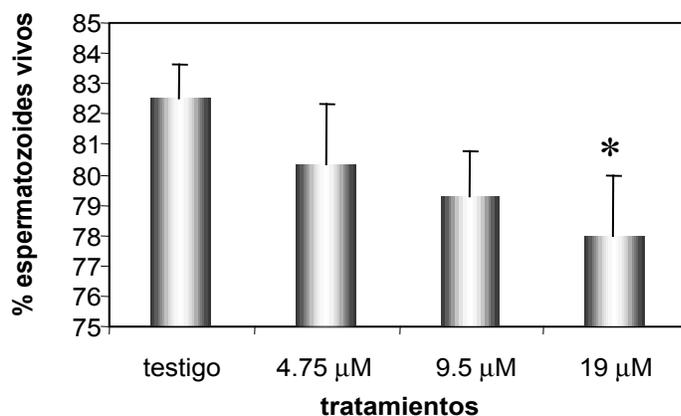
yadas, que fueron de $22.45 \mu M$, $19 \mu M$ y $19.56 \mu M$, respectivamente. Para el $HgCl$ se encontró diferencia significativa para las concentraciones de $1.12 \mu M$ y $2.37 \mu M$; éstas son las dos concentraciones más altas ensayadas, sucediendo lo mismo para $MnCl_2$, a $11.87 \mu M$ y $23.74 \mu M$. En las siguientes gráficas se describen resultados de los experimentos de viabilidad.

Gráfica 6.- Viabilidad de espermatozoides tratados con $MnSO_4$



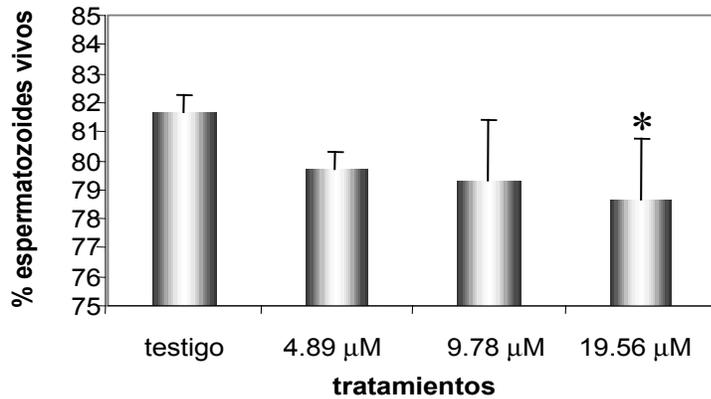
*Diferencia significativa a $p < 0.05$. Prueba t de Student

Gráfica 7.- Viabilidad de espermatozoides tratados con V_2O_5



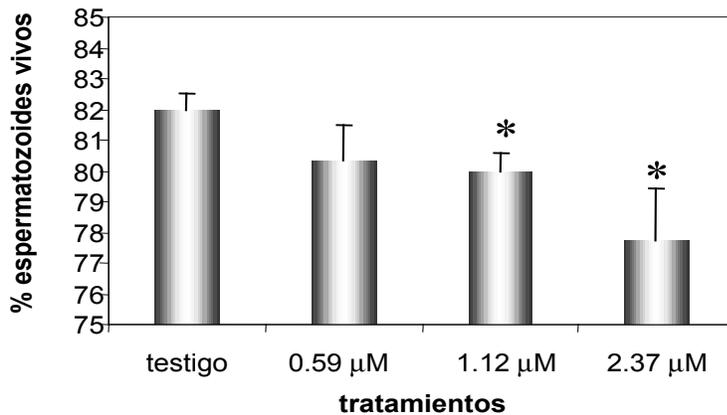
* Diferencia significativa a $p < 0.05$. Prueba t de Student

Gráfica 8.- Viabilidad de espermatozoides tratados con Na_3VO_4



* Diferencia significativa a $p < 0.05$. Prueba t de Student

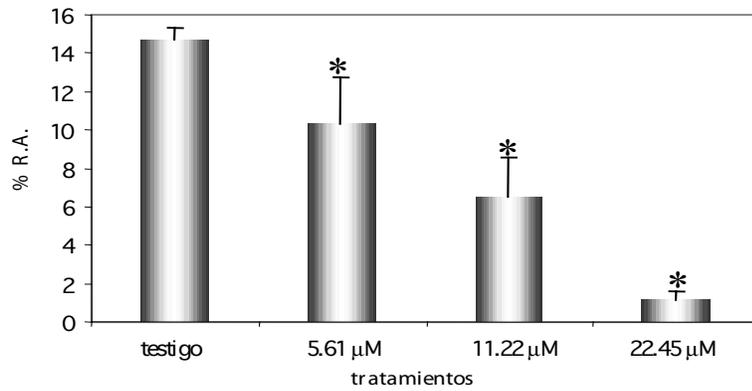
Gráfica 9.- Viabilidad de espermatozoides tratados con HgCl_2



* Diferencia significativa a $p < 0.05$. Prueba t de Student

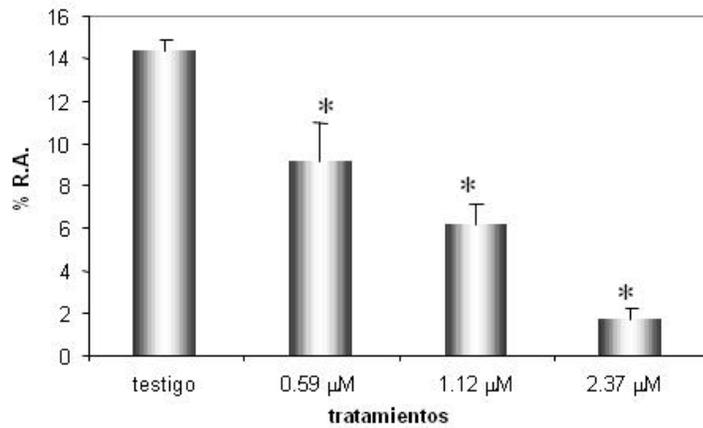
Reacción acrosomal. Para el MnSO_4 , a las concentraciones de 5.61 μM , 11.22 μM y 22.45 μM ; HgCl_2 a 0.59 μM , 1.12 μM y 2.37 μM , Na_3VO_4 a 4.89 μM , 9.78 μM y 19.56 μM ; V_2O_5 a concentraciones de 4.75 μM , 9.5 μM y 19 μM y para MnCl_2 a concentraciones de 5.93 μM , 11.87 μM y 23.74 μM , se observaron disminuciones significativas de la reacción acrosomal inducida con progesterona a una concentración final de 10 $\mu\text{g/ml}$ con respecto al control. Se grafican promedios y DS.

Gráfica 11.- Reacción acrosomal en el tratamiento con $MnSO_4$



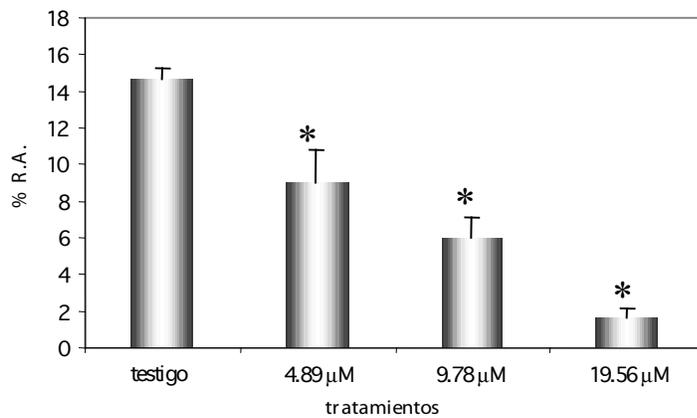
* Diferencia significativa a $p < 0.05$. Prueba t de Student

Gráfica 12.- Reacción acrosomal en el tratamiento con $HgCl_2$



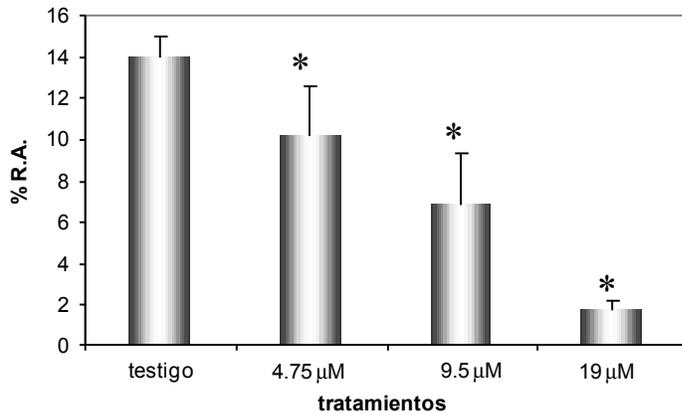
* Diferencia significativa a $p < 0.05$. Prueba t de Student

Gráfica 13.- Reacción acrosomal en el tratamiento con Na_3VO_4



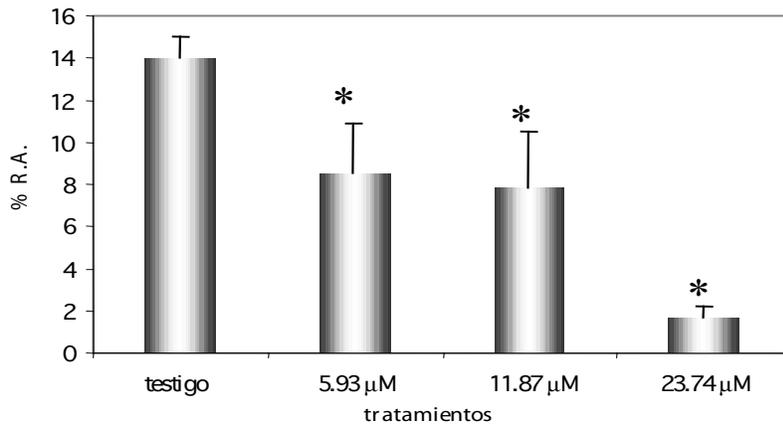
* Diferencia significativa a $p < 0.05$. Prueba t de Student

Gráfica 14.- Reacción acrosomal en el tratamiento con V_2O_5



* Diferencia significativa a $p < 0.05$. Prueba t de Student

Gráfica 15.- Reacción acrosomal en el tratamiento con $MnCl_2$



* Diferencia significativa a $p < 0.05$. Prueba t de Student

DISCUSIÓN

Diversos estudios han señalado sistemáticamente el impacto de las exposiciones ambientales sobre la salud humana en general (Buchankova y colaboradores, 1994; Staessen y colaboradores, 1996) o sobre la función reproductiva. Los datos sugieren que valores altos de partículas finas acarreadas por el aire están asociadas con una disminución de la calidad espermática, como por ejemplo, con un incremento en las aberraciones morfológicas y baja movilidad (Benoff y colaboradores, 2000); metales pesados como el manganeso, mercurio, vanadio y otros son componentes comunes de estas partí-

culas finas, las cuales están dentro de un intervalo de tamaño respirable (Ragan y Mast, 1990). En el caso de la contaminación atmosférica, los estudios sugieren una relación entre los contaminantes en el aire y varias características seminales. Se requiere investigación adicional para corroborar esta asociación y para establecer los agentes causales (Jurawicz y colaboradores, 2009).

De manera general, los resultados de viabilidad en el primer experimento nos indican que existe una relación directa entre la concentración de los metales pesados que se utilizaron y la disminución de espermatozoides vivos en relación con el tiem-

po. Aunque esto ocurre en todos los compuestos metálicos, es de notarse que las concentraciones del HgCl_2 son las más bajas y que causan un efecto sobre la viabilidad, similar al de las concentraciones de los otros compuestos metálicos, que son comparativamente más altas; es decir, su efecto tóxico es mayor. En un estudio realizado por Sharma y colaboradores (1996) administrando por vía oral HgCl_2 a ratones machos por 30 días; en otro estudio, con la misma especie de experimentación (Rao y Sharma, 2001), pero por 45 días, utilizando una concentración de 1.25 mg/kg/día en ambos casos, se encontró una disminución significativa de la viabilidad, cuenta espermática y movilidad, así como de otros parámetros de índole tisular y bioquímica. Esto demuestra que aún tratándose de estudios *in vivo* a muy bajas concentraciones, y a pesar de que es muy probable que la concentración final del metal tóxico que llega al aparato reproductor sea muy baja, como en el caso de las utilizadas en el presente estudio, la reprotoxicidad del HgCl_2 sigue siendo muy significativa.

Los resultados de movilidad para Na_3VO_4 y V_2O_5 obtenidos en nuestro trabajo son similares a los obtenidos por D'Cruz y colaboradores (1998) y Gibbons y colaboradores, (1978), quienes reportan que no se presenta una inhibición significativa de la movilidad de los espermatozoides en las concentraciones utilizadas por ellos para el efecto. Para el V_2O_5 se observó una diferencia significativa sólo en el último tiempo de incubación, de manera similar a los resultados obtenidos por Altamirano-Lozano y colaboradores (1997). Para el Na_3VO_4 no se observó diferencia significativa en ningún tiempo. Por otro lado, Llobet y colaboradores (1993), experimentando con metavanadato de sodio (VNaO_3) administrado por vía oral en ratones machos durante un tratamiento de 64 días, observaron que a concentraciones de 40, 60 y 80 mg/kg por día la cuenta espermática disminuyó de manera significativa, mientras que la movilidad no fue afectada. Altamirano y colaboradores (1998), en un estudio realizado en ratones durante un tratamiento de 60

días, ensayando el efecto de V_2O_5 a una concentración de 8.5 mg/g de peso, administrado cada tres días, encontró una disminución significativa en la cuenta y movilidad espermática 50 y 60 días después de la primera dosis de tratamiento. Al igual que en el caso del HgCl_2 , este resultado de un estudio subcrónico demuestra que es posible causar efectos adversos en las células espermáticas con concentraciones bajas de los metales tóxicos, lo que tiene correlación con los resultados obtenidos *in vitro* en el presente estudio.

Los resultados de movilidad de los espermatozoides tratados con HgCl_2 fueron similares a los de los otros metales. Las concentraciones utilizadas para este compuesto fueron bajas (5 μM , 10 μM , 15 μM , y 20 μM), por lo que no se afectó visiblemente la movilidad, teniendo resultados similares a los obtenidos por Ernst y Glenn (1991), quienes trabajando con espermatozoides humanos en condiciones similares al presente trabajo, encontraron que la movilidad se ve afectada de una manera dependiente de la concentración por compuestos de mercurio y que este efecto disminuye cuando se trata de concentraciones bajas. En un estudio realizado por Eggert-Kruse y colaboradores (1992), utilizando espermatozoides humanos en un sistema *in vitro* y aplicando concentraciones de HgCl_2 en el rango de las halladas *in vivo* (0.005-0.5 mmol), se observó una disminución de la movilidad, la progresión lineal y la profundidad de penetración en moco cervical, en relación con la concentración.

La exposición *in vitro* de esperma humana, a concentraciones de mercurio de 50 a 800 mmol/l (10.0 a 160.4 mg/l), indujeron peroxidación de lípidos de membrana y rupturas de ADN, disminución de la viabilidad y disminución de la reacción acrosomal, provocando disfunción espermática (Arabi y Heydarnejad, 2007).

Las concentraciones utilizadas para este compuesto, en el presente trabajo, son similares a las utilizadas por los autores referidos; comparadas con las de los otros compuestos analizados, son muy bajas.

Los resultados de estudio de movilidad para MnCl_2 y MnSO_4 , sólo mostraron una diferencia significativa para todas las concentraciones del último tiempo de incubación ensayado; estos compuestos son los que tuvieron una CL_{50} más alta, por lo que se puede afirmar que su toxicidad es más baja. De manera similar, Huang y colaboradores (2001), encontraron que el ion manganeso (Mn^+) a altas concentraciones, inhibe la movilidad de manera significativa en espermatozoides humanos; asimismo, Magnus y colaboradores (1990) observaron este efecto en concentraciones superiores a 20 mM, también en espermatozoides humanos. Esta misma observación, en espermatozoides de origen bovino, fue hecha por Lapointe y colaboradores (1996), utilizando una concentración de 0.5 mM de MnCl_2 . Estos mismos autores informan sobre una estimulación de la movilidad a concentraciones bajas de MnCl_2 (0.1 mM), al igual que Magnus y colaboradores (1990) en un rango de concentraciones de MnCl_2 de 1.2-1.0 mM. En contraste, Cheng y Boettcher (1981) no encontraron un efecto significativo en la movilidad y capacidad de migración de los espermatozoides humanos utilizando concentraciones de 10 mM de MnCl_2 .

En reportes de exposiciones ambientales a niveles altos de manganeso, y en resultados reproductivos en clientes de clínicas de infertilidad, niveles altos de manganeso fueron asociados con alto riesgo de baja movilidad y concentraciones espermáticas bajas (Wirth y colaboradores, 2007).

El único compuesto donde se observaron diferencias significativas respecto a la movilidad en los dos últimos tiempos de incubación, fue el HgCl_2 , mientras que para los compuestos MnCl_2 y MnSO_4 se observó una diferencia significativa sólo en el último tiempo de incubación, para todas las concentraciones.

Para el ensayo con V_2O_5 , se observó una diferencia significativa de movilidad en el último tiempo de incubación, para todas las concentraciones, mientras que para el Na_3VO_4 no se observó una diferencia significativa en ningún tiempo de incuba-

ción y en ninguna concentración; estos resultados concuerdan con los descritos por D'Cruz y colaboradores (1998).

En el segundo experimento, los resultados de viabilidad para el MnCl_2 indican una diferencia significativa para las dos concentraciones más altas utilizadas, en comparación con MnSO_4 , en el cual sólo con la concentración más alta se obtuvo una diferencia significativa.

Los resultados de viabilidad para HgCl_2 indican que existe una diferencia significativa en las dos concentraciones más altas (15 μM y 20 μM), lo que concuerda con los resultados obtenidos por Sharma y colaboradores (1996), en su estudio sobre el efecto tóxico de una dosis oral de 1.25 mg/kg por 30 días en ratón. Sin embargo, no se encontró en este trabajo una diferencia significativa para la concentración más baja (5 μM).

Con el Na_3VO_4 y V_2O_5 los resultados son similares, ya que sólo se observa en ambos compuestos una diferencia significativa en la concentración más alta utilizada en el ensayo.

Se observó que el HgCl_2 y el MnCl_2 presentaron diferencias significativas en las dos concentraciones más altas, mientras que los demás compuestos sólo difieren en la concentración más alta utilizada.

Con el HgCl_2 , la reacción acrosomal se ve afectada negativamente, mostrando una inhibición directamente relacionada con la concentración utilizada de tóxico. Esta inhibición se observa en todas las concentraciones ensayadas, en contraste con los datos obtenidos de movilidad y viabilidad para el mismo compuesto, en los cuales se obtuvieron diferencias significativas sólo en los dos últimos tiempos de incubación para la movilidad y en las dos concentraciones más altas para la viabilidad. Ernst y Glenn (1991) han establecido que el acrosoma es uno de los sitios del espermatozoide a los cuales el mercurio se une.

Ocurre algo similar en el caso del MnSO_4 y MnCl_2 . Para ambos compuestos se observó una disminución significativa de la reacción acrosomal

en todas las concentraciones ensayadas, mientras que para la movilidad, también en ambos, sólo se encuentra una diferencia significativa en el último tiempo de incubación. Para el MnSO_4 , con respecto a la viabilidad se observó una diferencia significativa en la concentración más alta, mientras que para el MnCl_2 se observaron diferencias significativas en las dos concentraciones más altas, teniendo este compuesto un comportamiento similar en cuanto a resultados con el HgCl_2 . Estos datos contrastan con los obtenidos por Guerrero y colaboradores (1998) en espermatozoides de erizo de mar, donde no encontraron una afectación de la reacción acrosomal por Mn^+ . Esto puede indicar que la capacitación podría ser el parámetro afectado durante la incubación.

En el caso del Na_3VO_4 se obtuvo también una disminución de la reacción acrosomal, encontrándose diferencias significativas para todas las concentraciones ensayadas; en cuanto a movilidad, no se encontró una diferencia significativa en ningún tiempo de incubación, y para la viabilidad se encontró diferencia significativa sólo en la concentración más alta.

En el caso del V_2O_5 , se observó una disminución de la reacción acrosomal, encontrándose diferencias significativas para todas las concentraciones ensayadas; los datos de movilidad indican una diferencia significativa en el último tiempo de incubación para todas las concentraciones ensayadas. Para la viabilidad, se encontró una diferencia significativa a la concentración más alta.

Los datos obtenidos a través de los experimentos realizados indican que, de manera general, a pesar de que el desempeño de parámetros “gruesos” como la movilidad y la viabilidad no se vea grandemente afectado por la exposición a los compuestos metálicos ensayados, la reacción acrosomal puede ser afectada de manera significativa, y con esto, el proceso de fecundación.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en el presente trabajo

con cada uno de los compuestos metálicos ensayados, nos indican que los compuestos metálicos evaluados tienen un efecto negativo sobre la movilidad espermática; sin embargo, éste depende de la concentración de los compuestos y del tiempo de incubación en el medio. Aunque tienen un efecto negativo sobre la viabilidad, a concentraciones bajas este efecto disminuye el porcentaje de reacción acrosomal, evento muy importante en el proceso de fertilización. Ésta se ve afectada aun a concentraciones muy bajas de los compuestos metálicos ensayados. Este hallazgo es de suma importancia, ya que existen estudios en los que se reporta que algunos metales pesados no afectan la movilidad y viabilidad de los espermatozoides, pero sí tienen capacidad para afectar la reacción acrosomal, y por lo tanto, tendrían un impacto significativo sobre la reproducción.

BIBLIOGRAFÍA

- Abou-Shakra, F.R., Ward, N.I., Everard, D.M. (1989) The role of trace elements in male infertility. *Fertil Steril* 52: 307-310.
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry (1997) ATSDR's Toxicological profile for manganese. Lewis Publishers, CRC Press. Boca Raton, Florida.
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry (1997) ATSDR's Toxicological profile: vanadium. Lewis Publishers, CRC Press. Boca Raton, Florida.
- Alexander, B.H., Checkoway, H., van Netten, C., Muller, C.H., Ewers, T.G., Kaufmann, J.D., Mueller, B.A., Vaughan, T.L., Faustman, E.M. (1996) Semen quality of men employed at lead smelter. *Occup Environ Med* 53: 411-416.
- Alexaki, E., Samara, C., Alexopoulos, C., Tsafaris, F., Smokovitis, A. (1990) Detection of lead in blood, seminal plasma, and spermatozoa in bulls. Effect in vitro of lead acetate on sperm motility. *Bull Environ Contam Toxicol* 45: 824-825.
- Altamirano-Lozano, M., Roldán Reyes, E., Boni-

- Illa, E., Betancourt, M. (1997) Effect of some metal compounds on sperm motility in vitro. *Med Sci Res* 25: 147-150.
- Altamirano-Lozano, M., Roldán Reyes, E., Bonilla, E., Betancourt, M. (1998) Effect of some metal compounds on boar sperm motility in vitro. En: *Reproductive Toxicology*. Editado por Del Mazo, Plenum Press, New York.
- Arabi, M. and Heydarnejad, M. S. (2007) In vitro mercury exposure on spermatozoa from normospermic individuals. *Pak J Biol Sci* 10: 2448-2453.
- Atkinson, A., Thompson, S.J., Khan, A.T., Graham, T.C., Ali, S., Shannon, C., Clarke, O., Upchurch, L. (2001) Assessment of two-generation reproductive and fertility study of mercuric chloride in rats. *Food Chem Toxicol* 39: 73-84.
- Barceloux, D.G. (1999) Vanadium. *J Clin Toxicol* 37: 265-278.
- Barceloux, D.G. (1999) Manganese. *J Clin Toxicol* 37: 293-306.
- Bataineh, H., Al-Hamood, M.H., Elbetieha, A.M. (1998) Assessment of aggression, sexual behavior and fertility in adult male rat following long term ingestion of four industrial metals salts. *Human Exp Toxicol* 17: 570-576.
- Betancourt, M., Ducolomb, Y., Jiménez, I., Casas, E., Bonilla, E., Berger, T. (1998) Sperm plasma membrane receptors for the porcine oocyte plasma membrane. *Zygote* 6: 155-158.
- Buchankova, J., Knizkova, M., Hyllova, D. (1994) Content of the selected trace elements (Al, As, Cd, Cu, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb, Zn) in blood, urine and hair of blood donors without occupational exposure to these metals. *Cent Eur J Public Health* 2: 82-87.
- Chapin, R.E., Filler, R.S., Gulati, D., Heindel, J.J., Katz, D.F., Mebus, C.A., Obasaju, F., Perrault, S.D., Russell, S.R., Schrader, S., Slott, V., Sokol, R.S., Toth, G. (1992) Methods for assessing rat sperm motility. *Reprod Toxicol* 6: 267-273.
- Cheng, C.Y., Boettcher, B. (1981) Effect of cAMP, Mn²⁺, and phosphodiesterase inhibitors on human sperm motility. *Arch Androl* 7: 313-317.
- Chowdhury, A.R., Makhija, S., Vachrajani, K.D., Gautam, A.K. (1989) Methylmercury and mercuric chloride-induced alterations in rat epididymal sperm. *Toxicol Lett* 47: 125-134.
- Choy, C.M., Yeung, Q.S., Briton-Jones, C.M., Cheung, C.K., Lam, C.W., Haines, C.J. (2002) Relationship between semen parameters and mercury concentrations in blood and in seminal fluid from subfertile males in Hong Kong. *Fertil Steril* 78: 426-428.
- D'Cruz, Osmond, J., Ghosh, P., Uckun, Fatih, M. (1998) Spermicidal activity of metallocene complexes containing vanadium (IV) in humans. *Biol Reprod* 58: 1515-1526.
- D'Cruz, Osmond, J., Uckun, Fatih, M. (2001) Intra-vaginal toxicity studies of a gel microemulsion formulation of spermicidal vanadocenes in rabbits. *Toxicol Appl Pharmacol* 170: 104-112.
- D'Cruz, Osmond J., Vassilev, Alexei, Uckun, Fatih, M. (2000) Evaluation of boar sperm as a model to study the mechanism of spermicidal activity of vanadocenes. *Biochem Biophys Res Commun* 270: 826-830.
- Eggert-Kruse, W., Rohr, G., Jochum, R., Adolph, M., Runnebaum, B. (1992) The effect of heavy metals on the in vitro interaction between human sperm and mucus. *Dtsch Med Wochenschr* 117: 1383-1389.
- Environmental Protection Agency. (1984) Health assessment document for manganese. Final Draft. US EPA, Office of Research and Development.
- Ernst, E., Glenn, L. J. (1991) Effect of organic and inorganic mercury on human sperm motility. *Pharmacol Toxicol* 69: 440-444.
- Forgács, Z., Paksy, K., Lázár, P., Táta, E. (1998) Effect of Ni²⁺ on the testosterone production of mouse primary Leydig cell culture. *J Toxicol Environ Health Part. A* 55: 213-224.

- Garner, D.L., Hafez, E.S.E. (1993) Spermatozoa and seminal plasma. En: Reproduction in Farm animals. E.S.E. Hafez Ed. LEA & FEBIGER, Philadelphia, Pennsylvania. 165-187.
- Gibbons, I.R., Cosson, M.P., Evans, J. A., Gibbons, B.H., Houck, B., Martinson, K.H., Sale, W.S., Tang, W-JY (1978) Potent inhibition of dynein adenosinetriphosphatase and of the motility of cilia and sperm flagella by vanadate. Proc Nat Acad Sci USA 75: 2220-2224.
- Guerrero, A., García, L., Zapata, O., Rodríguez, E., Darszon, A. (1998) Acrosome reaction inactivation in sea urchin sperm. Biochim Biophys Acta 1401(3), 329-338.
- Hanf, V., Fortsmann, A., Costea, J.E., Schiefersstein, G., Fischer, I., F. Schweinberg. (1996) Mercury in urine and ejaculate in husbands of barren couples. Toxicol Lett 88: 227-231.
- Henkel, R., Bittner, J., Weber, R., Hüther, F., Miska, W. (1999) Relevance of zinc in human sperm flagella and its relation to motility. Fertil Steril 71: 138-1143.
- Hsu, P.C., Hsu, C.C., Liu, M.Y., Chen, L.Y. (1998) Lead induced changes in spermatozoa function and metabolism. J Toxicol Environment Health Part A 55: 45-64.
- Huang, Y.L., Tseng, W.C., Lin, T.H. (2001) In vitro effects of metal ions (Fe²⁺, Mn²⁺, Pb²⁺) on sperm motility and lipid peroxidation in human semen. J Toxicol Environ Health 62: 259-267.
- Johnson, B.L. (1996) Hazardous waste: Nature, extent, effects and social responses. In: De Serres, F.J., Bloom, A.D. Eds. Ecotoxicology and human health. A biological approach to environmental remediation. CRC Press. Inc.
- Jurewicz, J., Hanke, W., Radwan M, and Bonde, J.P. (2009) Environmental factors and semen quality. International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health 22(4): 305-329
- Lapointe, S., Ahmad, I., Buhr, M.M., Sirard, M.A. (1996) Modulation of posthaw motility, survival, calcium uptake and fertility of bovine sperm by magnesium and manganese. J Dairy Sci 79: 2163-2169.
- Lassalle, B., Testart, J. (1994) Human Zona pellucida recognition associated with removal of sialic acid from human sperm surface. J Reprod Fertil 101: 703-711.
- Linder, R.E., Klinefelter, G.R., Strader, L.F., Suarez, J.D., Roberts, N. (1997) Spermatotoxicity of dichloroacetic acid. Reprod Toxicol 11: 681-688.
- Llobet, J.M., Colomina M.T., Sirvent, J.J., Domingo, J.L., Corbella, J. (1995) Reproductive toxicology of aluminum in mice. Fund Appl Toxicol 25: 45-51.
- Llobet, J.M., Colomina M.T., Sirvent, J.J., Domingo, J.L., Corbella, J. (1993) Reproductive toxicity evaluation of Vanadium in male mice. Toxicol 80, 199-206.
- Magnus, O., Brekke, I., Abyholm, T., Purvis, K. (1990) Effects of manganese and other divalent cations on progressive motility of sperm. Arch Androl 24: 159, 166.
- Menkveld, R., Rhemrev, J.P.T., Franken, D.R., Vermeiden, J.P.W., Kruger, T.F. (1996) Acrosomal morphology as a novel criterion for male infertility diagnosis: Relation with acrosin activity, morphology (strict criteria), and fertilization *in vitro*. Fertil Steril 65: 637-644.
- Meeker, J.D., Rossano, M. G., Protas, B., Diamond, M.P., Puscheck, E., Daly, D., Paneth, and Wirth, J.J. (2008) Cadmium, lead, and other metals in relation to semen quality: human evidence for molybdenum as a male reproductive toxicant. Environmental Health Perspectives 116: 11 November.
- Mohamed, M.K., Evans, T.C., Mottet, N.K., Burbacher, T.M. (1986) Effects of methyl mercury on sperm oxygen consumption. Pharmacol Toxicol 58: 219-224.
- Mohamed, M.K., Burbacher, T.M., Mottet, N.K. (1987) Effects of methyl mercury on testicular functions in *Macaca fascicularis* monkeys. Pharmacol Toxicol 60: 29-36.

- Mulkey, J.P., Oheme, F.W. (1993) A review of thallium toxicity. *Vet Hum Toxicol* 5: 445-453.
- Nriagu, J.O. y Pacyna, J.M. (1988) Quantitative assessment of worldwide contamination of air, water and soils by trace metals. *Nature* 333: 134.
- Oldereid, N.B., Thomassen, Y., Attramadal, A., Olaisen, B., Purvis, K. (1993) Concentrations of lead, cadmium and zinc in the tissues of reproductive organs in men. *J Reprod Fertil* 99: 421-425.
- Ragan, H.A. y Mast, T.J. (1990) Cadmium inhalation and male reproductive toxicity. *Rev Environ Contam Toxicol* 114: 1-22.
- Rao, M.V., Sharma, P.S. (2001) Protective effect of vitamin E against mercuric chloride reproductive toxicity in male mice. *Reprod Toxicol* 15: 705-712.
- Rodges, D.W., Dickman, M., Han, X. (1995) Stories from reservoirs: Sediment Hg and Hg methylation in Ontario hydroelectric developments. *Water, Air And Soil Pollution* 80: 829-839.
- Sager, P.R., Clarkson, T.W., Nordberg, G.F. (1986) Reproductive and developmental toxicity of metals. En: *Handbook on the Toxicology of metals*. Fridberg, L., Nordberg, G.F., Vouk, V. Eds. Pp. 391-433. Elsevier Science Publishers, New York.
- Sharma, A.K., Kapadia, A.G., Fransis, P., Rao, M.V. (1996) Reversible effects of mercuric chloride on reproductive organs of the male mouse. *Reprod Toxicol* 10:153-159.
- Sjoberg, S.G. (1955) Vanadium bronchitis from cleaning oil-fired boilers. *Ind Health* 11: 505-511.
- Sokol, R.Z., Berman, N. (1991) The effect of age of exposure on lead-induced testicular toxicity. *Toxicol* 69: 29-278.
- Sokol, R.Z., Okuda, H., Nagler, H.M., Berman, N. (1994) Lead exposure *in vivo* alters the fertility potential *in vitro*. *Toxicol Appl Pharmacol* 124: 310-316.
- Staessen, J.A., Buchet, J.P., Ginucchio, G. (1996) Public health implications of environmental exposure to cadmium and lead: an overview of epidemiological studies in Belgium. *J Cardiovasc Risk* 3: 26-41.
- Telisman, S., Jurasovic, J., Pizent, A., Cvitkovic, P. (1997) Cadmium in the blood and seminal fluid of nonoccupationally exposed adult male subjects with regard to smoking habits. *Int. Arch Occup Environ Health* 70: 243-248.
- Timbrell, J.A. (1998) Biomarkers in toxicology. *Toxicol* 129: 1-12.
- Thoreaux-Manlay, A., Vélez de la Calle, J.F., Olivier, M.F., Soufir, J.C., Masse, R., Pinon-Lataillade, G. (1995) Impairment of testicular endocrine function after lead intoxication in the adult rat. *Toxicol* 100: 101-109.
- U.S. E.P.A. (1999) EPA Probit analysis program used for calculating LC/EC values. Version 1.5, *Ecological Monitoring Research Division, Environmental Monitoring Systems Laboratory, U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio, 45628*.
- Umeyama, T., Ishikawa, H., Takeshima, H., Yoshii, S., Koiso, K. (1986) A comparative study of seminal trace elements in fertile and infertile men. *Fertil Steril* 3: 494-499.
- Wadi, S., Ahmad, G. (1999) Effects of lead on the male reproductive system in mice. *J Toxicol Environ Health Part A* 56: 513-521.
- WHO (2003) WHO laboratory manual for the examination of human semen and sperm cervical mucus interaction. World Health Organization, Cambridge, MA, USA.
- Wirth, J.J. and Mijal, R.S. (2010) Adverse effects of low-level heavy metal exposure on male reproductive function. *Syst Biol in Reprod Med*, 56: 147-167.
- Wirth, J.J., Rossano, M.G., Daly, D.C., Paneth, N., Puscheck, E., Potter, R.C. and Diamond, M.P. (2007) Ambient manganese exposure is negatively associated with human sperm motility and concentration. *Epidemiology* 18: 270-273.

- Working, P.K., Chellman G.J. (1989) The use of multiple endpoints to define the mechanism of action of reproductive toxicants and germ cell mutagens. En: Sperm measures and reproductive success: Institute for Health Policy Analysis. Forum on Science, Health and Environmental Risk Assessment. Alan R. Liss pp. 211-227.
- Wu, W., Zhang, Y. Zhang, F. (1996) Studies of semen quality in workers exposed to manganese and electric welding. *Zhonghua Yu Fan Yi Xue Za Zhi* 30: 266-268.
- Wyrobek, A.J. (1993) Methods and concepts in detecting abnormal reproductive outcomes of paternal origin. *Reprod Toxicol* 7: 2-16.
- Yanagimachi, R. (1994) Mammalian fertilization. En: *The physiology of reproduction*. Editado por E. Knobil y J.D. Neill. New York. Raven Press. Pp. 193-245.

Sistemas de gestión ambiental para la ecología industrial. El caso de la industria petroquímica en Altamira-Tampico

Graciela Carrillo González^{1*}

RESUMEN

Los sistemas de gestión ambiental son procesos de planeación, implantación, revisión y mejora de las acciones que lleva a cabo una empresa para garantizar sus objetivos ambientales, innovar sus procesos, atender las exigencias sociales, económicas y legales y establecer sistemas de mejora continua.

La ecología industrial propone una estrategia que se traduce en acciones muy claras y operativas para adecuar los procedimientos tradicionales sobre la base de una política ambiental y un sistema de gestión que favorece las condiciones para la consolidación de sinergias y la ejecución de ecoeficiencias. En este trabajo se analiza el caso de seis grandes empresas de la industria petroquímica, instaladas en el corredor de Altamira-Tampico. Una vez realizada la intervención, se llegó a corroborar que todas estas empresas cuentan con una política ambiental corporativa, un sistema de gestión ambiental y un sistema de indicadores ambientales; esto les permite dar seguimiento a las recomendaciones de las auditorías ambientales y a incursionar en una dinámica de innovación a partir de la identificación de ecoeficiencias y sinergias, lo cual les ha impulsado hacia un mejor desempeño ambiental.

Palabras clave: política ambiental, sinergias, innovación

^{1*} Profesora-investigadora del Departamento de Producción Económica de la UAM-Xochimilco y coordinadora del proyecto de ciencia básica de Conacyt "Factores determinantes de la ecología industrial en un sistema complejo: el Corredor Industrial Altamira-Tampico y el Parque Industrial Toluca 2000". graci2992@gmail.com

INTRODUCCIÓN

La ecología industrial (EI) propone una estrategia que se traduce en acciones muy claras y operativas para realizar adecuaciones en los procedimientos tradicionales de las plantas manufactureras; con ello brinda mayores probabilidades de cambios efectivos e innovadores que, apoyados en una política ambiental, favorece las condiciones para la consolidación de sinergias y ecoeficiencias.

Un requisito interno a las plantas industriales para facilitar los objetivos de la ecología industrial, es contar con un sistema de gestión ambiental –SGA– el cual se define como un proceso cíclico de planeación, implantación, revisión y mejora de los procedimientos y acciones que lleva a cabo la organización para realizar su actividad, garantizando el cumplimiento de sus metas ambientales. La implantación de un sistema de gestión ambiental permite cubrir demandas sociales, legales y del mercado, además de facilitar la innovación en los procesos y en los productos.

En México, son las empresas grandes las que han logrado certificaciones ambientales y un mejor desempeño en la materia. El caso de las grandes empresas de la industria petroquímica instaladas en el corredor industrial de Altamira-Tampico, permitió corroborar que contar con una política ambiental corporativa, un sistema de gestión ambiental y, en varios casos, con la certificación de la ISO 14001, ha facilitado el desarrollo de ecoeficiencias en sus procesos y acciones de ecología industrial, generando un ambiente innovador en la zona.

La industria petroquímica está dedicada a obtener derivados químicos del petróleo y de los gases asociados. Los productos petroquímicos incluyen todas las sustancias químicas que de ahí se derivan. En México, la industria petroquímica nace en 1956, cuando Pemex inicia la producción de azufre y posteriormente crea la primera unidad de dodecibenceno (DDB) para su uso en detergentes. En esos años se da un desarrollo muy intenso, basado en la creación continua de nuevos productos de bajo valor agregado y bajo precio por unidad

de volumen. A principios de los años ochenta, en el marco de la reestructuración industrial, se deroga la exclusividad de Pemex para abastecer de petroquímicos primarios a la industria privada; el gobierno decide que Pemex sólo comercialice los productos primarios que produzca, permitiendo que la industria privada importe los productos que requiera. Asimismo, en esos años las grandes empresas de la industria petroquímica migran hacia el noreste del país.

En este trabajo se muestra el caso de seis grandes empresas (Indelpro, INSA, Mexichem, M&G, Nhumo y Petrocel) del ramo de la petroquímica, instaladas en el corredor de Altamira-Tampico; todas ellas con una permanente participación en el Comité de Seguridad Industrial y Protección Ambiental –SIPAISTAC– de la Asociación de Industriales del Sur de Tamaulipas –AISTAC–, en las cuales se observó la existencia de una política ambiental corporativa, un departamento específico dedicado a la calidad ambiental y a la seguridad e higiene de la planta, un sistema de gestión ambiental, una estricta gestión de los residuos que se generan en los procesos productivos y un sistema de indicadores ambientales que les permite dar seguimiento a las recomendaciones de continuas auditorías ambientales internas y externas.

I. CONCEPTO DE ECOLOGÍA INDUSTRIAL

El actual contexto económico, altamente competitivo, demanda de las empresas una mayor eficiencia en la utilización de sus recursos, el aprovechamiento de oportunidades de negocio y la responsabilidad con la sociedad. Actuar de manera individual les implica un freno para el aprovechamiento de su potencial, por ello, insertarse en un marco de cooperación entre firmas que dé lugar a la construcción de redes de conocimiento e intercambio de tecnologías, innovación en productos, estrategias y procesos favorece no sólo las nuevas exigencias de eficiencia y cuidado del medio ambiente, sino también contribuye a la generación de empleos.

La base teórica de la EI deriva de una disciplina ecléctica que conecta los principios de la economía con los de la biología. Este concepto fue concebido a la luz de las propuestas de la economía ecológica como un tipo específico de relación que se establece entre la actividad humana y la dinámica del sistema natural. Bajo este enfoque, aspectos como el crecimiento de la población y el modelo de desarrollo predominante que rige la actividad económica, ocuparon un papel preponderante en el deterioro del medio ambiente (Feenberg, 1982).

La construcción de la propuesta de la EI resulta de la visión de los ingenieros bajo el principio de la eficiencia en los procesos; y de los ecólogos, como un sistema de funcionamiento acorde con los ciclos de la naturaleza, que exige la conformación de redes entre plantas industriales, o cualquier otro ente que realice actividades que implican el consumo de recursos naturales y generación de residuos.

La interpretación que se hace de los sistemas industriales desde la EI y la conformación de las redes empresariales, responde a las características internas que se dan en el espacio de convivencia, aprendizaje y desarrollo de capacidades dentro de los espacios comunes, así como la influencia del entorno económico e institucional en las decisiones de las organizaciones. Es vista también como una nueva aproximación al diseño industrial de productos y procesos y a la implementación de estrategias manufactureras sustentables. En este concepto, el sistema industrial no es visto de manera aislada, sino circundante y en concierto con otros sistemas. Se busca optimizar los ciclos de materiales, desde el material virgen, el material final para componente, para producto y para producto residual, hasta su disposición (Jelinski *et al.*, 1991).

Los antecedentes inmediatos de la EI están en los principios de la ecología. Su objetivo es guiar a las firmas hacia la adopción de estrategias de producción económicamente rentables y ambientalmente sustentables, en el contexto de la cooperación inter-firma como mecanismo de coordinación para la circulación de información, biomasa y

energía. En septiembre de 1989 apareció un número especial de la *Scientific American Review* con el título “Dirigiendo el planeta Tierra”. Ahí, Frosh y Galopoulos, que se desempeñaban en General Motors, presentan un artículo titulado “Strategies for manufacturing”, en el cual exponen la idea de que es posible que los métodos de producción industrial se desarrollen generando un impacto mucho menor sobre el medio ambiente.

Los primeros autores que muestran coincidencias, en sus propuestas, con los principios de la ecología industrial y discuten el concepto, surgieron de la ecología: Eugene Odum, Charles Hall, T.E. Graedel y Preston Cloud; de la ingeniería: Robert Ayres, Braden Allenby, Jesse Ausbel y R. Frosh y N. Galopoulos; y de la economía: Georgescu Roegen, René Paset, Keneth Boulding y Hardi Tibbs. (Carrillo 2004: 235)

En los subsiguientes años se incorporaron al tema autores como Lowe E.A., Coté R.P., Cohen Rosenthal, Deutz Pauline, David Gibas, Amy Proctor y Korhonen J., los cuales realizan análisis interpretativos sobre el impacto regional y local de los flujos energéticos al aplicar la ecología industrial en parques y zonas industriales. Por otro lado, algunos investigadores de Austria trabajan con Heinz Schand y a la par se desarrolla la escuela de Alemania, que aborda el tema de la EI desde el enfoque de la desmaterialización de la economía. Suren Erkman² se convirtió en un reconocido personaje como divulgador del enfoque de la EI en Europa.

En 2004 aparece un número especial de la serie *Economic System Research*, donde Shigemi Kagawa y Sangwon Suh presentan un trabajo denominado “Industrial ecology and input-output analysis”. Posteriormente, en el año 2009, dentro de la colección *Efficiency in Industry and Science*, se publica el volumen 23: *Handbook of Input-output Economics in Industrial Ecology*, editado por el mismo Sangwon Suh, en el cual nuevamente ambos presentan un capítulo conjunto: “Industrial

2 Suren Erkman (1997) ha presentado en los últimos años trabajos sumamente interesantes sobre el tema, donde recoge los planteamientos teóricos de diversos autores.

ecology and input-output economics: a brief history”, donde resumen de manera espléndida el enfoque de la ecología industrial visto desde la perspectiva de la economía insumo-producto. En este último trabajo se señala que fue Barry Commoner, en los años setenta, quien articuló por primera vez la idea de cerrar círculos en el intercambio de materiales entre sociedad y ambiente, para resolver problemas asociados con la entrada y salida de materiales y residuos en los procesos productivos.

Una aportación pionera, bajo esta perspectiva de las matrices de entrada y salida, fue la de Robert Ayres y Kneese (1969), quienes ampliaron el principio de balance de materiales a la estructura básica de insumo-producto, permitiendo un análisis cuantitativo del uso de recursos y el flujo de materiales en un sistema económico. En la misma línea, en 1990 la doctora Faye Duchin, de la Universidad de Berkeley, publica un artículo donde se presentan las primeras contribuciones para establecer un vínculo explícito entre la economía insumo-producto y la ecología industrial.³ Esta autora logra aclarar las relaciones cantidad-precio en un modelo de insumo-producto y dibuja sus implicaciones para la ecología industrial, lo cual antes sólo había sido referido a cantidades físicas.

Erkman señala también, en un trabajo de los años noventa, que la idea de ecología industrial empezaba a utilizarse esporádicamente en algunos trabajos cortos que se divulgaron en el ámbito académico; es el caso del artículo de Preston Cloud presentado en la reunión anual de la Asociación Geológica Alemana en 1977, donde se incorpora el concepto de “ecosistema industrial”, en una idea muy aproximada a lo que actualmente se entiende como “ecología industrial” (Erkman, 1997).

3 Se ha señalado que el mismo Leontief incorporó, dentro del marco insumo-producto, algunas ideas que después fueron clave para la ecología industrial, al proponer un modelo donde la generación y el abatimiento de la contaminación son explícitamente tratados.

II. LOS SISTEMAS DE GESTIÓN AMBIENTAL Y LA ECOLOGÍA INDUSTRIAL

La agenda política internacional introduce por primera vez la dimensión ambiental para señalar los límites del modelo tradicional de crecimiento económico y del uso de los recursos naturales, en 1972, durante la “Conferencia de Naciones Unidas Sobre el Medio Ambiente Humano” en Estocolmo, Suecia. La publicación que derivó, *Los límites al crecimiento: informe al Club de Roma*, da la pauta para empezar a redefinir la política pública ambiental de distintos países.

En los años setenta se hicieron evidentes, para los tomadores de decisiones, los efectos que genera la actividad económica sobre el ambiente, que van desde una escala de impacto local hasta impactos a escala planetaria. En este escenario, la gestión pública y la gestión privada de las empresas se vuelve indispensable, no sólo para cumplir con los objetivos de rentabilidad, sino para incorporar el componente ambiental bajo la perspectiva de un sistema abierto a la entrada de energía, y cerrado al uso de recursos naturales y a la generación de residuos.

La gestión ambiental atrae el interés de gobiernos y empresas, y se torna en un conjunto de acciones encaminadas a lograr la máxima racionalidad en el proceso de decisión relativo a la conservación, defensa, protección y mejora del medio ambiente. Son acciones que se desprenden tanto del poder público como de la iniciativa privada y de la organización social espontánea. La gestión ambiental aborda los aspectos económico, ecológico, social y legal.

Por diversas razones, a la visión tradicional del sector empresarial (la rentabilidad económica) se le han sumado aspectos sociales y ambientales, principalmente en el caso de la gran empresa. Los factores determinantes son básicamente tres: la presión legal derivada de una serie de normativas y regulaciones presentes en prácticamente todos los países; la presión social que se ha hecho manifiesta, desde los años setenta, a través de acciones colectivas en defensa de los recursos naturales y

el derecho humano a un ambiente; y la presión de los mercados frente a consumidores cada vez más conscientes y exigentes, así como empresas que han convertido su imagen de empresa limpia en un factor de competitividad (Conde, 2003).

El escenario actual de las empresas las ha obligado a un proceso de reconfiguración; por ello incorporan herramientas y sistemas asequibles, como los SGA, que les permitan responder a esas nuevas exigencias para mantenerse dentro del mercado en condiciones de competitividad.

A partir de los años noventa, los incentivos económicos basados en mecanismos de mercado se convirtieron en un importante impulso para las empresas en varios países; ello las obligó a adoptar soluciones de tipo preventivo, tecnologías de producción limpia y acuerdos de colaboración voluntarios para apearse a la legislación ambiental y generarse una imagen de empresa limpia; ésta ha sido utilizada como ventaja competitiva en los mercados internacionales, con el fin de mejorar la productividad y por ende la competitividad en los distintos negocios. Hoy se entiende que la gestión ambiental, en el ámbito de la gestión empresarial, es un factor crucial que influye decisivamente, tanto en la imagen corporativa de la empresa como en la calidad del producto, en el costo de la comercialización y en la competitividad. Las empresas cada vez enfocan más su gestión a la satisfacción de los clientes como objetivo primordial ante las amenazas de la competencia.

Una adecuada gestión ambiental representa varias ventajas para el medio ambiente y para la competitividad de la empresa, como: mejora en los procesos productivos, ahorro en el consumo de materias primas y energía, reducción de costos para controlar la contaminación, mejora en la imagen de la empresa. Se adquiere mayor competitividad a la luz de una postura responsable, se evitan demandas judiciales y sanciones y surgen nuevos negocios (negocios verdes).

En el marco de estos SGA, la definición de las estrategias dentro de la empresa es un elemento clave

que se define en tres niveles: el corporativo, el de negocio y el funcional. La estrategia corporativa define los negocios en que se va a competir y se decide en relación con el grado de diversificación, las posibilidades de integración, las alianzas, el ámbito geográfico y las directrices generales del grupo; la estrategia de negocio decide la forma concreta en que la empresa va a competir con sus rivales y el objetivo general que va a guiar las acciones de las distintas áreas de la empresa; finalmente, la estrategia funcional es aquella que, sin perder de vista el objetivo general de la empresa y las directrices del corporativo, se define en cada una de las áreas funcionales.

La incorporación del medio ambiente en la misión de la empresa, es el primer paso que pone de manifiesto un reconocimiento de que el entorno actual de las organizaciones exige atención a los problemas de contaminación y explotación de recursos naturales, y también la identificación en las distintas etapas de la cadena de valor, donde se reconocen los problemas ambientales específicos del proceso. Los requisitos para incorporar el tema en la empresa son básicamente dos: una cultura ambiental que incluya la convicción sobre el cuidado del ambiente en la alta dirección; involucramiento y participación de los trabajadores; utilización adecuada de los instrumentos y herramientas de gestión ambiental que resulten adecuadas a las particularidades de la empresa.

Un sistema de gestión ambiental es un proceso cíclico de planeación, implantación, revisión y mejora de los procedimientos y acciones que lleva a cabo una organización para realizar su actividad, garantizando el cumplimiento de sus objetivos ambientales. La mayoría de los sistemas de gestión ambiental permiten la mejora continua y están contruidos bajo el modelo: “Planificar, hacer, comprobar y actuar”.

- **Planificar.** Incluye los aspectos ambientales y establece los objetivos y las metas a lograr.

- **Hacer.** Significa implementar la formación y los controles operacionales necesarios para alcanzar las metas establecidas.
- **Comprobar.** Es comparar lo que se ha planeado contra lo que se realizó y corregir las desviaciones observadas.
- **Actuar.** Consiste en revisar el progreso obtenido y efectuar los cambios necesarios para la mejora del sistema.

Los objetivos de un SGA son: a) garantizar el cumplimiento de la legislación medioambiental; b) fijar y promulgar las políticas y procedimientos operativos internos necesarios para alcanzar los objetivos medioambientales de la empresa; c) identificar, interpretar, valorar y prevenir los efectos que la actividad empresarial produce sobre el medio ambiente, analizando y gestionando los riesgos en los que la empresa incurre como consecuencia de su actividad; d) reducir y concretar el volumen de recursos; e) obtener la calificación del personal apropiado en función del nivel de riesgos existentes y los objetivos medioambientales asumidos por la empresa, asegurando al mismo tiempo su disponibilidad cuando fuese necesario.

El primer paso para que una empresa implante un sistema de gestión ambiental es que desarrolle una política ambiental en la cual se establezcan los objetivos generales, los principios de acción y los procedimientos con los que la empresa asume el compromiso de mejorar su actuación respecto al medio ambiente. La política ambiental es el motor para la implantación y mejora continua del sistema de gestión ambiental de la empresa, lo que le permite mejorar potencialmente su comportamiento hacia el medio ambiente.

Las mismas razones que justifican en una empresa el asumir una conducta ambientalmente positiva, son las que explican la necesidad de implantar un sistema de gestión ambiental, a saber: la presión social, la presión legal y la presión del mercado. Las ventajas que ofrece este tipo de sistemas son: se puede establecer rápidamente una política

ambiental que se adapte a las necesidades y problemas específicos; se pueden determinar los impactos ambientales; se identifican las exigencias de orden legal aplicables a la empresa; se identifican las prioridades y se fijan los objetivos ambientales apropiados a la empresa; y, finalmente, se facilitan las actividades de planeación, control, vigilancia y corrección.

La implantación del sistema de gestión ambiental permite la incorporación del cuidado del medio ambiente en la estrategia de la empresa y repercute en el cuidado del entorno. Entre los elementos clave, de carácter general, de un SGMA, se incluyen los siguientes (Fundación Entorno, 1998: 22):

- Política ambiental: el documento donde se recoge el compromiso de la dirección para la gestión adecuada del medio ambiente.
- Programa ambiental, donde se recogen las actuaciones previstas por la empresa en los próximos años. En él se concreta la política ambiental en una serie de objetivos, metas y actividades.
- Estructura organizativa, con una asignación clara a las personas cuyas competencias se ligan al comportamiento ambiental de la empresa.
- Formación, información interna y competencia profesional del personal que desarrolla actividades vinculadas a lo ambiental en la empresa.
- Integración de la gestión ambiental en las operaciones de la empresa.
- Vigilancia y seguimiento para controlar y medir regularmente las principales características de las operaciones y evaluar los resultados.
- Corrección y prevención mediante acciones encaminadas a eliminar las causas, reales o potenciales, que limitan el cumplimiento de los objetivos.
- Auditoría del sistema de gestión ambiental, para comprobar periódicamente la adecuación, eficacia y funcionamiento del sistema.

- Revisión del sistema de gestión ambiental, por la dirección, para evaluar periódicamente la eficacia y adecuación del sistema.
- Comunicación externa, para informar a las personas interesadas sobre los resultados del comportamiento medioambiental.

La empresa que establece un SGA puede optar por implantar su propio sistema, de acuerdo con sus necesidades y motivaciones, como un programa interno de reducción de residuos o el diseño de un conjunto de medios y métodos no documentados que gestione la interacción de la organización con el medio ambiente (Roberts y Robinson, 1999). O bien, adoptar un SGA ya homologado que facilite establecer un conjunto de pautas sistemáticas de comportamiento ambiental, que hayan sido probadas por otras organizaciones y permitan medir la actuación de la empresa con unos criterios aceptados internacionalmente.

III. EL CASO DE LAS EMPRESAS DE ALTAMIRA

La EI demanda varios componentes para su consolidación, sin embargo, los aspectos clave para consolidar las sinergias son: complementariedad técnica de los procesos manufactureros, valoración de los residuos, condicionantes geográficas, innovación de procesos y modificación de tecnologías. De igual forma, el componente humano y los valores individuales y de la organización, así como los esquemas de gestión de los recursos disponibles, se vuelven imprescindibles para orientar la balanza de las decisiones hacia la adopción de proyectos ambientalmente sustentables.

En el caso de México, muchas empresas que implementan acciones ambientales se ubican como empresas de primera generación, y lo hacen principalmente por exigencias del gobierno. Un menor número de empresas, fundamentalmente grandes, han logrado certificaciones ambientales y se desempeñan como empresas de segunda generación y eventualmente de tercera. Al analizar las empre-

sas que conformaron la muestra en el estudio, un elemento común y de gran valía que se encontró en empresas que presentaban las condiciones para llevar adelante proyectos de ecología industrial, fue que contaban con una política ambiental; es decir, la consideración del medio ambiente estaba presente en sus valores, y por tanto, existía una estructura dentro de su organización específica para atender este tema.

Altamira se ubica en la región del Golfo de México, al sur del estado de Tamaulipas. Los ecosistemas predominantes en esta zona corresponden al litoral, el estuario y la llanura costera del Golfo Norte.

El litoral está conformado por varias lagunas (Laguna Madre, Laguna Almagre, Laguna Morales y Laguna San Andrés, entre otras) que constituyen la fuente natural de abasto de los recursos hídricos, mientras que el río Guayalejo es el cuerpo receptor de las aguas residuales, tanto de la zona industrial como de las zonas urbanas.

La llanura costera está conformada por llanos y lomeríos de baja altitud. En ella también está presente una importante zona lacustre que funciona como medio regulador de escurrimientos superficiales. Los principales riesgos en la zona se asocian al intenso tráfico de vehículos de las empresas que transportan residuos peligrosos, la pérdida de la biodiversidad acuática en las lagunas por las descargas de aguas residuales y la alteración de los ecosistemas por el crecimiento de las áreas urbanas (ver Imagen 1):

El corredor industrial de Altamira se conforma básicamente por plantas que corresponden a filiales de corporativos internacionales, equipadas con tecnología de punta, una fuerte vocación exportadora y certificaciones ambientales vigentes. En esta materia, la aplicación de sistemas de gestión ambiental, reciclaje y recuperación de agua y materiales, está presente.

En términos de legislación ambiental, las empresas de Altamira son reguladas por la misma normativa que se aplica a las empresas de todo el país.



Imagen 1. Corredor industrial Tampico-Altamira.

Fuente: Tomado de Asociación de Industriales del Sur de Tampico, A.C. (www.aistac.org.mx)

En particular, la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos en sus artículos 27 y 73; y también la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente –LGEEPA– así como las normas ecológicas, que establecen las bases jurídicas para la actividad industrial. Estas empresas, por razones de concurrencia en la ley, se ven obligadas a cumplir con regulaciones locales, estatales y federales. Cabe señalar que en razón de la política ambiental corporativa de estas empresas, existen parámetros de la legislación nacional que se llegan a rebasar, mientras que en otros se encuentran en supervisión periódica por parte de las autoridades ambientales.

Las empresas instaladas en el corredor industrial de Altamira resultaron de interés debido a que cuentan con una política ambiental corporativa y un sistema de gestión; en su mayoría, tienen el certificado de la ISO 14001. Asimismo, aunque no tienen formalmente reconocida en su política

ambiental una estrategia de ecología industrial, se cuenta en el corredor con varias sinergias identificadas desde 1998.

IV. METODOLOGÍA

Este trabajo se realizó en el marco de un proyecto más amplio, titulado “Factores determinantes de la ecología industrial en un sistema complejo. El caso del corredor industrial Altamira-Tampico y el parque industrial Toluca 2000”, financiado por el Conacyt, dentro del cual se estudiaron seis de las empresas de la AISTAC que participan en las iniciativas de ecoeficiencias y sinergias en la zona. Para ello se siguió la metodología que a continuación se describe.

La muestra se conformó con seis empresas (Indelpro, INSA, Mexichem, M&G, Nhumo y Petrocel) del ramo de la petroquímica, seleccionando aquellas con una permanente participación en el Comité de Seguridad Industrial y Protección Ambiental –

SIPAISTAC— de la Asociación de Industriales del Sur de Tamaulipas —AISTAC—.

Se realizaron visitas para un reconocimiento visual de la operación en las empresas, se aplicaron entrevistas semiestructuradas y encuestas a los responsables de los departamentos de ecología de las seis plantas ubicadas en el corredor industrial mencionado. La información recabada se analizó para identificar las variables clave y construir los mapas de sinergias reales, así como los indicadores que revelan la disponibilidad a innovar y generar procesos de cooperación para la consolidación de nuevas sinergias.

El cuestionario aplicado tuvo como objetivo indagar sobre los aspectos técnicos, pero principalmente los aspectos de la gestión ambiental; se organizó en nueve secciones con 121 reactivos. Los apartados generales fueron: política ambiental; gestión y desempeño ambiental de la empresa; los flujos de agua, materia, energía e información; aspectos sociales y aspectos económicos.

Posteriormente, se realizó el análisis e interpretación de los datos, se regresó a las empresas de Altamira para corroborar datos relacionados con los residuos y las sinergias para validar o relativizar los indicadores que surgieron del análisis y para confirmar con los responsables de gestión los hallazgos identificados.

Se hizo una breve descripción de la historia de las empresas, sus trayectorias, evolución de capacidades en materia ambiental, política ambiental y algunos aspectos económicos y sociales.

De las seis empresas, cuatro de ellas cuentan con la certificación ISO 14001, mientras que las otras dos ya tienen la plataforma establecida y están en proceso de certificación. Cinco de las empresas citadas tienen la certificación “Industria Limpia”, que otorga la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente —Profepa— y cuentan también con la certificación de Responsabilidad Integral de la Asociación Nacional de la Industria Química —ANIQ—.

Entre las buenas prácticas en materia ambiental que han adoptado a partir de su participación en

1997-1998 en el proyecto “By Product Sinergy”, está la búsqueda e identificación permanente de ecoeficiencias, así como acciones de cooperación para el establecimiento de sinergias ambientales. Asimismo, se encontró que cuentan con un sistema de indicadores ambientales que les permite dar seguimiento a las recomendaciones de las continuas auditorías ambientales. En todas ellas se lleva una estricta gestión de los residuos peligrosos. Los principales resultados del estudio se presentan en el siguiente apartado.

V. RESULTADOS

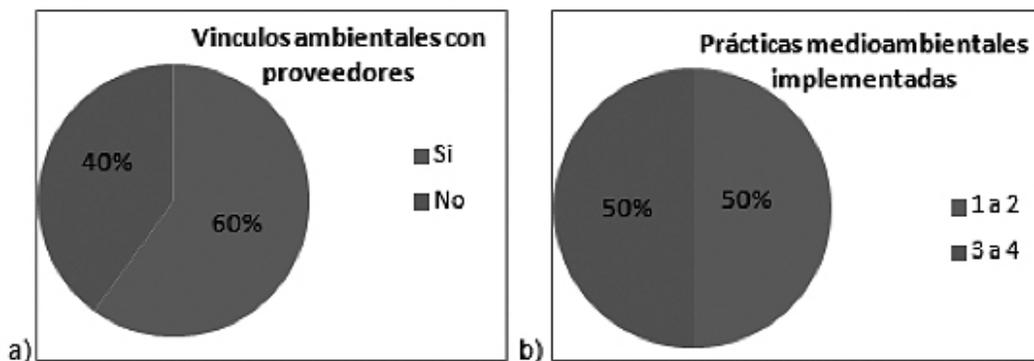
A partir de reunir la información de los sistemas de gestión ambiental de las empresas en estudio y de la aplicación del cuestionario ambiental, se realizó un análisis de los datos obtenidos. En cuanto a política ambiental, se concluyó:

Que el 100% de las empresas participantes pertenecen a la Asociación de Industriales del Sur de Tamaulipas, A.C. (AISTAC), el subcomité de Seguridad Industrial y Protección Ambiental (SIPAAISTAC), y la Asociación Nacional de la Industria Química (ANIQ). Algunas de ellas participan con otros comités, como el Comité de Ayuda Mutua.

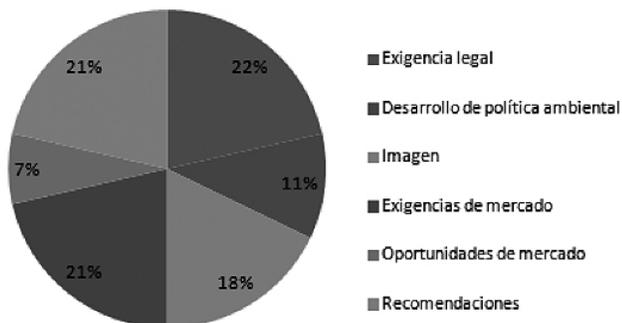
Hasta el 2012, las empresas no tenían vínculos estrechos con instituciones gubernamentales para atender aspectos ambientales; el único acercamiento fue una reunión con la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente —PROFEPA—, para evaluar el programa “Liderazgo ambiental”, y de forma indirecta se han relacionado con algunas secretarías del gobierno estatal con la única finalidad de cubrir requerimientos o trámites.

Con los proveedores, los vínculos ambientales se refieren a los compromisos adquiridos por las empresas que se encargan del manejo de los residuos de las empresas: deben tener actualizados sus permisos y preferentemente estar certificados en la ISO-14001. La proporción de estos vínculos se observa en el cuadro 1.

Las razones que motivaron a las empresas a implementar prácticas medioambientales son distin-



Cuadro 1. Existencia de vínculos en torno a temas ambientales con proveedores y número de prácticas medioambientales implementadas por las empresas.



Cuadro 2. Razones que motivan a las empresas para implementar prácticas ambientales.

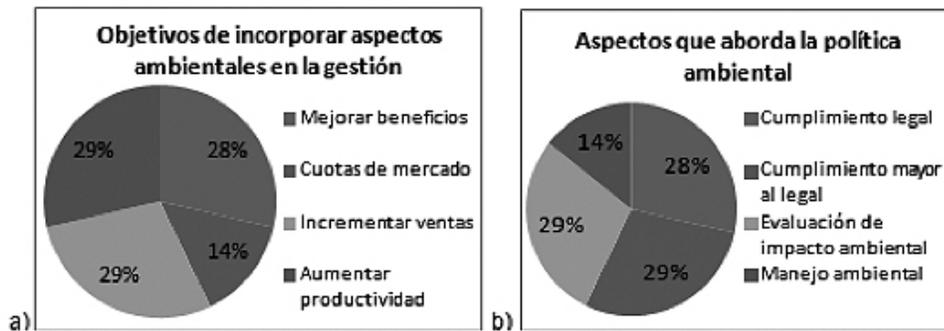
tas. Se encontró que las principales son: presiones externas, como exigencias legales/normativas; exigencias del mercado al que venden sus productos; recomendaciones que manifiestan las asociaciones a que pertenecen las empresas. Llama la atención que ver las prácticas ambientales como una oportunidad de negocio representa un porcentaje muy bajo en el grado de importancia que le dan las empresas, lo cual se ve reflejado en la poca inversión que hacen en este rubro. Ver cuadro 2

En el ámbito de la gestión integral, existen varios objetivos bien definidos para incorporar aspectos ambientales en la gestión. Estos aspectos son: incrementar las ventas, aumentar la productividad eficientando los procesos, mejorar los beneficios comerciales y, en menor medida, aumentar su cuota en el mercado, como se observa en el cuadro 3a.

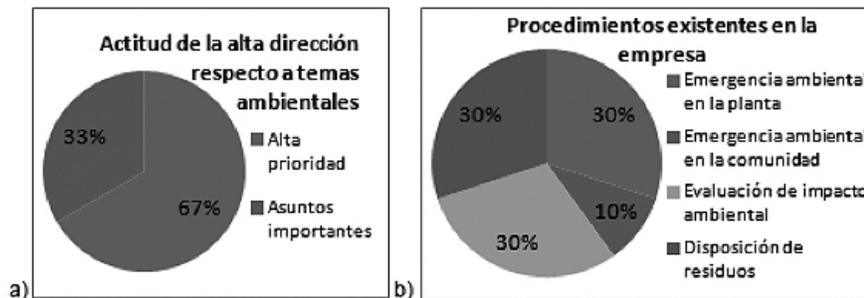
En relación con los aspectos que incorporan en su política ambiental, cabe señalar que las políticas fueron elaboradas directamente por los corporativos; sólo en el caso de una empresa se cuenta, ade-

más de la política ambiental corporativa, con una política ambiental de la planta. Se encontró que en general se le da el mismo peso a tres aspectos: un cumplimiento mayor al contemplado en las leyes, normas y reglamentos nacionales, el cumplimiento estrictamente establecido en las leyes nacionales y una evaluación de impactos ambientales; en menor medida se considera el manejo de residuos. Esto se observa en el cuadro 3.

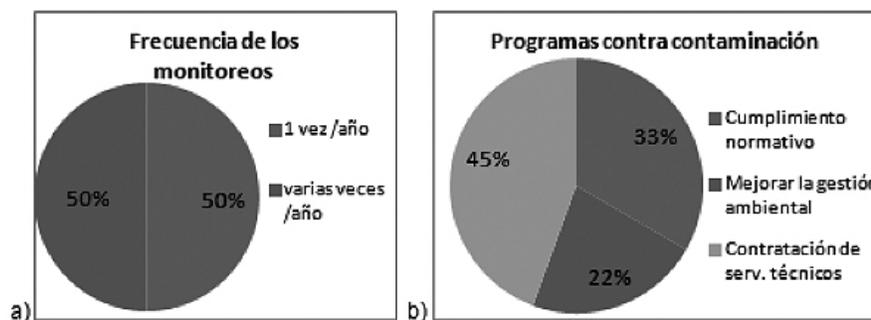
En la mayoría de las empresas participantes, los encargados de temas ambientales perciben que la alta dirección de la empresa le da prioridad a los temas ambientales; sólo un tercio perciben que se les considera temas importantes pero no prioritarios. Por otro lado, los procedimientos en relación con temas de seguridad y protección ambiental que manejan las empresas participantes son de igual importancia: manejo de emergencias ambientales dentro de la planta, disposición de residuos de acuerdo a la normatividad y evaluación de impactos ambientales de algunas etapas del proceso; en



Cuadro 3. Objetivos para incorporar aspectos ambientales en sus SGA y aspectos que aborda su política ambiental.



Cuadro 4. Actitud de los directivos respecto a los temas ambientales y procedimientos ambientales en las empresas.



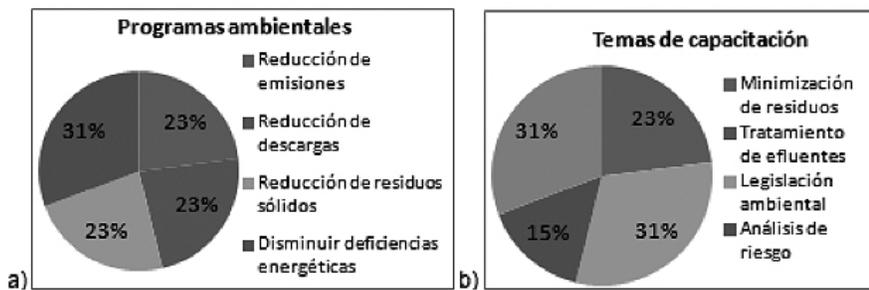
Cuadro 5. Frecuencia de los monitoreos y programas contra la contaminación.

menor medida, el manejo de emergencias ambientales, dentro de la planta, con incidencia en comunidades vecinas, como se observa en el cuadro 4.

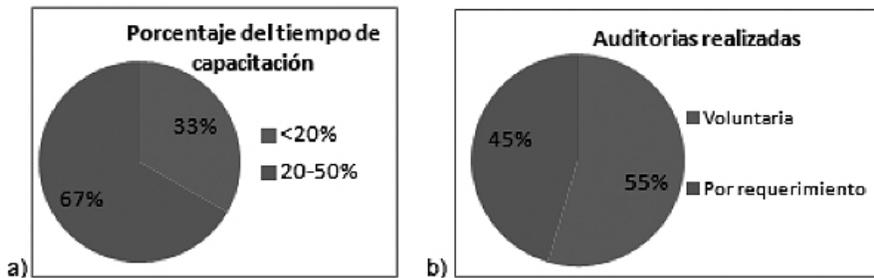
La mitad de las empresas son auditadas, por el corporativo al que pertenecen, una vez al año, mientras que las otras son auditadas varias veces al año. Los temas que se abordan en estas auditorías son: sobre la correcta aplicación de los procedimientos que contienen temas ambientales; manejo adecuado de los residuos; y niveles que reportan los indicadores ambientales de la empre-

sa. Los programas regularmente monitoreados son aquellos enfocados a la disminución de la contaminación. De estos programas, el 33% se basa en las normas ambientales y el 22% en los sistemas de gestión. El otro 45% se refiere a servicios técnicos externos. Ver cuadro 5.

Otros programas ambientales implementados en las empresas son la reducción de emisiones por fuentes fijas, la reducción en el consumo-descarga de agua, la reducción en la generación de residuos sólidos y la disminución de las deficiencias en el uso de la energía. Estos últimos programas derivan

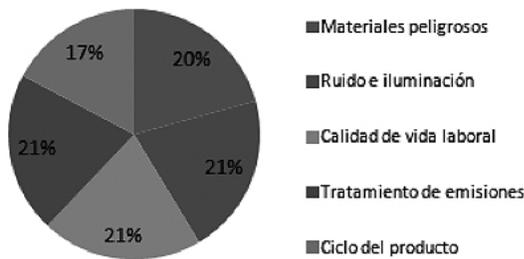


Cuadro 6. Programas ambientales implementados y temas ambientales en los programas de capacitación.



Cuadro 7. Tiempo dedicado a la capacitación y tipo de auditorías realizadas.

Aspectos del programa de gestión ambiental



Cuadro 8. Aspectos contemplados en los programas de gestión ambiental.

de la búsqueda de un uso más eficiente de los recursos y del mantenimiento constante de los equipos. Ver cuadro 6a.

En cuanto a los programas de capacitación que las empresas imparten a los trabajadores, y en algunos casos a los contratistas, se declaró que los principales temas son: legislación ambiental y tratamiento adecuado de efluentes; en segunda instancia está reducir la generación de residuos; y en menor proporción, el análisis de riesgos en una emergencia ambiental. Cuadro 6.

A pesar de que la mayoría de las empresas dedica entre un 20 y 50% de sus tiempos de capacitación a abordar temas ambientales, ninguna

empresa de las participantes ha desarrollado actividades de formación de técnicos y especialistas en tecnologías medioambientales y tampoco han solicitado realizar un estudio de amparo ambiental. Ver cuadro 7.

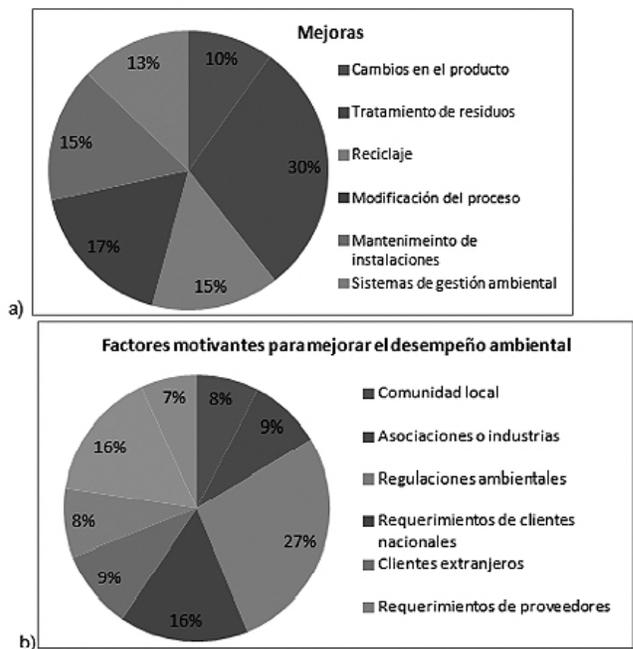
En las empresas se cuenta con un departamento encargado de seguridad e higiene industrial, mismo que se encarga de la gestión ambiental y en algunos casos del control de la calidad. En general, se cumple con todas las normas aplicables para cada empresa; se reconoce como prioritarias aquellas emitidas por: Profepa, SCT, Semarnat, STPS, Sener, SSA, así como los reglamentos estatales.

El hecho de que todas las empresas cuenten con certificación en Industria Limpia y con certificado ISO-9000, además de que la mayoría cuentan con certificaciones de Responsabilidad Integral (emitida por la ANIQ) e ISO-14001, es un buen indicador de la conciencia que tienen estas empresas en el tema de cumplimiento normativo.

Los principales indicadores ambientales manejados por estas empresas son: reducción de emisiones, reducción de descargas, control del DQO de descargas y reducción del consumo eléctrico. Véase cuadro 8. Algunas de estas empresas manejan indicadores de desarrollo sustentable sin considerarlos como tal. Algunos de estos indicadores abordan el ámbito social: número de empleados, número de contrataciones mensuales, número de bajas mensuales de personal; y el ámbito económico: toneladas de producto elaborado anualmente, ingresos económicos por concepto de exportaciones, ventas nacionales, aumento en las exportaciones.

Las principales barreras externas detectadas por las empresas que se presentan en temas de mejora ambiental son la falta de tecnología, las políticas gubernamentales y la infraestructura inadecuada. Internamente reconocen que existen otros temas a los que se les da la prioridad. A pesar de estas barreras se han obtenido algunas mejoras como cambios tecnológicos en el proceso para disminuir las mermas, implementación de sistemas de tratamiento de residuos, programas de mantenimiento a las instalaciones, entre otros. En los aspectos ambientales los principales incentivos son; el cumplimiento de las regulaciones ambientales y las especificaciones y exigencias de los clientes.

La recuperación de residuos ineludibles en los procesos de otras plantas es una de las prácticas más comunes en las experiencias de EI en el mundo; sin embargo, la eficiencia energética y el reúso de recuperación de agua vienen a agregarse también como elementos importantes. Un proceso de gestión ambiental orientado hacia la EI considera tres líneas fundamentales: herramientas para la reducción de residuos en el origen; reciclaje, una vez



Cuadro 10. Mejoras en distintos rubros y factores que motivan la mejora en el desempeño ambiental.

generados los residuos; tratamiento y valorización de los mismos. Estos elementos se incorporan en un programa de buenas prácticas, tal como se ve en el siguiente diagrama.

Diagrama 1. Proceso de gestión ambiental para la ecología industrial



Fuente: Elías, X. (2009); *Reciclaje de residuos industriales*; 2ª ed. Díaz de Santos, España

La gestión ambiental “se está volviendo central para la estrategia corporativa y está siendo manejada como un área de competencia más que como una función orientada al cumplimiento” (Lenta & Wells, 1992. Citado en Epstein, M., 2000, 24). En ese sentido, el mismo Epstein señala que los negocios pueden jugar un papel clave en la protección ambiental si se utiliza esta visión para crear ventajas competitivas. Esta visión se percibe en varias empresas de Altamira; esto puede ser aprovechado por el gobierno para combinar la política ambiental, incorporando sanciones e instrumentos económicos con la decisión de las empresas, por las ventajas que les ofrece el mercado.

CONCLUSIONES

La atención del medio ambiente no es un asunto de moda en las empresas, sino que se ha vuelto un tema imprescindible al momento de definir sus estrategias; muchas de ellas se han percatado de que las acciones a favor del ambiente pueden representar una ventaja competitiva en el mercado.

El hecho de que, a partir de principios de los años noventa, se hayan tenido manifestaciones del sector empresarial a favor de mejoras en las prácticas productivas, ha permitido que se avance en el desarrollo de importantes herramientas y métodos probados y homologados para acompañar a las empresas en el cumplimiento de objetivos ambientales.

Los sistemas de gestión ambiental representan hoy un método altamente confiable para que, de manera eficiente y efectiva, las empresas que así lo decidan alcancen los objetivos ambientales que se propongan. Sin embargo, es claro que las posibilidades que ofrece esta herramienta también pueden ser utilizadas sólo para generar una imagen, sin un real compromiso que se traduzca en modificación de sus valores y de sus actividades.

Apoyarse en una política ambiental, sea desde la planta o desde el corporativo, favorece y establece condiciones más adecuadas para la consolidación

de sinergias y la ejecución de ecoeficiencias. Esto se observa en las seis empresas que se han estudiado, donde el desempeño ambiental está por encima del promedio de las empresas en México, aún cuando las motivaciones se centren prioritariamente en cuestiones de rentabilidad y en evitar sanciones por parte de la autoridad ambiental.

En México existe una mayor implantación de sistemas formales de gestión ambiental en las grandes empresas, como fue el caso de las seis empresas aquí analizadas, las cuales cuentan con una política ambiental y se están certificando bajo la norma ISO14001. Desafortunadamente, más del 90% de las empresas en el país son pequeñas y microempresas a las que el problema de la sobrevivencia les impide dedicar parte de sus recursos a establecer un SGA.

Como se ha señalado, la EI busca establecer una interrelación entre las industrias, el medio social y el medio natural para aproximarse a cerrar el ciclo de materia y energía. En ese sentido las empresas estudiadas, al incorporar en su funcionamiento los sistemas de gestión ambiental, también incorporan el principio de la EI, ya que no sólo se logran mayores eficiencias, sino que en el camino se minimizan los impactos sobre el ambiente, se aprovechan los recursos existentes y los residuos que se generan. El proceso de reciclaje de materiales y la recuperación de energía quedan implícitos como un objetivo del sistema de gestión, y la posibilidad de alcanzar beneficios sociales y económicos se incrementa considerablemente.

Es un reto para la economía nacional, a través de sus agentes privados (léase empresarios) alcanzar el crecimiento de los negocios, la certidumbre y la estabilidad económica incorporando la consideración del medio ambiente. Esto debe crecer a la par de la conformación de un mercado de consumidores interesados en el tema, que exijan y premien las iniciativas en ese sentido, y que se desarrollen políticas de orientación y apoyo desde el gobierno, que hagan cumplir las sanciones y también proporcionen incentivos a los agentes económicos.

BIBLIOGRAFÍA

- Ayres, R. (1989). Metabolismo industrial y cambio mundial. *Rev. Internacional de Ciencias Sociales* No. 21 (UNESCO); septiembre.
- Ayres, R. (1996). *Industrial ecology. Towards closing the materials cycle*. UK: Edward Elgar.
- Carrillo, G. (2004). Ecología industrial y criterios de interacción. En Fernández y Saleme (comp.) *Dimensión social y humana del crecimiento económico*. México: UAM-X.
- Ayres R.U., Kneese A.V. (1969). Production, consumption and externalities. *American Economic Review* 59 (3), 282-297.
- Carrillo, G. (2005). *Ecología industrial y sustentabilidad. El proyecto sinergia de subproductos en Altamira-Tampico*. Tesis de Doctorado. Barcelona: Universidad de Barcelona.
- Claver, E., Molina, J.F. y Tarí, J.J. (2005). *Gestión de la calidad y gestión medioambiental. Fundamentos, herramientas, normas ISO y relaciones*. Madrid: Pirámide.
- Conde, J. (2003). *Empresa y medio ambiente. Hacia la gestión sostenible*. Madrid: Nivola Libros.
- Conesa, V. (1997). *Los instrumentos de la gestión ambiental en la empresa*. Madrid: MundiPrensa.
- Durán, G. (2007). *Empresa y medio ambiente. Políticas de gestión ambiental*. Madrid: Pirámide.
- Duchin, F. (2009). Input-output economics and material flows. En *Handbook of input-output economics in industrial ecology*. Ecoefficiency in industry and service, Vol. 23.
- Duchin, F. (1990). The conversion of biological materials and wastes to useful product. *Structural change and economic dynamics*, I. Springer: London, New York.
- Elías, X. (2009). *Reciclaje de residuos industriales. Residuos sólidos urbanos y fangos de depuradora*. Madrid: Díaz de Santos.
- Epstein, M. (2000). *El desempeño ambiental en la empresa. Prácticas para costear y administrar una estrategia de protección ambiental*. Bogotá: ECOE-ASCCODI.
- Erkman, S. (1997). Industrial ecology: a historical view. *Journal of Cleaner Production*, 5 (1-2), 1-10.
- Feenberg, A. (1982). *Más allá de la supervivencia*. Madrid: Tecnos.
- Fundación Entorno (1998): *Libro blanco sobre la gestión medioambiental en la industria española*. Madrid: Mundi Prensa.
- Instituto de Estudios Medioambientales-Fundación Universitaria Iberoamericana (2000). Gestión ambiental de la empresa. En *Apuntes del diplomado en formación ambiental*. Vol. V. Barcelona.
- Frosh R. & Gallopoulos N. (1989). Strategies for manufacturing. *Scientific American Review*.
- Jelinski, L.W. et al. (1991). Industrial ecology: concepts and approaches. Ponencia en el coloquio Industrial Ecology (mayo 20-21 de 1991, Washington).
- Pousa, X. (2010). *La gestión medioambiental: un objetivo común. Cómo reducir el impacto medioambiental de las actividades*. Colombia: Ediciones de la Universidad de Bogotá.
- Ritter, W., De la Lanza, G., Pérez, T. (2010). *La soberbia antropogénica y la transdisciplina en el medio ambiente*. México.
- Roberts, H. y Robinson, G. (1999). *ISO 14001 EMS. Manual de sistemas de gestión medioambiental*. Madrid: Paraninfo.
- Schaltegger, S., Burrit, R., y Petersen, H. (2003). *An introduction to corporate environmental management. Striving for sustainability*. UK: Greenleaf Publishing.
- Schmidheiny, S. (1992). *Cambiando el rumbo. Una perspectiva global del empresario para el desarrollo y el medio ambiente*. Colombia: FCE.

Caracterización de un aislado de *Bacillus simplex* nativo de residuos industriales contaminados con cromo hexavalente

Hugo Iván Arrieta Oliva,¹ Manuel de Jesús Aguilar Casas,¹ Alma Rosa Corrales Escobosa,² Pamela Romo Rodríguez,¹ Gloria Alicia Figueroa Aguilar,³ Irving Eduardo Jácome Galarza³ y Félix Gutiérrez Corona^{1*}

RESUMEN

Los compuestos de Cr se encuentran como contaminantes en suelos, aguas y efluentes industriales, debido a su amplio uso en diferentes procesos industriales. Una bacteria aislada de residuos industriales que contienen Cr(VI) y otros metales se caracterizó e identificó como una cepa de *Bacillus simplex* por análisis de ADN_r 16S. En comparación con la cepa silvestre 168 de *Bacillus subtilis*, la cepa de *B. simplex* mostró mayor tolerancia a Cr(VI) y alta eficacia para reducir sus niveles en medio LB (Luria Bertani). Los resultados mostraron que la cepa de *B. simplex* redujo 25 µg/mL de Cr(VI) después de 6 horas, 50 µg/mL en 18-24 horas y casi 100 µg/mL en 48 horas. Además, esta cepa de *B. simplex* muestra resistencia a cefalosporinas y es un organismo moderadamente halotolerante. Su alta eficiencia de biotransformación de Cr(VI) aunado a otras características fisiológicas, indican su potencial en la biotecnología ambiental para la limpieza de desechos industriales.

Palabras clave: Cr(VI), *Bacillus simplex*, environmental biotechnology.

1 Departamento de Biología y 2 Departamento de Química, División de Ciencias Naturales y Exactas, Universidad de Guanajuato. Guanajuato, Gto. Noria Alta s/n, C.P. 36000

3 Laboratorio Estatal de Salud Pública de Michoacán, Secretaría de Salud, Morelia, Mich. C.P.58000

*Autor para correspondencia. Tel. (473) 732 0006 Ext. 8148 Fax: Ext. 8153 xilefgu@gmail.com

1. INTRODUCCIÓN

El cromo es un elemento natural que se encuentra en rocas, plantas, animales, etcétera. Se le puede encontrar en la naturaleza en forma sólida, líquida y gaseosa. Los estados de oxidación más estables del cromo son el trivalente y el hexavalente. El Cr(VI) se asocia con el oxígeno para formar cromatos (CrO_4^{-2}) o dicromatos ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{-2}$). Dicho ion es un oxidante fuerte que en presencia de materia orgánica y pH ácido se reduce a Cr(III) (McGrath, 1990; Katz, 1993). Este último se encuentra presente en aguas naturales en forma de iones libres [$\text{Cr}(\text{H}_2\text{O})_6^{+3}$], hidroxicomplejos, complejos mono y polinucleares, así como especies aniónicas (CrO^{-2} , CrO_3^{-3}); éste puede ser oxidado a Cr(VI) en presencia de exceso de oxígeno y pH básico. El Cr(VI) es altamente tóxico y provoca serios problemas a la salud, puesto que diversos estudios han demostrado que es genotóxico y carcinogénico, además de inhibir también enzimas y la síntesis del DNA (ATSDR, 2008; Losi, 1994; Gunaratnam, 2008). Una razón adicional para la toxicidad del Cr(VI) es que puede ser incorporado de manera activa a las células por el transportador de sulfato (Markovich y James, 1998). El Cr(III), por su parte, es menos tóxico que el Cr(VI) debido a que es poco soluble a pH fisiológicos y a que no es transportado activamente al interior de las células (Ehrlich, 2002).

Los efectos negativos del cromo hexavalente en organismos vivos están bien documentados (Gruber y Jennette, 1978; Cervantes, 1992). Debido a la alta toxicidad del Cr(VI), la contaminación por este ión debería remediarse tan pronto como fuera detectado. En el proceso de curtiduría se utilizan sales de Cr(III), sin embargo, bajo ciertas condiciones, éste es oxidado a la especie cancerígena Cr(VI) (Richard y Bourg, 1991).

La contribución del Cr(VI) al medio ambiente depende de diversas fuentes, entre ellas las actividades antropogénicas, las cuales han ocasionado desequilibrios en las concentraciones de metales pesados existentes de manera normal en la naturaleza, provocando problemas de contaminación.

Los compuestos de cromo pueden estar presentes como contaminantes ambientales en agua, tierra y efluentes industriales debido a su amplio uso industrial (Papp, 1985).

La tradición artesanal en la elaboración de productos de piel, junto con la disponibilidad de materias primas y mano de obra, han favorecido el desarrollo de la industria de la curtiduría en nuestro país. Actualmente, México se encuentra ubicado entre los diez mayores productores de pieles a nivel internacional, pues genera aproximadamente el 4% de la producción mundial. El estado de Guanajuato es el mayor productor a nivel nacional, ya que genera alrededor del 65% del curtido y acabado de cuero. En la ciudad de León existen más de 500 tenerías y, hasta hace poco, la curtiduría ha constituido la principal actividad económica (INE, 2007).

Relacionadas con esta intensa actividad industrial se han desarrollado otras industrias, como la química de suministros, en particular de sales de cromo, utilizadas en fases específicas del tratamiento de pieles.

En la ciudad de León, Guanajuato, varios reportes han indicado contaminación de aguas subterráneas con cromo, tanto trivalente como hexavalente; las fuentes de esta contaminación incluyen los suelos ultramáficos, efluentes de curtidurías, así como una fábrica de suministros de sales de cromo asentada en la ciudad (Armienta y col., 1993; Armienta y Rodríguez, 1995; Robles-Camacho y Armienta, 2000).

Tradicionalmente se han utilizado diferentes métodos para remover el cromo hexavalente de efluentes industriales y sitios contaminados: intercambio iónico, recuperación por evaporación, precipitación con compuestos de bario, precipitación con pepitas de fierro. El procedimiento más utilizado en México involucra la reducción del cromo para llevarlo a su forma trivalente y su subsecuente precipitación con álcali. Los métodos de reducción de cromo varían en función de cada sistema de tratamiento y comúnmente los agentes reductores

empleados son bióxido de azufre, bisulfito, metabisulfito o hidrosulfito de sodio y sulfato ferroso (Watson, 1973); sin embargo, estos métodos de tratamiento presentan ciertas deficiencias tales como: alto costo, requerimiento de manejo cuidadoso de reactivos (bióxido de azufre, ácido sulfúrico), generación excesiva de lodos, baja eficiencia, etcétera.

La factibilidad de procesos de biorrestauración o biotratamiento en la contaminación con cromo es reciente; en ellos se propone aprovechar el potencial genético y metabólico de agentes biológicos, principalmente microorganismos (Cervantes y col., 2001; Gutiérrez-Corona y Cervantes, 2008) y plantas (Gardea-Torresdey y col., 2004, 2005) para remover el Cr(VI) desde el ambiente (cuerpos de agua o suelos contaminados) o para prevenir la contaminación por medio del tratamiento de los residuos industriales.

En estudios previos se han reportado microorganismos (bacterias y hongos) aislados de sitios contaminados con cromo en el estado de Guanajuato (Campos y col., 1995; Ramírez-Ramírez y col., 2004; Acevedo-Aguilar y col., 2006, 2008; Coreño-Alonso y col., 2009). En años recientes, como parte de un proyecto de colaboración internacional (“Bioprospección de microorganismos a partir de residuos industriales y aplicación biotecnológica”, Ref. 95887, apoyado por el Fondo de Cooperación Internacional de Ciencia y Tecnología Unión Europea-México en el periodo 2009-2011), se realizaron estudios de metagenómica que indicaron el tipo de comunidades bacterianas presentes en los residuos de la empresa Química Central de México, S.A. de C.V., ubicada en las afueras de la ciudad de León, Guanajuato (Piñón-Castillo y col., 2010; Brito y col., 2013).

El objetivo de este estudio fue aislar y caracterizar microorganismos cultivables a partir de residuos industriales que contienen cromo, y con cepas seleccionadas, llevar a cabo su identificación por procedimientos moleculares.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 *Microorganismos*

Se utilizaron la cepa C20 de *B. simplex*, aislada en este trabajo (ver más adelante), y la cepa silvestre 168 de *B. subtilis*.

2.2 *Medios de cultivo*

Se utilizaron los medios de cultivo complejos YPG y LB, que contienen YPG (10 g extracto de levadura, 20 g peptona y 20 g glucosa), LB (5 g extracto de levadura, 5 g NaCl y 10 g peptona) en g/L.

2.3 *Aislamiento de microorganismos de residuos industriales*

Una muestra de 1 g de residuo sólido de la empresa Química Central, S.A. de C.V., se suspendió en 10 mL de agua estéril y se incubó en agitación por 6 h. Se realizaron diluciones del sobrenadante, que se utilizaron para determinar la concentración de Cr(VI) por el método de la difenilcarbazida y para inocular al medio YPG, conteniendo una concentración final de 50 $\mu\text{g/mL}$ de Cr(VI). Las colonias microbianas obtenidas se pasaron al medio YPG sólido, aislando colonias mediante inoculación por estriado; las colonias aisladas se volvieron a pasar al mismo medio conteniendo 100 $\mu\text{g/mL}$ de Cr(VI) mediante inoculación por estriado; este procedimiento se repitió dos veces más.

2.4 *Antibiograma*

Se determinó la resistencia de la cepa C20 a los antibióticos nitrofurantoína, cloranfenicol, ampicilina, gentamicina, trimetropin/sulfametoxazol, netilmicina, levofloxacin, ceftriaxona, cefotaxima, cefalotina, cefepime por medio de un antibiograma en un equipo automatizado de la marca bioMérieux.

2.5 *Morfología celular*

Se realizó el crecimiento de la cepa C20 en medio de esporulación de Schaeffer o NSM (Schae-

ffer, 1965) para esporulación; se usó como control la cepa silvestre de referencia 168 de *B. subtilis*.

2.6 Evaluación del crecimiento en medio salino

Se determinó la sensibilidad de la cepa C20 para crecer en medio mínimo M9 y M9 adicionado con extracto de levadura (1 g/L), usando concentraciones 0.5 y 1.0 M de cloruro de sodio (NaCl).

2.7 Evaluación de la sensibilidad a Cr (VI) en medio complejo

Se evaluó la sensibilidad de las cepas C20 de *B. simplex* y 168 de *B. subtilis* por cultivo en medio sólido y líquido Luria Bertani (LB) usando 0, 25, 50, 75, 100, 150, 200, 300 y 400 $\mu\text{g/mL}$ de Cr(VI).

2.8 Determinación de la reducción de Cr(VI) en medio complejo

Para valorar la reducción de Cr(VI) se realizó una cinética de crecimiento de las cepas C20 de *B. simplex* y 168 de *B. subtilis* cultivadas en medio LB, conteniendo 0, 10, 25, 50, 100 y 200 $\mu\text{g/mL}$ del metal. El Cr(VI) remanente en el medio de cultivo se determinó por el método de la difenilcarbazida (NMX-AA-044-SCFI-2001) y el cromo total por espectrometría de absorción atómica (NMX-AA-051-SCFI-2001).

2.9 Aislamiento de ADN genómico

Para la identificación molecular del aislamiento bacteriano, del crecimiento en LB se extrajo el ADN genómico de la cepa C20 de *B. simplex* mediante el procedimiento descrito por McClelland (2001).

2.10 Amplificación del gen rDNA 16S por PCR

A partir del ADN genómico extraído de la cepa C20 de *B. simplex* se realizó la amplificación del gen rDNA 16S de la cepa usando los oligonucleótidos iniciadores 27F (5'-AGAGTTAGAGTTT-GATCMTGGCTCAG-3') y 907R (5'-CCGTCA-ATTCMTTTGAGTTT-3') (Lane y col., 1991) durante 35 ciclos, para obtener una banda esperada

de 880 pb. Cada ciclo constó de 30 seg a 95 °C de desnaturalización, 30 seg a 55 °C para alineamiento y 150 seg a 72 °C de extensión, seguido de una extensión final durante 10 min a 72 °C (modelo T100TM ThermalCycler Bio-Rad). El producto amplificado fue purificado para su posterior clonación mediante el uso del kit GeneJET Gel Extraction de la marca Thermo Scientific.

2.11 Clonación y secuenciación del gen rDNA 16S

A partir del rDNA 16S amplificado, se efectuó la clonación del fragmento del gen en el vector comercial pJET 1.2 de la marca Thermo Scientific, y posteriormente se transformaron bacterias de *E. coli* DH5 α competentes, seleccionándose las colonias transformantes en placas de medio LB adicionado con ampicilina (100 $\mu\text{g/mL}$). La recuperación de los plásmidos se realizó con el kit GeneJET Plasmid Miniprep de la marca Thermo Scientific.

La secuencia del fragmento determinada por la empresa ElimBiopharmaceutical Inc., fue analizada en el servidor del NCBI (<http://www.ncbi.nlm.nih.gov>) mediante el uso de la herramienta BLAST(n).

2.12 Identificación de posibles factores de resistencia presentes en plásmidos.

Con la finalidad de identificar algún potencial gen de origen plasmídico usado por la *B. simplex* como factor de resistencia a Cr(VI) y/o a antibióticos del tipo de las cefalosporinas, se usaron diferentes metodologías para aislamiento de plásmidos y el posterior análisis por electroforesis en geles de agarosa. Se emplearon las metodologías descritas Kado (1981) y Russel (2001), además del kit GeneJET Plasmid Miniprep de la marca Thermo Scientific para aislamiento de plásmidos, con la finalidad de extraerlos en caso de que estuvieran presentes.

2.13 Análisis estadístico

En las gráficas con datos cuantitativos, los valores mostrados representan la media de tres expe-

rimentos independientes por duplicado; las barras indican la desviación estándar.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La determinación del contenido de Cr(VI) en la muestra de residuo sólido industrial indicó una concentración de alrededor de 1200 $\mu\text{g}/\text{mL}$. Las diluciones de este residuo inoculadas en medio YPG sólido, conteniendo 50 y 100 $\mu\text{g}/\text{mL}$ de Cr(VI), produjeron colonias de hongos y de bacterias. De estas últimas, la resiembra repetida para aislar colonias en el mismo medio con la concentración indicada de Cr(VI), condujo a la obtención de aislados de origen independiente que mostraban crecimiento vigoroso. Uno de los aislamientos bacterianos se denominó C20 y se seleccionó para estudios adicionales. Se evaluaron diferentes características fenotípicas de la cepa C20, tales como morfología de las células, sensibilidad a antibióticos, crecimiento en medio salino, sensibilidad a Cr(VI), así como la capacidad de reducción de los niveles de este oxianión en el medio de cultivo.

Para lograrlo, primeramente se evaluó la sensibilidad a un espectro de diversos antibióticos, obteniéndose que la cepa C20 presenta sensibilidad a: nitrofurantoína, cloranfenicol, ampicilina, gentamicina, trimetropin-sulfametoaxol y netilmicina, además de sensibilidad intermedia a levofloxacina. Por otra parte, el aislamiento C20 mostró resistencia frente a los antibióticos de tipo cefalosporina ceftriaxona, cefotaxima, cefalotina y cefepime.

Se realizó también el crecimiento de la cepa C20 así como de la cepa de referencia de *B. subtilis* 168, usada como control, en medio NSM, el cual permite la formación de esporas. La figura 1 ilustra la morfología celular del aislamiento C20 y de la cepa 168 de *B. subtilis*; donde puede apreciarse que el aislamiento C20 presenta una morfología bacilar, al igual que la cepa 168 de *B. subtilis*, además de poseer la capacidad para formar esporas.

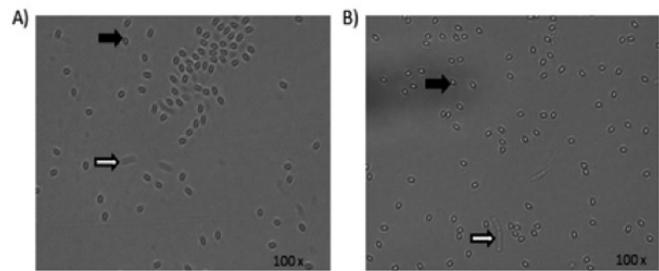


Figura 1. Morfología celular del aislamiento C20 y de la cepa 168 de *B. subtilis*. A) Se observan esporas de la cepa de referencia 168 de *B. subtilis* (flecha negra) y células vegetativas (flecha blanca); B) se observan esporas del aislamiento C20 (flecha negra) y células vegetativas (flecha blanca).

Como parte de la evaluación de la sensibilidad del aislamiento C20 a crecer en medio salino, se realizó el crecimiento del aislado en medio M9, solo o adicionado con extracto de levadura 0.1%, conteniendo o no NaCl en concentraciones 0.5 y 1 M (figura 2). Según la clasificación de Kushner y Kamekura (1988), el aislamiento C20 puede ser clasificado como un organismo halófilo moderado con crecimiento óptimo en concentraciones entre 3 y 15 % NaCl (p/v). Dicha tolerancia podría explicarse por el hecho de que los residuos industriales de los que fue aislado C20 son hipersalinos (Brito y col., 2013). Para evaluar la sensibilidad del aislamiento C20 a Cr(VI) se determinó su crecimiento en medio sólido LB. La Fig. 3 ilustra la sensibilidad al Cr(VI) del aislamiento C20 y de la cepa 168 de *B. subtilis*. En dicha figura puede apreciarse que, a partir de una concentración de 25 $\mu\text{g}/\text{mL}$, que es la más baja proporción de Cr(VI) probada, es aparente que el aislamiento C20 presenta una mayor resistencia en comparación con *B. subtilis* y, conforme aumenta la concentración del Cr(VI), la resistencia por parte del aislamiento C20 se hace más notoria. En el medio probado (medio complejo LB), el aislado C20 mostró la capacidad de crecer en presencia de hasta 400 $\mu\text{g}/\text{mL}$ de Cr(VI).

Para evaluar de otra manera la diferencia en sensibilidad a Cr(VI) del aislamiento C20 y de la cepa 168 de *B. subtilis*, se realizó el crecimiento de ambas en medio líquido LB, conteniendo diferen-

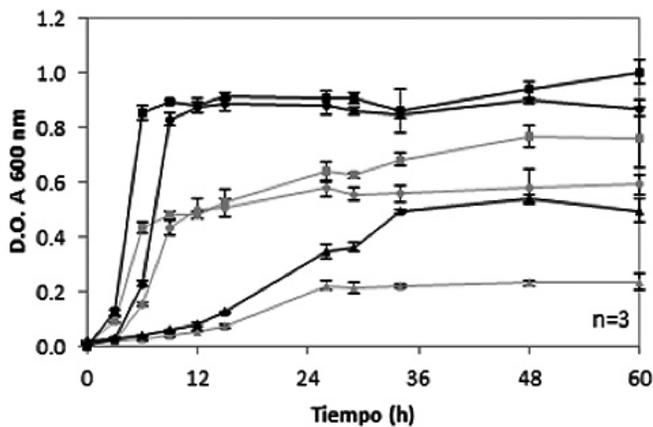


Figura 2. Crecimiento en medio salino. Crecimiento del aislamiento C20 en medio M9 (■), M9 con NaCl 0.5 M (●), M9 con NaCl 1M (▲), M9 adicionado con extracto de levadura (■), M9 adicionado con extracto de levadura y NaCl 0.5 M (●) y M9 adicionado con extracto de levadura y NaCl 1 M (▲).

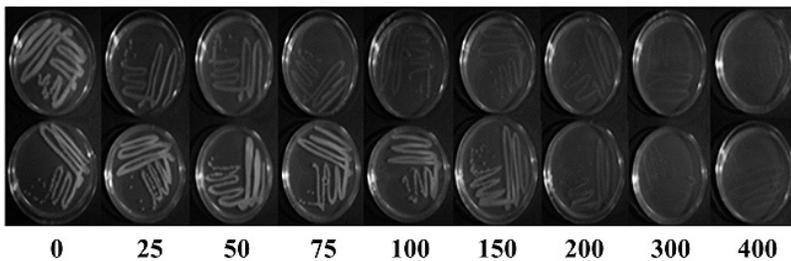


Figura 3. Crecimiento en medio sólido Luria Bertani (LB) de la cepa 168 de *B. subtilis* (superior) y el aislamiento C20 (inferior) en un gradiente de 0 a 400 µg/mL de Cr(VI).

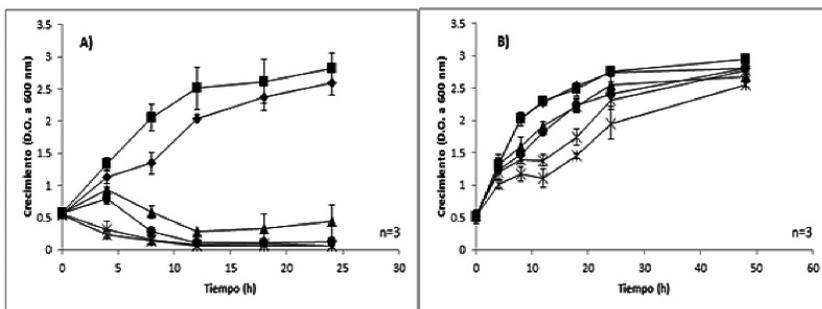


Figura 4. Efecto del Cr(VI) en el crecimiento en medio LB líquido. de las cepas 168 de *B. subtilis* (A) y C20 de *B. simplex* (B). Las concentraciones de Cr(VI) probadas fueron: 0 µg/mL (○), 10 µg/mL (◐), 25 µg/mL (◑), 50 µg/mL (◒), 100 µg/mL (◓) y 200 µg/mL (◔).

tes concentraciones de Cr(VI) (figura 4). En este medio, el aislamiento C20 mostró crecimiento en presencia de hasta 200 µg/mL de Cr(VI), mientras que la cepa 168 de *B. subtilis* presentó crecimiento apreciable únicamente a la concentración de 10 µg/mL de Cr(VI), ya que a concentraciones mayores del ion ocurrió disminución de la absorbancia en los cultivos, probablemente debido a lisis celular. Dado que en los cultivos del aislamiento C20 incubados en presencia de 200 µg/mL o menos no ocurrió disminución de la absorbancia, se puede interpretar que en este caso no ocurrió lisis celular, posiblemente como consecuencia de la expresión de algún mecanismo de detoxificación del Cr(VI).

Al evaluar la reducción de Cr(VI) por el aislamiento C20 y la cepa 168 de *B. subtilis* en medio líquido LB, se observó que C20 tiene la capacidad de reducir el Cr(VI) hasta en un 100% si en el medio se adicionan concentraciones de 50 y 100 µg/mL, y lo realiza dentro de un periodo de 18 y 48 h, respectivamente, sin existir una modificación de la concentración del cromo total en el medio (figura 5). En el caso de los cultivos con la cepa 168 de *B. subtilis*, se observó una menor disminución del Cr(VI), ya que sólo se observó una reducción parcial del mismo en los medios con hasta 100 µg/mL; es probable que esta disminución del Cr(VI) se deba a una reducción realizada por metabolitos intracelulares, que se liberan al medio por la lisis de las células. Estas observaciones sugieren que en el aislamiento C20 existe un mecanismo de reduc-

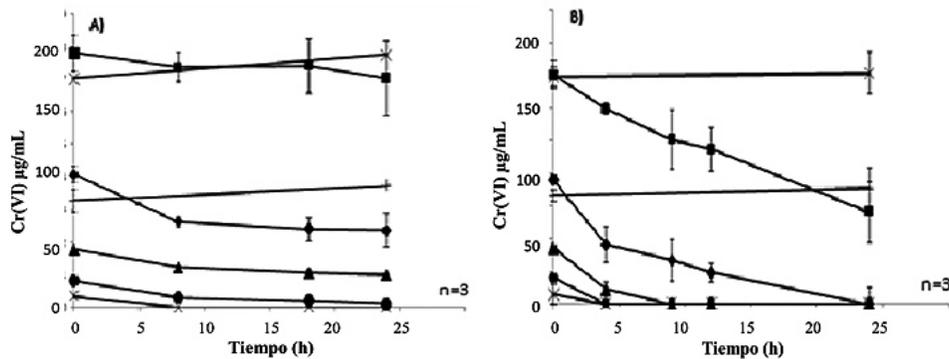


Figura 5. Reducción de Cr(VI) en medio LB por las cepas 168 de *B. subtilis* (A) y C20 de *B. simplex* (B). Las concentraciones iniciales de Cr(VI) fueron: 10 µg/mL (), 25 µg/mL (), 50 µg/mL (), 100 µg/mL () y 200 µg/mL (). Se muestra la determinación del cromo total en los cultivos con 200 µg/mL () y 100 µg/mL () de Cr(VI).

ción de Cr(VI) en el medio extracelular, de acuerdo a lo reportado por Bander y col. (1995).

El aislamiento C20 presenta características de reducción de Cr(VI) muy similares a las descritas para la cepa bacteriana descrita por Masood y Malik (2011), perteneciente al género de *Bacillus spp.*, que tiene la capacidad de reducir hasta 100 µg/mL del Cr(VI) presente en el medio, en un periodo mayor a 50 horas; aunque, en este caso, el mecanismo por el cual se realiza la disminución de Cr(VI) no se conoce, ya que la concentración de cromo total en el medio no se determinó.

Por su parte, Shakoori y Makhdoom (2000) reportaron una cepa bacteriana con la capacidad de reducir hasta el 90% el Cr(VI) del medio, usando una concentración de 80 µg/mL; adicionalmente, ellos observaron que mientras mayor era la concentración del Cr(VI) adicionado, mayor era la reducción del ión. Sin embargo, los autores no reportaron si la reducción era debida a mecanismos intrínsecos de la cepa, o si ocurría por metabolitos intracelulares que conllevaban la lisis celular.

La secuenciación del fragmento del gen rDNA 16S mediante el uso de iniciadores universales, y el análisis y comparación de la secuencia contra la bases de datos del NCBI (<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/>), indicó que la cepa C20 corresponde a la bacteria *Bacillus simplex* (número de acceso

NR_042136), con una identidad del 99%.

Para la identificación de posibles factores de resistencia presentes en plásmidos de la cepa C20 de *B. simplex*, se usaron diferentes metodologías sugeridas para el aislamiento de plásmidos, pero no se logró

detectar el aislamiento de ninguno (datos no mostrados).

4. CONCLUSIONES

Los datos obtenidos indican que el aislamiento C20 es una cepa de *B. simplex*, la cual es tolerante a Cr(VI) y posee un mecanismo de reducción del ion en el medio extracelular. Por estas características, la cepa puede ser considerada como un prospecto con potencial para ser usado en procesos biotecnológicos de remoción de Cr(VI).

AGRADECIMIENTOS

Este proyecto fue realizado con apoyo de la Dirección de Apoyo a la Investigación y Posgrado (DAIP) de la Universidad de Guanajuato y del proyecto Biometal (ANR-Conacyt C0011-FR12-01 n. 188775). La empresa Química Central de México, S.A. de C.V., proporcionó facilidades para la toma de muestras de sus residuos.

REFERENCIAS

- Acevedo Aguilar, F. J., Wrobel, K., Lokits, K., Caruso, J. A., Coreño Alonso, A., Gutiérrez-Corona, J. F. y Wrobel, K. (2008). Analytical speciation of chromium in in-vitro cultures of chromate-resistant filamentous fungi. *Anal Bioanal Chem*, 392, 269-276.
- Acevedo-Aguilar, F. J., Espino-Saldaña, A. E., León-Rodríguez, I. L., Rivera-Cano, M. E., Ávila-Rodríguez, M., Wrobel, K., Lappe, P., Ulloa, M. y Gutiérrez-Corona, J. F. (2006). Hexavalent chromium removal in vitro and

- from industrial wastes using chromate-resistant strains of filamentous fungi indigenous from contaminated wastes. *Can J Microbiol*, 52, 809-815.
- Armienta, M. A., Rodríguez, R., Quere, A., Juárez, F., Cenicerros, N. y Aguayo, A. (1993). Groundwater pollution with chromium in Leon Valley, Mexico. *Int J Environ Anal Chem*, 54, 1-13.
- Armienta-Hernández, M.A. y Rodríguez-Castillo, R. (1995). Environmental exposure to chromium compounds in the valley of León, México. *Environ Health Perspect*, 1, 47-51.
- ATSDR (2008). Toxicological profile for chromium. Agency for Toxic Substances and Disease Registry, U. S. Department of Health and Human Services, Atlanta, GA.
- Bander, J., Lee, R. F. y Philips, P. (1995). Uptake and transformation of metals and metalloids by microbial mats and their use in bioremediation. *Ind Microbiol*, 14, 113-118.
- Brito, E. M., Piñón-Castillo, H. A., Guyoneaud, R., Caretta, C. A., Gutiérrez-Corona J. F., Durán, R., Reyna-López, G. E., Nevárez-Moorillón, G. V., Fahy, A., y Goñi-Urriza, M. (2013). Bacterial biodiversity from anthropogenic extreme environments: a hyper-alkaline and hyper-saline industrial residue contaminated by chromium and iron. *Appl Microbiol Biotechnol*, 97, 369-378.
- Campos, J., Martínez-Pacheco, M. y Cervantes, C. (1995). Hexavalent chromium reduction by a chromate-resistant *Bacillus* sp. strain. *Antonie van Leeuwenhoek*, 68, 203-208.
- Cervantes, C. y Silver, S. (1992). Plasmid chromate resistance and chromate reduction. *Plasmid*, 27, 65-71.
- Cervantes, C., Campos-García, J., Devars, S., Gutiérrez-Corona, F., Loza Tavera, H., Torres-Guzmán, J. C. y Moreno-Sánchez, R. (2001). Interactions of chromium with microorganisms and plants. *FEMS Microbiol Rev*, 25, 335-347.
- Coreño-Alonso, A., Acevedo-Aguilar, F. J., Reyna-López, G. E., Tomasini-Campocoso, A., Fernandez-Perrino, F. J., Wrobel, K., Wrobel, K. y Gutiérrez-Corona, J. F. (2009). Cr(VI) reduction by an *Aspergillus tubingensis* strain: role of carboxylic acids and implications for natural attenuation and biotreatment of Cr(VI) contamination. *Chemosphere*, 76, 43-47.
- Ehrlich, H. L. (2002). How microbes mobilize metals in ores: a view of current understandings and proposals for further research. *Miner Metall Proces*, 19, 220-224.
- Gardea-Torresdey, J., Peralta-Videa, J., Montes, M., De La Rosa, G. y Corral-Díaz, B. (2004). Bioaccumulation of cadmium, chromium and copper by *Convolvulus arvensis* L.: impact on plant growth and uptake of nutritional elements. *Bioresour Technol*, 92, 229-235.
- Gardea-Torresdey, J. L., de la Rosa, G., Peralta-Videa, J. R., Montes, M., Cruz-Jiménez, G. y Cano-Aguilera, I. (2005). Differential uptake and transport of trivalent and hexavalent chromium by tumbleweed (*Salsola kali*). *Arch Environ Contam Toxicol*, 48, 225-232.
- Gruber, J. E. y Jennette, K. W. (1978). Metabolism of the carcinogen chromate by rat liver microsomes. *Biochem Biophys Res Commun*, 82, 700-706.
- Gunaratnam, M. y Grant, M. H. (2008). Cr(VI) inhibits DNA, RNA and protein syntheses in hepatocytes: involvement of glutathione reductase, reduced glutathione and DT-diaphorase. *Toxicol in Vitro*, 22, 879-886.
- Gutiérrez Corona, J. F. y Cervantes Vega, C. (2008). Interacciones microbianas con el cromo: mecanismos y potencial biotecnológico. *Ide@sConcyteg*, 37, 21-36.
- Instituto Nacional de Ecología, INE <http://www.ine.gob.mx/publicaciones/libros/122/int.html>. 2007
- Kado, S. I., y Liu, S. T. (1981). Rapid procedure for detection and isolation of large and small plasmids. *J. Bacteriol*, 145, 1365-1373.
- Katz, S. A. y Salem, H. (1993). The toxicology of

- chromium with respect to its chemical speciation: a review. *J. Appl Toxicol*, 13, 217-224.
- Kushner, D., y Kamekura, M. (1988). Physiology of halophilic eubacteria. En F. Rodríguez (ed.). *Halophilic bacteria*, vol. 1 (pp. 109-138). Boca Ratón: CRC.
- Lane, D. J. (1991). 16S/23S rRNA sequencing. En Stackebrandt, E. y Goodfellow, M. (eds.). *Nucleic acid techniques in bacterial systematics* (pp. 115-175). New York: John Wiley and Sons.
- Losi, M. E., Amrhein, C. and Frankenberger, W. T. J. (1994). Environmental biochemistry of chromium. *Rev Environ Contam Toxicol*, 136, 91-131.
- Maila, P. M., y Cloete, T. E. (2004). Bioremediation of petroleum hydrocarbons through landfarming: are simplicity and cost-effectiveness the only advantages? *Rev Environ Sci Biotechnol*, 3, 349-360.
- Markovich, D., y James, K. M. (1999). Heavy metals mercury, cadmium, and chromium inhibit the activity of the mammalian liver and kidney sulfate transporter sat-1. *Toxicol Appl Pharmacol*, 154, 181-187.
- McClelland, R. (2001). Gram's stain: the key to microbiology. *Med Lab Observer*, 33, 20-28.
- McGrath, S. P. y Smith, S. (1990). Chromium and nickel, heavy metals in soils. B. J. Alloway (ed.). *Heavy metals in soils* (pp. 125-150). Wiley: New York.
- Masood, F., Malik, A. (2011). Hexavalent chromium reduction by *Bacillus sp.* strain FM1 isolated from heavy-metal contaminated soil. *Bull Environ Contam Toxicol*, 86, 114-119.
- NMX-AA-044-SCFI-2001 Análisis de aguas. Determinación de cromo hexavalente en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas. Método de prueba.
- NMX-AA-051-SCFI-2001 Análisis de agua. Determinación de metales por absorción atómica en aguas naturales, potables, residuales y residuales tratadas. Método de prueba.
- Papp, J. F. (1985). Chromium. En *Bulletin 675, Mineral Facts and Problems*, Washington DC: Bureau of Mines, US Department of the Interior, 139-155.
- Piñón-Castillo, H. A., Brito E. M. S., Goñi-Urriaza, M., Guyoneaud, R., Duran, R., Nevarez-Moorillon, G. V., Gutiérrez-Corona, J. F., Caretta, C. A. y Reyna-López, G. E. (2010). Hexavalent chromium reduction by bacterial consortia and pure strains from an alkaline industrial effluent. *J Appl Microbiol*, 109, 2173-2182.
- Ramírez-Ramírez, R., Calvo-Méndez, C., Ávila-Rodríguez, M., Lappe, P., Ulloa, M., Vázquez-Juárez, R. y Gutiérrez-Corona, F. (2004). Cr (VI) reduction in a chromate-resistant strain of *Candida maltosa* isolated from the leather industry. *Antonie van Leeuwenhoek*, 85, 63-68.
- Richard, F. L., y Bourg, A. C. M. (1991). Aqueous geochemistry of chromium: a review. *Water Res*, 25, 807-826.
- Robles-Camacho, J. y Armienta, M. A. (2000). Natural chromium contamination of groundwater at León Valley, México. *J Geochem Explor*, 68-3, 167-181.
- Russell W., y Sambrook, J. (2001). *Molecular cloning: a laboratory manual*. Cold Spring Harbor, NY: Cold Spring Harbor Laboratory Press.
- Schaeffer, P., Millet J., Aubert, J. P. (1965). Catabolic repression of bacterial sporulation. *Proc Natl Acad Sci*, 54, 704-711.
- Shakoori, A. R., Makhdoom, M., y Haq, R. U. (2000). Hexavalent chromium reduction by a dichromate-resistant gram-positive bacterium isolated from effluents of tanneries. *Appl Microbiol Biotechnol*, 53, 348-351.
- Watson, R. M. (1973). *Pollution control in metal finishing*. Park Ridge, NJ: Noyes Data Corp. [Serie: Pollution Technology Review No. 5].

Modelación espacial de los contenidos de carbono orgánico en suelos volcánicos de Teziutlán, Puebla, México

Gladys Linares Fleites,^{1*} Miguel A. Valera Pérez,¹ Maribel Castillo Morales.¹

RESUMEN

Los suelos derivados de materiales volcánicos se comportan muy diferente que los de origen no volcánico, ya que presentan características particulares. Estas características provocan un peculiar interés por su estudio y su comportamiento en la dinámica de la descomposición de la materia orgánica del suelo y, por ende, por su aporte de carbono orgánico. El objetivo de este trabajo es determinar la relación entre el clima y la distribución espacial de los contenidos de carbono orgánico en suelos (COS) volcánicos de la región de Teziutlán, en el estado de Puebla, México. Los resultados obtenidos permiten constatar la fuerte relación de las variables climáticas con la dinámica del carbono en el suelo y establecer que el COS se presenta en áreas con temperaturas aproximadas de 15.5 a 16 °C y con precipitaciones aproximadas de 120 a 280 mm anuales.

INTRODUCCIÓN

El interés de la comunidad científica por tener una mejor comprensión de la dinámica de descomposición de la materia orgánica del suelo y su posterior almacenamiento, está aumentando, y más aún en suelos volcánicos, ya que los estudios de investigación sobre este tema son muy escasos.

El carbono orgánico del suelo (COS) es uno de sus componentes fundamentales en estos materia-

les, debido a su correlación con varias propiedades y funciones del suelo (Rodríguez *et al.*, 2004). De igual manera, los parámetros climáticos tales como temperatura y precipitación se encuentran fuertemente ligados al contenido de COS y, por ende, a la dinámica de descomposición de la materia orgánica en el suelo.

Asimismo, los suelos derivados de materiales

¹ Posgrado en Ciencias Ambientales y Dpto. en Ciencias Agrícolas, Instituto de Ciencias (ICUAP) Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP) 14 Sur 6301. Jardines de San Manuel, Puebla, Pue., México C.P. 72470. Tel: 2295500 Ext. 7358; Fax: Ext. 7351.

* Correo electrónico: gladys.linares@correo.buap.mx

volcánicos se comportan muy diferente a los de origen no volcánico, ya que presentan características particulares como: mayor contenido de arcillas (con gran superficie específica), un elevado contenido alofánico, alta cantidad de humus, escasa disponibilidad de P (fósforo) y una descomposición más lenta de materiales orgánicos incorporados (Zagal *et al.*, 2002).

El objetivo de este estudio es determinar la relación entre el clima y la distribución espacial del contenido de carbono orgánico del suelo (COS) en la región de Teziutlán, Puebla, México. Esta región, al poseer suelos de origen volcánico, genera un peculiar interés por entender el comportamiento de la dinámica de la descomposición de la materia orgánica en éstos y su posterior almacenamiento como COS.

El conocimiento de la dinámica del carbono en el suelo es de extraordinaria importancia, debido al potencial que tiene este proceso como sumidero de carbono y a la relación e impacto directo que presenta con la disminución de gases de efecto de invernadero, en particular con las emisiones de CO₂. Además de la obtención de beneficios ecológicos, existen beneficios económicos y sociales provenientes de la eventual venta de servicios ambientales.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización del área de estudio

La zona estudiada se encuentra ubicada en la porción nororiental del estado de Puebla, entre los paralelos 19°43'30" y 20°14'54" de latitud norte y los meridianos 97°07'42" y 97°43'30" de longitud oeste. Los suelos objeto de este trabajo son clasificados como andisoles, considerado el grupo más representativo en la faja neovolcánica transmexicana (FNTM), debido a que se trata especialmente de suelos minerales cuya formación está condicionada por el material parental del que provienen (Valera, 1993).

La superficie de la región de estudio es de aproximadamente 5 937.355 km². Ha sido definida

como prioritaria para su conservación debido a la existencia de bosques mesófilos de montaña, presentes en las cañadas, y de selva alta perennifolia en las partes bajas. De esta región se ha seleccionado la zona de estudio, cuya superficie es de 1 117.70 km² aproximadamente (figura 1).

Manejo o procedimientos generales

El estudio se basa en el análisis del suelo y en la determinación del contenido de COS, así como en el procesamiento de la información existente sobre el clima de las estaciones ubicadas en el área de estudio.

Se realizó una prospección de los suelos volcánicos y se estimaron los regímenes de humedad y temperatura usando el método de Thornthwaite en su segunda aproximación, obteniéndose los climogramas y los mapas de isotermas e isoyetas. Finalmente, se relacionaron las variables climáticas con la distribución espacial de los contenidos de COS. Los datos fueron procesados en Golden Surfer Software.

A continuación, se profundiza en el método de estimación de los regímenes de humedad y temperatura.

Método de Thornthwaite

Entre los métodos para conocer el balance hídrico, el de Thornthwaite (Scozzafava y Tallini, 2001) es uno de los más adecuados para su cómputo detallado mensual y anual. En la ecuación de balance, el método de Thornthwaite es usado para evaluar la evapotranspiración actual y la potencial.

La evapotranspiración potencial (PE en mm) se define como el valor máximo que se obtiene de la evapotranspiración en condición de suelo húmedo y se relaciona con la temperatura (t) de la manera siguiente (Thornthwaite y Mather, 1957):

$$PE = 16 \left(\frac{10t}{I} \right)^a \quad (1)$$

donde t es la temperatura media mensual (°C); I es el índice térmico anual, el cual es:

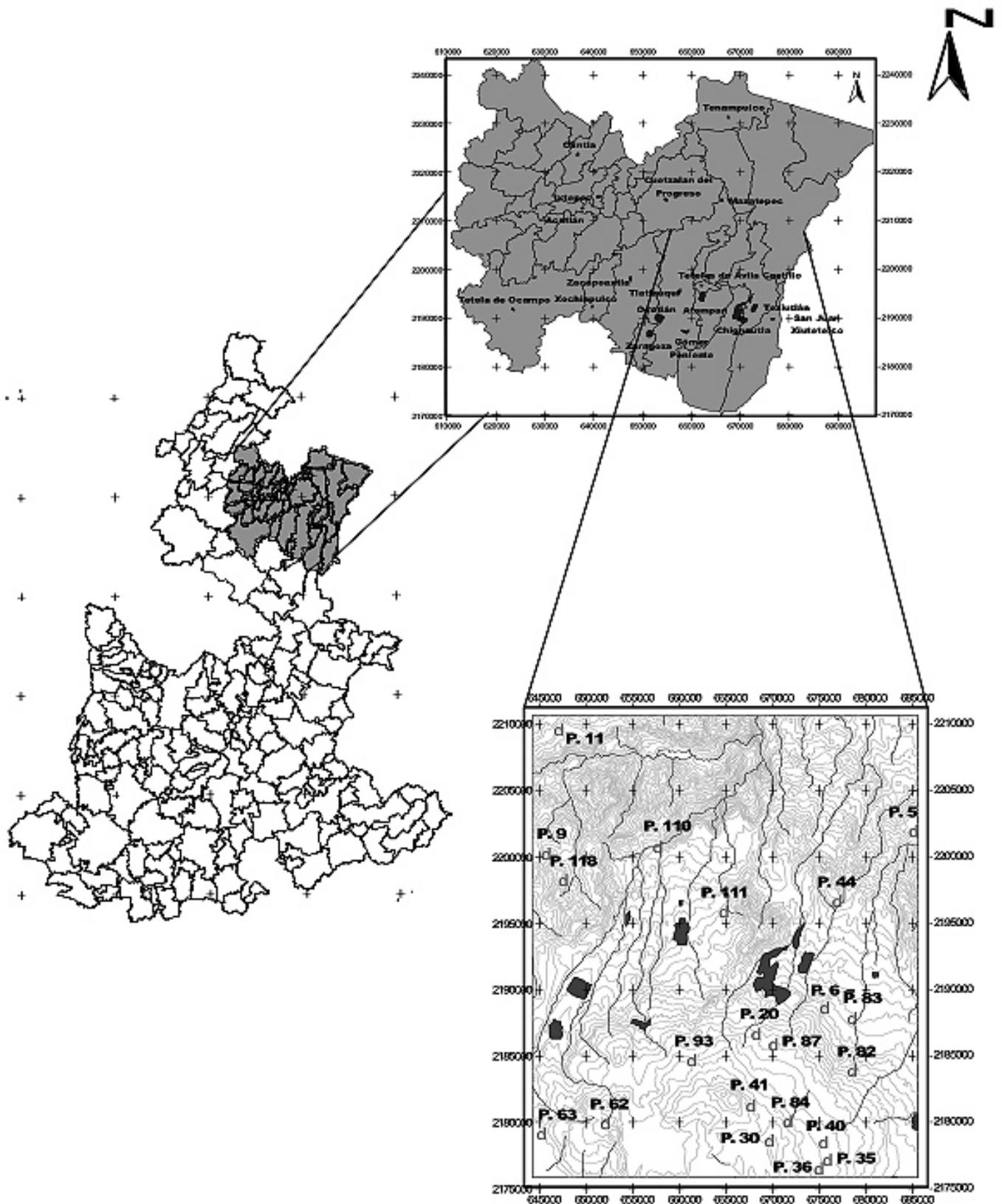


Figura 1. Localización del área de estudio y los puntos de muestreo.

$$I = \sum_1^{12} i_j$$

donde i_j es el índice térmico mensual de un mes j ;

$$i_j = \left(\frac{t}{5}\right)^{1.514}$$

y el exponente a en la ecuación (1) es dada por:

$$a = (675 \times 10^{-9})I^3 - (771 \times 10^{-7})I^2 + (1.792 \times 10^{-5})I + 0.4924$$

La evapotranspiración actual (ae) se evalúa en tres diferentes casos, como se describe un poco más abajo. En las siguientes ecuaciones, i es el mes actual, $e(i-1)$ es el mes anterior. El almacenamiento de agua máximo en el suelo (st) es el agua en el suelo obtenida por extracción higroscópica y agua gravitacional. st es una constante para cada suelo que se encuentra ligada a los fenómenos de capilaridad y peliculares; es una función de las propiedades del suelo (principalmente textura, estructura, mineralogía de los granos del suelo, etcétera). W_i es la cantidad de agua en el suelo para el mes actual (i), y P es la precipitación.

Caso 1: Cuando $P_i - EP_i \geq 0$, entonces:

$$AE_i = PE_i$$

y

$$W_i = W_{i-1} = ST$$

En este caso, la infiltración neta NI_i , está dada por:

$$SU_i = (NI_i + RO_i) = P_i - AE_i$$

Donde SU es el exceso total de agua en el suelo y RO es la escorrentía. En el método estándar de Thornwaite, el cual es usado por agrónomos, SU se introduce sin distinción alguna entre RO y NI .

Caso 2: Cuando $P_i - EP_i < 0$, entonces:

$$AE_i = \frac{W_i}{ST} EP_i$$

$$W_i = W_{i-1} + (P_i - AE_i)$$

$$W_i = \frac{ST}{SR + EP_i} (W_{i-1} + P_i) \quad (2)$$

$$AE_i = \frac{EP_i}{ST + EP_i} (W_{i-1} + P_i)$$

En este caso, SU es igual a cero.

Caso 3a: Cuando $P_i - EP_i \geq 0$ y $W_i < ST$, la ecuación (2) es válida aún y SU es igual a cero. Sin embargo, si usamos la ecuación (2), entonces $W_i > ST$, y esta es una condición que no sucede en la naturaleza, de modo que es necesario imponer el Caso 3b.

Caso 3b:

$$W_i = ST$$

y

$$AE_i = PE_i$$

y también

$$SU = P_i - AE_i > 0$$

Dado que nuestro objetivo es determinar la relación entre el clima y la distribución espacial de los contenidos de cos de los suelos volcánicos de la región de Teziutlán, se resumen a continuación los aspectos de muestreo de suelo y análisis geoes-tadístico investigados previamente.

a) Muestreo de suelo

Se delimitó la zona de estudio y se estableció el diseño muestral de acuerdo con uno de tipo adaptativo propuesto por Thompson (1992), en el cual las regiones o unidades muestrales son seleccionadas basándose en valores de las variables de interés observadas durante un muestreo exploratorio previo. Usando este diseño, se localizaron nuevamente los puntos de muestreo correspondientes a los perfiles ya existentes en la zona (Valera, 1993) y se inclu-

ieron puntos de muestreo al norte, al sur, al este y al oeste del punto georreferenciado (Linares *et al.*, 2009), los que se muestran en la figura 1.

d) Análisis geoestadístico

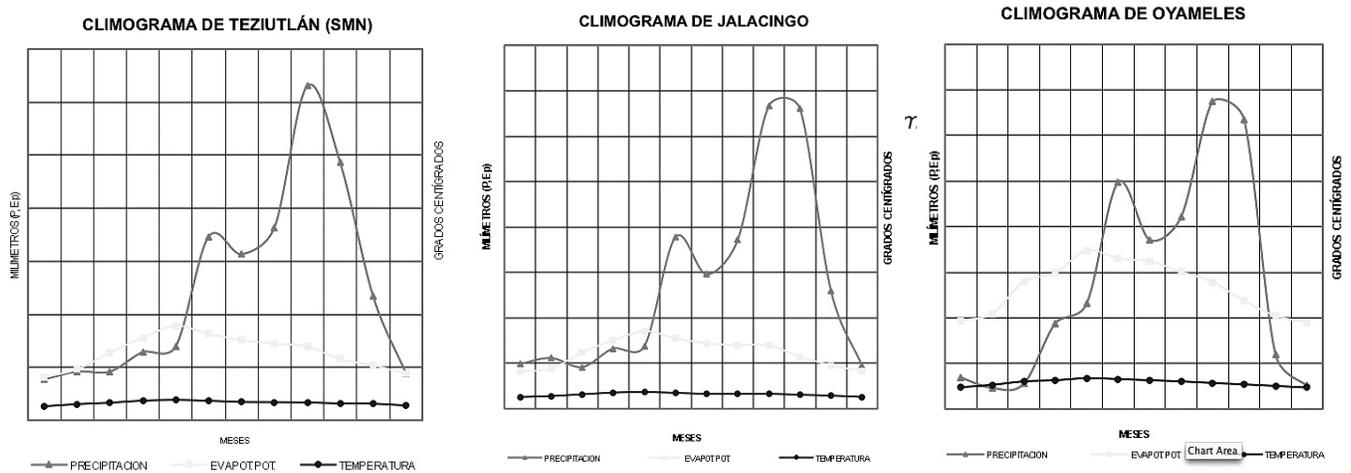
En el análisis de datos geoestadísticos deben estimarse las relaciones espaciales y las predicciones en los puntos no muestreados, así como calcularse la estimación del error estándar de las predicciones (Stein, 1999). Para estimar las relaciones espaciales debe contarse con el variograma, que da una medida de la correlación espacial describiendo cómo están relacionados los datos muestrales con la distancia y la dirección. De esta manera puede detectarse si el proceso es *isotrópico* (si no depende de la dirección) o es *anisotrópico* (si depende de la dirección).

Varias herramientas exploratorias, como las nubes de variogramas y la matriz de anisotropía geométrica, señalaron que los contenidos de COS

de la región provenían de un proceso ligeramente anisotrópico. El variograma empírico brindó la descripción de cómo los datos están correlacionados con la distancia y permitió estimar los parámetros de rango, “sill” y “nugget”, con los valores 9582.39, 0 y 2.298, respectivamente. Se seleccionó el modelo esférico como función del variograma teórico con los parámetros mencionados anteriormente y se obtuvieron las predicciones *kriging* a través de *kriging* ordinario (Linares *et al.*, 2006).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Del análisis de la información climática de las tres estaciones ubicadas en la región de estudio, se obtuvieron los climogramas correspondientes (figura 2), los cuales nos permitieron establecer los regímenes de humedad del suelo, que se clasificaron como ústico y údico (cuadro 1) de acuerdo con los criterios de la Soil Survey Staff (sss, 1999).



Cuadro 1. Regímenes de humedad y temperatura

| Estación | Régimen Humedad | Régimen Temperatura |
|-----------|-----------------|---------------------|
| Teziutlán | Údico | Isotérmico |
| Jalacingo | Údico | Isotérmico |
| Oyameles | Ústico | Isomésico |

En los regímenes de humedad údicos, la sección de control de humedad no está seca en cualquier parte por 90 días acumulados en años normales; además, si la temperatura media anual del suelo es menor de 22 °C, y si las temperaturas medias en invierno y verano a una profundidad de 50 cm de la superficie del suelo difieren de 6 °C o más, la sección de control de humedad del suelo, en años normales, está seca en todas partes por menos de 45 días consecutivos en los cuatro meses siguientes al solsticio de verano. Estos regímenes son comunes en suelos de climas húmedos con lluvias bien distribuidas; tienen suficiente lluvia en verano, de modo que la cantidad de humedad almacenada más la precipitación es aproximadamente igual o excede la cantidad de evapotranspiración, o adecuadas lluvias en invierno para recargar los suelos y veranos fríos.

En los regímenes ústicos, la precipitación excede la evapotranspiración en todos los meses de años normales; la tensión de humedad rara vez alcanza los 100 kPa en la sección de control de humedad del suelo, aunque hay breves periodos ocasionales donde algo del agua almacenada se congela (sss, 1999). Si la temperatura media anual es de 22 °C o mayor, o si la temperatura media del suelo en verano e invierno difiere menos de 6 °C a una profundidad de 50 cm bajo la superficie del suelo, la sección de control de humedad del suelo en áreas con régimen de humedad ústico está seca en algunas partes por 90 días consecutivos o más en años normales. Está húmedo, sin embargo, en algunas partes por más de 180 días acumulados por año o por 90 o más días consecutivos.

Con los climogramas (figura 2 y cuadro 1) se

logró establecer los regímenes de temperatura del suelo en la zona, los cuales se presentaron como isotérmico e isomésico (cuadro 1) de acuerdo con los criterios de la Soil Survey Staff (sss, 1999 y 2006).

En los regímenes isotérmicos, la temperatura media anual del suelo es de 15° C o mayor, pero menor de 22 °C, mientras que para los regímenes isomésicos la temperatura media anual del suelo es de 8 °C o mayor, pero menor de 15 °C (sss, 1999 y 2006).

Con técnicas geoestadísticas y a través del programa Golden Software Surfer V8, se elaboró el mapa de la distribución espacial del cos. En la Figura 3 puede observarse que el almacenamiento del cos se concentra en la parte noreste del sitio.

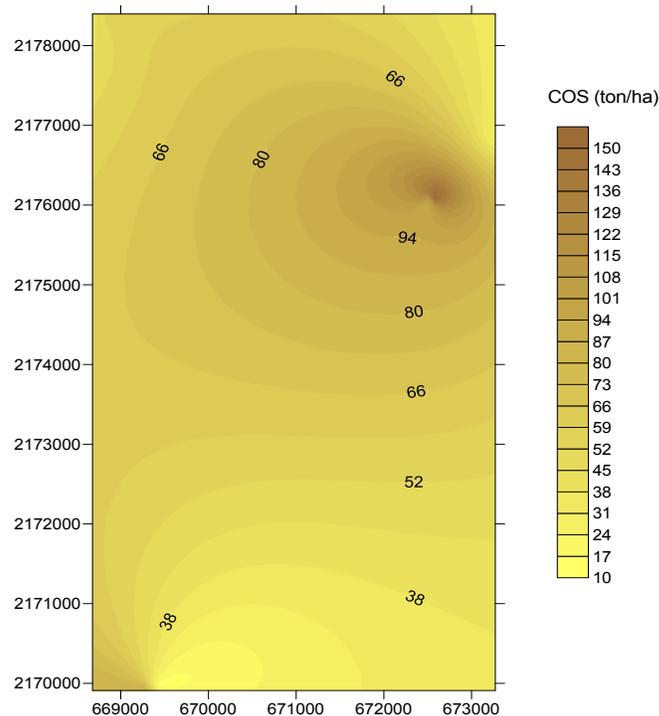


Figura 3. Mapa de distribución espacial del cos

Para validar los resultados se elaboraron los mapas de isotermas e isoyetas. Puede observarse que coincide la mayor distribución de precipitación y de temperatura en la parte noreste del sitio, como se muestra en las figuras 4 y 5 a continuación:

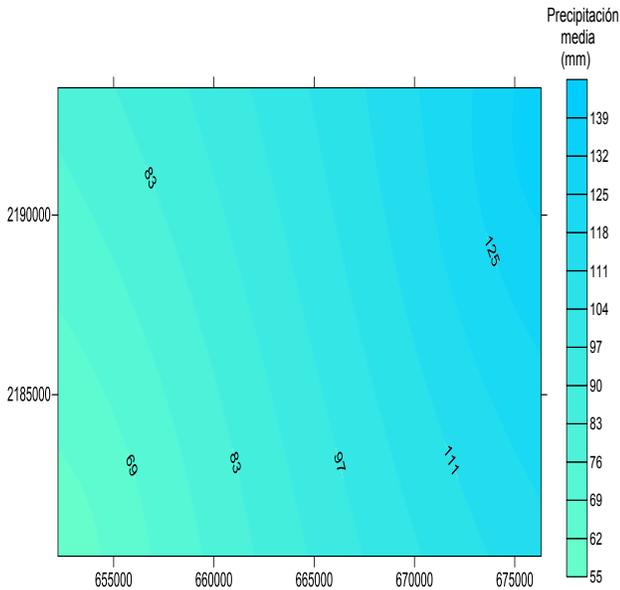


Figura 4. Isoyetas de la región

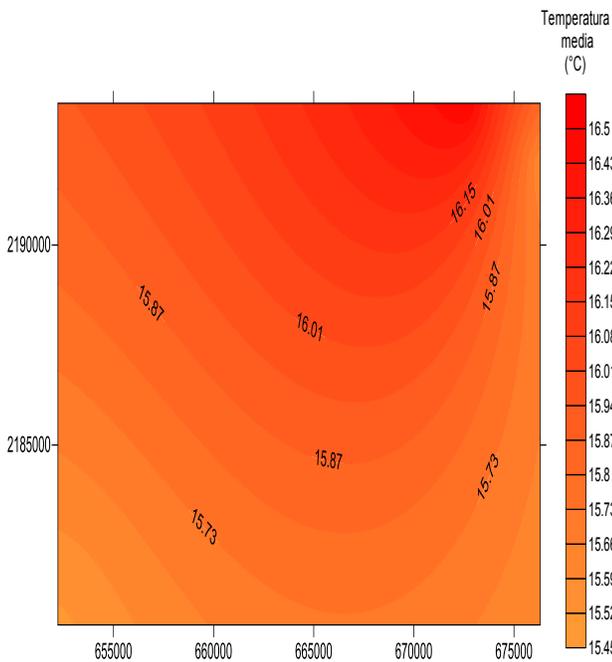


Figura 5. Isotermas de la región

Con toda la información existente se relacionaron las variables climáticas con la distribución espacial de los contenidos de COS, procesándose en Golden Surfer Software. Puede observarse que el almacenamiento del carbono orgánico se concentra a temperaturas y precipitaciones aproximadas de entre 15.5 y 16 °C, y de 120 a 280 mm anuales, respectivamente (figuras 6 y 7).

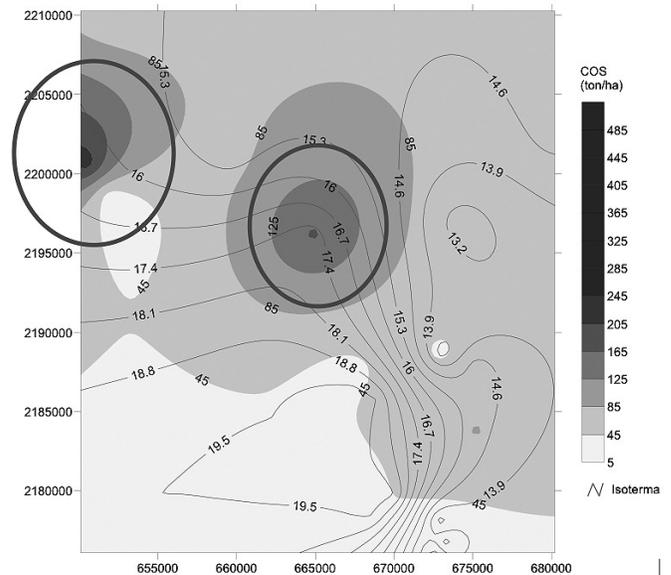


Figura 6. Distribución espacial de los COS, en relación con las isotermas

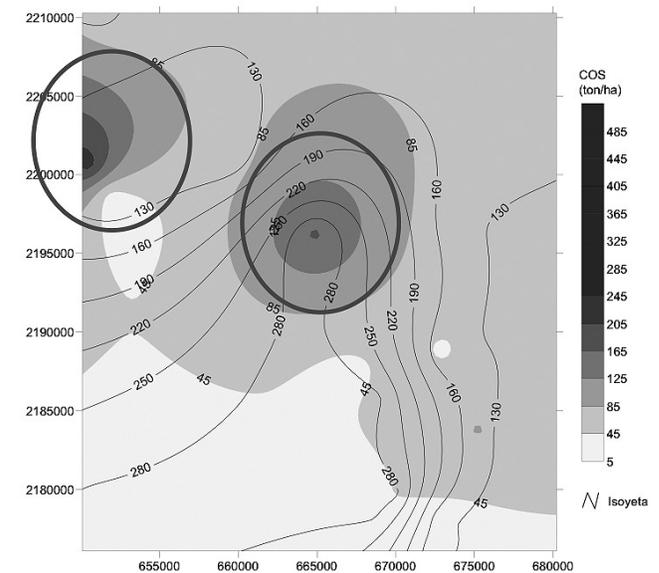


Figura 7. Distribución espacial del COS en relación con las isoyetas.

CONCLUSIONES

Del análisis de la información climática de las tres estaciones ubicadas en la región de estudio, se obtuvieron los climogramas correspondientes, los cuales nos permitieron establecer los regímenes de humedad del suelo, que se clasifican como ústico y údico de acuerdo con los criterios de la Soil Survey Staff. Con los climogramas se logró establecer los regímenes de temperatura del suelo en la zona, los cuales se clasificaron como isotérmico e isomésico. En los isotérmicos, la temperatura media anual del suelo es de 15 °C o mayor, pero menor de 22 °C; en los regímenes isomésicos, la temperatura media anual del suelo es de 8 °C o mayor, pero menor de 15 °C. El almacenamiento del COS se concentró en la parte noreste del sitio, lo que coincidió con la mayor distribución de precipitación y de temperatura.

Se constató la fuerte relación de las variables climáticas con la dinámica del carbono en el suelo, observándose en los mapas que en la región los más altos contenidos de COS se presentan en áreas con temperaturas aproximadas de entre 15.5 y 16 °C, y con precipitaciones aproximadas de 120 a 280 mm anuales.

Finalmente debe destacarse, como un aspecto relevante, que se ha establecido una metodología aplicable en escala regional, que tiene en cuenta las condiciones ambientales, socioeconómicas y de las unidades de suelo que se presentan.

REFERENCIAS

- Golden Surfer Software V8 (2008). Surface Mapping System. Golden Software Inc. (en línea: www.goldensoftware.com).
- Linares, G., Valera, M. A. y Castillo, M. (2009). “Opción de mitigación del cambio climático: secuestro de carbono en suelos de la sierra norte de Puebla, México”. Memorias del I Congreso de Cambio Climático. Palacio de Convenciones de La Habana, Cuba.
- Linares, G., M. A. Valera y Castillo, M. (2009). “Estrategia de muestreo repetido para estimar carbono orgánico del suelo en la Sierra Norte de Puebla”. Memorias del VIII Congreso Internacional y XIV Congreso Nacional de Ciencias Ambientales. Tlaxcala, México.
- Rodríguez, R. A., Arbelo, C. D., Notario, J. S. Mora, J. L., Guerra, J. A., Armas, C. M. (2004). “Contenidos y formas de carbono orgánico en andosoles forestales: aproximación a su dinámica”. Edafología. Revista de la Sociedad Española de la Ciencia del Suelo, SECS. Vol. 11, N° 1, pp. 67-102.
- Scozzafava, M., Tallini, M. (2001). “Net infiltration in the Gran Sasso Massif of central Italy using the Thornthwaite water budget and curve-number method”. Hydrogeology Journal, vol. 9, 461- 475.
- Soil Survey Staff (1999). Soil taxonomy: a basic system of soil classification for making and

- interpreting soil surveys. Handbook, Number 436. US Department of Agriculture Natural Resources Conservation Service.
- Soil Survey Staff (2006). Keys to soil taxonomy. US Department of Agriculture Natural Resources Conservation Service.
- Stein, L. M. (1999). Interpolation of spatial data: some theory for kriging. Ed. Springerlink.
- Thompson, S. K. (1992). Sampling. New York: John Wiley and Sons, Inc.
- Thornthwaite, C. W. y Mather Jr. (1957). Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance. Laboratoty of climatology.
- Grundstein, A. (2009). Evaluation of climate change over the continental United States using a moisture index. Climatic Change, Vol. 93, pp. 103-115.
- Valera Pérez, M. A. (1993). Fisicoquímica y mineralogía de andosoles de la región de Teziutlán, estado de Puebla. Tesis de Maestría en Ciencias (edafología). Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Zagal, E., Rodríguez, N., Vidal, I. y Flores, A. B. (2002). “La fracción liviana de la materia orgánica de un suelo volcánico bajo distinto manejo agronómico como índice de cambios de la materia orgánica lábil”. Agricultura Técnica, 2, 62.

Evaluación ambiental de diferentes escenarios de tratamiento de los residuos sólidos para la ciudad de Chihuahua

M. G. Gómez Méndez,¹ L. M. Rodríguez Valdéz,¹ M. Loya Rivera.¹

RESUMEN

La disposición adecuada de residuos sólidos urbanos (RSU) presenta un problema para las instituciones gubernamentales. Disponer adecuadamente de RSU consiste en seleccionar el tratamiento menos contaminante. Este estudio evaluó ambientalmente cinco escenarios de tratamiento de RSU, aplicando la metodología de análisis de ciclo de vida. Los escenarios propuestos para la evaluación ambiental son los siguientes:

primero, el sistema actual (RS-actual);

segundo, un relleno sanitario con control y tratamiento de emisiones (RS-moderno);

tercero, la combinación de tratamientos: reciclado en un porcentaje bajo y el relleno sanitario actual (RS-actual-RB);

cuarto, la combinación de tratamientos: reciclado en un porcentaje alto y el relleno sanitario actual (RS-actual-RA);

el quinto escenario es la combinación de tratamientos: reciclado en un porcentaje alto y el relleno sanitario moderno (RS-moderno-RA).

Los datos fueron analizados con el software SimaPro, observando que el escenario con mayor impacto ambiental corresponde al RS-actual y el escenario menos contaminante es el RS-moderno-RA.

Palabras clave: Residuos sólidos urbanos, análisis de ciclo de vida

¹Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Chihuahua.

INTRODUCCIÓN

La población de cualquier ciudad o país consume una gran variedad de productos, generando con ello materiales no aprovechables o residuos que se acumulan, originando con ello un problema para la población. Los residuos sólidos se depositan en los vertederos donde se descomponen y generan emisiones que son dañinas para el ser humano y el ambiente en general (Tchobanoglous y Kreith, 2002; McDougall *et al.*, 2002). El plantear sistemas más eficaces y eficientes de manejo de residuos sólidos es una preocupación continua de las instituciones encargadas del aseo urbano. Aunque en la actualidad existen sistemas de gestión de residuos muy desarrollados, los hábitos de consumo de la población difieren de ciudad a ciudad y de país a país (McDougall *et al.*, 2002).

En la ciudad de Chihuahua los residuos se depositan en la acera de la banqueta, contenidos en una bolsa de poliuretano. En ocasiones éstos se encuentran alejados del nivel del suelo, sobre canastas metálicas o en botes, ya sea de plástico o de aluminio; posteriormente, los residuos se transportan al relleno sanitario. La separación de fracciones la realizan los pepenadores durante el transporte de los residuos al relleno sanitario; ahí separan entre otros materiales: metal, cartón y plásticos para su venta posterior (Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos [LGPGIR], 2003).

Actualmente, en la ciudad de Chihuahua se generan 1100 toneladas de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) diariamente, con una composición de 47% de residuos orgánicos, 17% papel, 13% plásticos, 5% vidrio, 3% metales y 15% de otros materiales (Gómez *et al.*, 2009). Los residuos sólidos generados en la ciudad se depositan directamente en el relleno sanitario. La NOM-83-Semarnat-2003 indica que el relleno sanitario es una obra de infraestructura que involucra métodos y obras de ingeniería para la disposición final de los residuos sólidos y de manejo especial. Todo esto con el propósito de controlar, a través de la compactación e infraestructuras adicionales, los impactos ambientales. Sin embar-

go, en el relleno sanitario se percibe la emisión de lixiviados y gases.

Un sistema integral de residuos sólidos municipales requiere de modificaciones en diferentes áreas, pero es importante considerar que el cambio a realizar no afecte el medio ambiente. Por tal motivo, el modelar escenarios de tratamiento para los residuos sólidos y evaluarlos en diferentes condiciones proporciona un panorama amplio para seleccionar el proceso de tratamiento más adecuado. Los tratamientos aplicados a los RSU en diferentes países son: tratamientos térmicos, incineración, compostaje, digestión, recolección de biogás, reciclado y otros. El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es una metodología aplicada para evaluar ambientalmente las emisiones de diferentes tratamientos de los residuos sólidos urbanos (McDougall *et al.*, 2002).

Las primeras aplicaciones del ACV inician en los años sesenta, buscando desde ese tiempo una mejora ambiental en distintas industrias. En el SETAC (Society for Environmental Toxicology and Chemistry) en los años noventa, se presenta el nombre del método y la estructura general, continuando con investigaciones que aplican esta nueva metodología.

Existen varias investigaciones que aplican ACV a la gestión de residuos sólidos. El estudio desarrollado por Rieradevall *et al.* (1997) presenta los resultados de la aplicación del ACV a los residuos sólidos generados en los hogares y llevados al vertedero. Indica que las emisiones derivadas de la biodegradación en el vertedero contribuyen a los impactos de calentamiento global y a la eutrofización, mientras que el transporte contribuye principalmente a la acidificación y a la toxicidad humana.

Una herramienta desarrollada por Camobreco *et al.* (1999) para la fase de inventario del ciclo de vida, evalúa un vertedero moderno (con recolección de gases y lixiviados). Estos investigadores evaluaron el ciclo de vida del vertedero desde la construcción, operación, cierre y atención post-clausura. Además, consideraron en sus resultados

las emisiones asociadas con el consumo de combustible y las emisiones de gas durante las diferentes etapas del vertedero.

Clift *et al.* (2000) insisten en la importancia de la elección concreta de los límites del sistema para la gestión integral de los residuos, incluyendo recolección, transporte y disposición en el vertedero. Además, recomienda definir los límites del sistema claramente para asegurar que los créditos ambientales por la recuperación de energía y materiales sean correctamente evaluados.

En Chihuahua no se tienen información sobre la aplicación del ciclo de vida para la evaluación de la gestión de residuos; sin embargo, hay un estudio realizado por Sojo A. (2001), donde presenta un análisis comparativo de la gestión de residuos sólidos urbanos en los municipios de Puebla (México) y Barcelona (España), bajo criterios ambientales y financieros. Este estudio presenta los resultados ambientales obtenidos del ACV en la gestión de residuos sólidos para cada ciudad. En Puebla, el 100% de los residuos sólidos se depositan en el vertedero y, en Barcelona, el 80%, donde el 14% se incinera y el 6% se recicla. Se presenta la comparación de los impactos ambientales entre las dos ciudades, mostrando mayor impacto ambiental para Puebla en las categorías de calentamiento global, acidificación, ecotoxicidad y fotooxidación química; y para Barcelona, mayor impacto ambiental en las categorías de destrucción de la capa de ozono, toxicidad humana y eutrofización. En las dos ciudades se presenta un impacto ambiental adverso para las categorías analizadas, sin embargo, disminuir el depósito de residuos sólidos en el vertedero reduce el impacto en el calentamiento global.

Morrissey y Browne (2004), presentan los modelos de herramientas usados para tomar decisiones en el área de la gestión de residuos municipales. Identifican los modelos basados en el análisis de costo-beneficio, los del inventario de ciclo de vida y aquellos basados en toma de decisiones por multicriterios. Afirman que los modelos recientes se enfocan en el concepto de gestión sostenible de

residuos y tienen limitaciones. También indican que los modelos analizados no consideran juntos los aspectos ambientales, económicos y sociales.

Últimamente, Den Boer *et al.* (2007) presentan una herramienta para evaluar el ciclo de vida de la gestión integral de residuos en ciudades con rápido crecimiento, teniendo en cuenta aspectos ambientales, económicos y sociales. Ofrecen varios escenarios, considerando el ACV desde el almacenamiento temporal, recolección-transporte y tratamiento.

El ACV es una herramienta de gestión que sirve para evaluar el comportamiento ambiental de un producto a lo largo de todo su ciclo de vida (McDougall *et al.*, 2002). El ACV consiste en un tipo de “contabilidad ambiental” en la que se carga a los productos los efectos ambientales, debidamente cuantificados, generados a lo largo de su ciclo de vida. Eso quiere decir que el estudio incluye, además de la fabricación del producto en sí, la producción de sus materias primas, su uso y mantenimiento y la gestión de residuo, una vez terminada su vida útil. El ACV aporta información ambiental con multitud de aplicaciones relacionadas con otras herramientas y conceptos de gestión ambiental.

En la figura 1 se presentan las entradas y salidas durante el ciclo de vida de un producto. Se generan emisiones denominadas “carga ambiental de un producto” o “proceso”: ésta es la cantidad de sustancias, radiaciones, ruidos, etcétera que se emiten al entorno o que se extraen de éste, causando un efecto en el medio ambiente real o potencial. Las cargas ambientales pueden generar beneficios para el medio ambiente; por ejemplo, el hecho de utilizar una emisión como combustible para evitar el consumo de otro material. Dentro de la denominación de “carga ambiental” se pueden encontrar los siguientes tipos: consumo de materias primas y energía, emisiones al aire, emisiones al agua, generación de residuos, radiaciones y vibraciones (Tchobanoglous y Kreith, 2002; McDougall *et al.*, 2002).

Es muy importante que estos efectos sean cuan-



Figura 1. Ciclo de vida de un producto industrial

tificables, para así poderlos evaluar. Un ejemplo de carga ambiental es la cantidad de metano emitida debido a la descomposición de materia orgánica en el relleno sanitario.

Introducido el concepto de carga ambiental se puede definir más fácilmente el de ACV –análisis o evaluación del ciclo de vida–, como un método para cuantificar la carga ambiental generada por un proceso, servicio o producto durante su ciclo de vida, analizando su impacto en el medio e interpretando los resultados para recomendar consecuentemente mejoras ambientales (Güereca Hernández, 2006).

El proporcionar tratamiento a los residuos para evitar depositarlos directamente en el relleno sanitario es una buena opción, pero seleccionar ambientalmente el mejor tratamiento es complicado. La creación de escenarios de disposición de residuos sólidos municipales, ambientalmente amigables para la ciudad de Chihuahua y evaluados por medio del ACV, ampliará la información requerida para el apoyo de una correcta toma de decisiones

en cuanto a modelos de gestión de RSU. El uso de la metodología de ACV proporciona información amplia y coherente sobre los aspectos del impacto ambiental de los RSU. Al utilizar diferentes modelos o escenarios de tratamiento y evaluarlos mediante un software computacional como SimaPro 7.3, se adquieren los datos necesarios para seleccionar un tratamiento con el menor impacto ambiental (McDougall *et al.*, 2002; Mihelcic y Zimmerman, 2012).

El objetivo general de este estudio es la evaluación y comparación del impacto ambiental de cinco escenarios de tratamiento de residuos sólidos domiciliarios de la ciudad de Chihuahua, aplicando la metodología de ACV.

METODOLOGÍA

Proponer alternativas de tratamiento para los RSU requiere de diferentes procesos según los tipos de fracciones. Por tal motivo, la metodología de ACV evalúa y determina la opción menos contaminante para el manejo de RSU en la ciudad de Chihuahua.

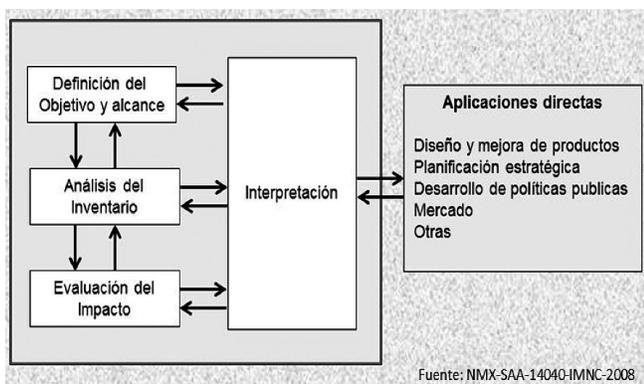


Figura 2. Diagrama de las fases del Análisis de Ciclo de Vida

A diferencia de los ACV de productos, donde los estudios se enfocan en sólo algunos materiales determinados, el ACV de la gestión de residuos estudia toda la gama de materiales producidos y utilizados en la sociedad. La metodología del ACV considera cuatro fases, según la norma ISO 14044 (figura 2). Estas fases son: objetivo y alcance del estudio, análisis del inventario, evaluación del impacto e interpretación (ISO 14044, 2006).

En cada una de estas etapas del proceso se calcula la entrada (materiales crudos, recursos y energía) y salida (emisiones al aire, agua y residuos sólidos). Todos los cálculos se han realizado con base en la unidad funcional (o unidad de referencia). Las entradas y salidas de cada etapa se contabilizan ambientalmente y se evalúan, determinando las cargas ambientales asignadas al proceso (McDougall *et al.*, 2002; Mihelcic y Zimmerman, 2012).

En la metodología de ACV, el *objetivo y alcance*, según la figura 2, es evaluar el sistema de cinco escenarios de tratamiento de los RSU y compararlos entre sí para seleccionar el tratamiento de menor impacto. La unidad funcional es de una tonelada de RSU. Los escenarios evaluados fueron: relleno sanitario actual (RS-actual); del segundo al quinto escenario, son propuestas de tratamiento, considerando la implementación a futuro de un programa de recolección selectiva. Sin embargo, actualmente existe la separación de residuos (desconocemos la cantidad), durante las varias etapas del sistema de recolección. El segundo escenario es un relleno sa-

nitario con control y tratamiento de emisiones de gas y lixiviado (RS-moderno); el tercero es la combinación de un porcentaje bajo de reciclado (papel 50%, plástico 50%, vidrio 60% y metal 80%) y el relleno sanitario actual (RS-actual-RB); el cuarto, es la combinación de un porcentaje alto de reciclado (papel 80%, plástico 80%, vidrio 80% y metal 80%) y el relleno sanitario actual (RS actual-RA); el quinto escenario es la combinación de un porcentaje alto de reciclado y el relleno sanitario moderno (RS-moderno-RA).

En el *análisis de inventario* del ACV (figura 2) se contabilizó la entrada y la salida, incluyendo el consumo de diesel para transporte y el material asociado con cada etapa en el ciclo de vida. La *evaluación de impacto de ciclo de vida* (en la figura 2), identifica las cargas ambientales cuantificadas en la etapa de inventario con una serie de categorías de impacto específicas. La evaluación de las emisiones de los residuos requiere de una herramienta computacional como SimaPro. Ésta agrupa las cargas en diferentes categorías para interpretar más fácilmente los resultados (McDougall *et al.*, 2002; Mihelcic y Zimmerman, 2012).

Las categorías de impacto aplicadas en este estudio son las categorías propuestas por Den Boer *et al.* (2005). Ellos seleccionaron estas categorías con base en que el impacto de residuos fuera significativo entre escenarios, considerando un modelo de ACV completo. Las categorías de impacto seleccionadas son: agotamiento abiótico, calentamiento global, toxicidad humana, fotooxidación química, acidificación y eutrofización.

La categoría de *agotamiento de los recursos abióticos* está relacionada con la extracción de minerales, combustibles fósiles y otros recursos que pueden ser considerados como no vivos. El factor de agotamiento abiótico es determinado por cada extracción de minerales y combustibles fósiles (kg antimonio equivalente / kg de extracción) basado en las concentraciones de reservas y velocidad de disminución (Banar, Cokaygil, & Ozkan, 2009).

La categoría de *calentamiento global* es el

previsible calentamiento de la atmósfera terrestre, provocado por el aumento del dióxido de carbono y otros gases en la atmósfera. Estos gases forman una capa que retiene calor en aquella. La retención de calor puede provocar un aumento en la temperatura media del planeta. Otras sustancias que también contribuyen a aumentar el efecto invernadero son el metano, vapor de agua, óxido nitroso, etcétera. El efecto de las sustancias que afectan al calentamiento global se mide por su capacidad de absorber e irradiar el calor de la tierra en relación con la capacidad irradiadora del dióxido de carbono (Den Boer *et al.*, 2005).

La categoría *toxicidad humana* se refiere a sustancias de los materiales o residuos, pero también de la vía de administración o exposición, la dosis, cómo se administran, etcétera. Los contaminantes y las sustancias presentes en el medio a baja concentración (metales pesados como plomo, mercurio, etcétera), se pueden acumular hasta niveles críticos o letales en los niveles tróficos superiores a través de la biomagnificación. También puede causar toxicidad la emisión de partículas (pueden penetrar en los pulmones y causar problemas respiratorios). Las prácticas de gestión de residuos pueden suponer una considerable amenaza para la salud humana. Los residuos contienen sustancias tóxicas (metales pesados, ácido crómico, mercurio, plomo, níquel, cobre, dioxinas, bario y antimonio) cuyo ingreso en el medio ambiente debe disminuirse (Den Boer *et al.*, 2005).

La *fotooxidación química* es una categoría que cuantifica la formación de compuestos químicos reactivos, por la acción de la luz solar, sobre determinados contaminantes del aire perjudiciales para la salud humana y los ecosistemas. Los oxidantes fotoquímicos se pueden formar en la troposfera bajo influencia de la luz ultravioleta, a través de la fotooxidación química de los compuestos orgánicos volátiles y el monóxido de carbono en presencia de óxidos de nitrógeno. El ozono se considera el más importante de estos agentes oxidantes, junto con el peroxiacetilnitrato (PAN). En la gestión de re-

siduos, las emisiones relevantes de esta categoría de impacto son los compuestos orgánicos volátiles distintos del metano, el metano procedente de los vertederos y las emisiones de NO_x y CO de los procesos térmicos. Las emisiones de monóxido de carbono tienen un efecto decreciente del potencial de formación del ozono fotoquímico (PFOF), dado que el CO puede reaccionar con el ozono produciendo dióxido de nitrógeno y oxígeno, eliminando así el efecto ozono. Uno de los indicadores de ozono fotoquímico resulta de hallar los factores de conversión o reactividad hacia los compuestos orgánicos volátiles (Den Boer *et al.*, 2005).

La *acidificación*. El uso de combustibles fósiles provoca emisiones de óxidos de azufre (principalmente SO₂) y de nitrógeno (NO_x) al aire. Estos contaminantes se combinan con la humedad de la atmósfera y forman ácido sulfúrico y nítrico, que causan una baja en el pH al entrar en contacto con el ecosistema existente. Su efecto depende de la sensibilidad de la zona afectada. Además, los óxidos de nitrógeno y de azufre no pueden ser transportados a escala global, de manera que se dice que esta categoría de impacto ocurre de manera regional. No obstante, las regiones a las que puede afectar son extensas y a menudo alejadas de los focos emisores. Para caracterizar el efecto de acidificación de distintas sustancias sobre la acidificación nos basamos en la capacidad de cada sustancia para formar protones (hacer el pH más ácido) en el medio receptor. Esta capacidad se expresa en relación con la capacidad del dióxido de azufre (SO₂), una de las principales sustancias generadoras de lluvia ácida, emitidas por la actividad humana. El potencial de acidificación es medido por el número de iones H⁺ producidos por kilogramo de sustancia relativos a kilogramos de SO₂ (Den Boer *et al.*, 2005).

La *eutrofización* se produce cuando los nutrientes (materia orgánica y mineral) se acumulan en los ecosistemas acuáticos, incrementan el crecimiento de plantas y agotan los niveles de oxígeno. El proceso de descomposición de los nutrientes es natural, pero cuando éstos se acumulan en el agua,

provocan un rápido crecimiento de la población de descomponedores aeróbicos, los cuales agotan enseguida el oxígeno, de manera que no pueden continuar su función. La eutrofización también es un impacto de alcance regional. Debido a que los principales nutrientes en los medios terrestre y acuático son N y P, el potencial de una sustancia para generar eutrofización se calcula a partir de la cantidad de N o P que esta sustancia aporta al medio al ser emitida. En el ACV, los efectos se expresan en relación con los nitratos, de manera que el efecto total sobre la eutrofización se expresa en gramos equivalentes de NO^{-3} (Den Boer *et al.*, 2005).

RESULTADOS

En la tabla 1 se presentan los resultados para cada escenario, indicando las emisiones para cada categoría de impacto. Evaluamos el sistema de recolección, transporte y disposición final para una tonelada de residuos sólidos, como unidad funcional o base de referencia. El escenario RS actual corresponde principalmente a las emisiones de CO_2 y metano, debidas a la descomposición de residuos en el relleno sanitario. Estas emisiones se reflejan en la categoría de *calentamiento global*. En el siguiente escenario, RS-moderno, las emisiones de gas derivadas de la descomposición de residuos son colectadas para producir electricidad, además del tratamiento a los lixiviados. Este tratamiento disminuye las emisiones hasta un 43% en comparación con el RS-actual.

En el tercer escenario (RS-actual-RB) se disminuye la cantidad de residuos que se llevan al relleno sanitario actual y el resto de los residuos se reciclan. Los resultados indican la disminución de emisiones por descomposición de residuos en el relleno sanitario, en comparación con el primer escenario (RS-actual). Esto se observa principalmente en la categoría de calentamiento global. En cuanto a los resultados de las otras categorías, con signo negativo, éstos indican emisiones evitadas, al usarse material recuperado en lugar de material virgen, para el proceso de reciclado. Dichas categorías son

toxicidad humana, agotamiento abiótico y acidificación; es decir, se evitaron emisiones de metales pesados, consumo de recursos naturales y óxidos de azufre o nitrógeno, respectivamente.

El cuarto escenario (RS-actual-RA) es semejante al tercero, pero presenta un porcentaje mayor de reciclado. Los resultados indican menor impacto ambiental al disminuir las emisiones, pues se recicla una mayor cantidad de residuos.

El quinto escenario (RS-moderno-RA) sería la opción de tratamiento ideal. Este escenario presenta el menor impacto ambiental en todas las categorías, pues parte de los residuos se trata en un relleno sanitario moderno, con recuperación de gas para producir energía y tratamiento de lixiviados, y el resto de los residuos se reciclan.

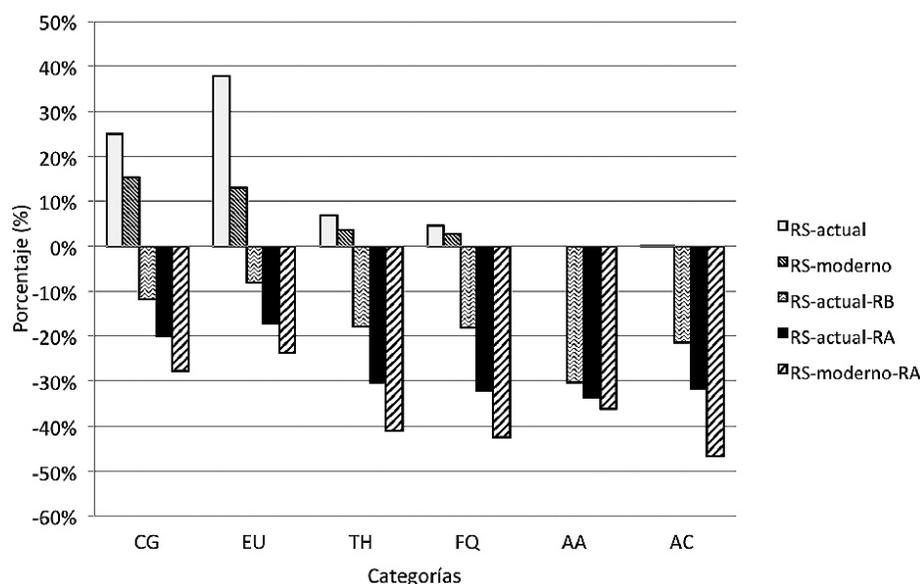
Los resultados del primer escenario (RS-actual) son semejantes a los resultados obtenidos por Gómez M. (2009). En la presente investigación se consideró el sistema de recolección y disposición final en el relleno sanitario actual de la ciudad de Chihuahua, pero los datos fueron analizados por un programa LCA-IWM (Life Cycle Assessment-Integral Waste Management). Los resultados para cada categoría son los siguientes: calentamiento global, 636 kg de CO_2 eq.; eutrofización, 0.136 kg PO_4 eq.; toxicidad humana, 21.34 kg 1-4 DB eq.; fotooxidación química, 0.183 kg C_2H_4 eq.; agotamiento abiótico, 0.142 kg Sb eq.; y acidificación, 0.226 kg SO_2 eq. Los dos programas, LCA-IWM y SimaPro, evalúan las mismas categorías de impactos y los resultados presentan en algunas categorías cantidades concordantes, sobre todo en la calentamiento global, eutrofización y fotooxidación química. Los otros escenarios no se pueden comparar, pues las cantidades de residuos evaluados son diferentes.

En la figura 3 se muestran los resultados obtenidos para cada tratamiento en porcentaje. Los valores negativos corresponden a beneficios ambientales por el reciclado de fracciones, es decir, el impacto ambiental disminuye al evitar usar material virgen y emplear materiales reciclados. En general se observa que el escenario RS-moderno-RA

Tabla 1. Impacto ambiental de las seis categorías en los cinco escenarios de tratamiento, para una tonelada de residuos sólidos.

| Categoría de impacto | Unidad | RS actual | RS moderno | RS actual RB | RS actual RB | RS moderno RA |
|-----------------------|--------------------------------------|-----------|------------|--------------|--------------|---------------|
| Calentamiento global | kg CO ₂ eq. | 758 | 330 | 560 | 480 | 199 |
| Eutrofización | kg PO ₄ eq. | 0.082 | 0.028 | 0.067 | 0.064 | 0.028 |
| Toxicidad humana | kg 1.4-DB eq. | 3.840 | 2.810 | -19.220 | -33.281 | -33.944 |
| Fotooxidación química | kg C ₂ H ₄ eq. | 0.211 | 0.094 | 0.060 | -0.002 | -0.079 |
| Agotamiento abiótico | kg Sb eq. | 0.001 | 0.001 | -0.730 | -0.987 | -0.987 |
| Acidificación | kg SO ₂ eq. | 0.091 | 0.038 | -1.320 | -1.885 | -1.846 |

Figura 3. Impacto ambiental de las seis categorías para los cinco escenarios de tratamiento. CG (calentamiento global), EU (eutrofización), TH (toxicidad humana), FQ (fotooxidación química), AA (agotamiento abiótico) y AC (acidificación).



es el que presenta menor impacto en las categorías evaluadas. El peor escenario es el RS-actual, en todas las categorías, pues no hay control en las emisiones contaminantes. Comparando los escenarios RS-actual y RS-moderno, el segundo muestra mayor beneficio ambiental, pues presenta control sobre las emisiones. En los escenarios que tienen reciclado de fracciones se observa menor impacto ambiental que en los escenarios RS-actual y RS-mo-

derno. El impacto es adverso principalmente en el escenario RS-actual, en la categoría *calentamiento global*: las emisiones al aire se deben a la biodegradación de los residuos. También las emisiones de compuestos como NO₂ impactan en la categoría de eutrofización. Las emisiones al agua o suelo por metales pesados o emisiones al aire, como benceno, impactan la categoría de toxicidad humana. En la fotooxidación química, el impacto adverso se

debe principalmente a la emisión de metano y tolueno. En el agotamiento abiótico no hay consumo de recursos abióticos, por lo que no existe impacto ambiental adverso, y en la categoría de acidificación, las emisiones son mínimas.

CONCLUSIONES

Los resultados presentados son en base a la unidad funcional, una tonelada de RSU, según la composición de los residuos para la ciudad de Chihuahua. Los escenarios que presentan menor impacto ambiental son los que tienen reciclado de metal, plástico, vidrio y papel, correspondiendo a los escenarios RS-actual-RB, RS-actual-RA, y RS-moderno-RA. En los dos escenarios que presentan el RS-actual-RB y RS-actual-RB, la cantidad que se deposita en el relleno sanitario es menor en comparación con el RS-actual. Consecuentemente, disminuyen principalmente las emisiones de CO₂ y metano. Además, parte de las fracciones se separaron para ser recicladas, adquiriendo con esto un beneficio ambiental al evitar emplear material virgen para el proceso.

Una propuesta de tratamiento al municipio, para ser aplicado a la menor brevedad, sería el escenario RS-actual-RB. La recolección selectiva de fracciones a reciclar y su posterior tratamiento, presentan una disminución en el impacto ambiental en cualquier cantidad que se realice.

El escenario que presenta mayor impacto ambiental es la situación actual (RS-actual), pues no hay tratamiento de lixiviado ni recolección del gas.

El último escenario, RS-moderno-RA, sería el óptimo, pues las emisiones se disminuyen en gran medida y el reciclado es casi total. Aunque éste es un escenario ideal, existen varias ciudades en la república mexicana que cuentan con un sistema de recolección de biogás y tratamiento de lixiviados.

REFERENCIAS

- Banar, M., Cokaygil, Z. y Ozkan, A. (2009). Life cycle assessment of solid waste management options for Eskisehir, Turkey. *Waste Management* 29, 54-62.
- Camobreco, V., Hamm, R., Barlaz, M., Repa, E., Felker, M., Rousseau, C. y Rathle, J. (1999). Life-cycle inventory of a modern municipal solid waste landfill. *Waste Management Research* 17, 394-408.
- Clift, R., Doig, A. y Finnveden, G. (2000). The application of life cycle assessment to integrated solid waste management: Part-1 Methodology. *Trans IChemE*, vol. 78, Part B, July.
- Colomer, F. y Gallardo, A. (2007). *Tratamiento y gestión de residuos sólidos*. Universitat Politècnica de València. Editorial UPV Ref.: 2007.4283.
- Den Boer, E., Den Boer, J. y Jager, J. (2005). *Waste management planning and optimisation – Handbook for Municipal Solid Waste Prognosis and Sustainability Assessment of Waste Management System*. Stuttgart, Germany.
- Den Boer, J., Den Boer, E. y Jager, J. (2007). LCA-IWM: a decision support tool for sustainability assessment of waste management systems. *Waste Management* 27, 1032-1045.
- Gómez, G., Meneses, M., Ballinas, L. y Castells, F. (2009). Seasonal characterization of municipal solid waste (MSW) in the city of Chihuahua, México. *Waste Management* 29, 2018-2024.
- Gómez, G. (2009). Aplicación de técnicas de ciclo de vida al diseño de un sistema de gestión de residuos urbanos para la ciudad de Chihuahua [en línea]: <http://hdl.handle.net/10803/8571>
- Güereca H., L. P. (2006). Desarrollo de una metodología para la valoración en el ACV aplicada a la gestión integral de residuos municipales. Barcelona: tesis doctoral.
- Norma ISO 14044:2006 (E) (2006). *Environmental management-Life cycle assessment-Requirements and guidelines*. Suiza: International Standard.

- LGPGIR (2003). Ley general para la prevención y gestión integral de los residuos. *Diario Oficial de la Federación*. 8 oct. 2003 [en línea]: <http://www.sma.df.gob.mx/rsolidos/03/federal/01clave.pdf>.
- McDougall F., R., White P. R., Frankle, M. y Hindle, P. (2002). Life Cycle Assessment. En *Integrated solid waste management: life cycle inventory*. Oxford UK: UK Blackwell Publishing.
- Mihelcic, J. R. y Zimmerman, J. B. (2012). Ingeniería verde. En *Ingeniería ambiental: fundamentos, sustentabilidad, diseño*. México: Alfaomega Editor.
- Morrissey, A. y Browne, J. (2004). Waste management models and their application to sustainable waste management. *Waste Management* 24, 297-308.
- NOM-083-Semarnat-2003. (2004). Norma Oficial Mexicana: Especificaciones ambientales para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos y manejo especial. *Diario Oficial*, miércoles 20 de octubre.
- Rieradevall, J., Domenech, X.Y., Fullana, P. (1997). Application of life cycle assessment to landfilling. *Int. J. LCA* 2 (3) 141-144.
- Sojo, A. (2001). *La gestión de los residuos sólidos urbanos en Puebla: comparación ambiental y financiera con Barcelona*. Tesis doctoral. Barcelona: Universidad Autónoma de Barcelona.
- Tchobanoglous, G. y Kreith, F. (2002). *Handbook of solid waste management*. McGraw Hill.

Metabolitos secundarios vegetales con importancia natural y biomédica; fenilpropanoides con actividad estrogénica (isoflavonas, lignanos, cumestanos y lactonas)

María Dolores García Suárez,¹ Ángel Lechuga Corchado,² José Luis Gómez Olivares,³
Alondra Castro Campillo,⁴ Arturo Salame Méndez,⁵ Héctor Serrano⁶

RESUMEN

Los productos vegetales han sido utilizados por los humanos como fuente de alimento, medicamento e incluso como material de construcción. Los productos del metabolismo primario forman parte importante de los nutrientes de la humanidad y la fauna asociada a ella. A pesar de que el metabolismo secundario pueda tener una menor atención en su estudio, forma parte importante de los productos que se utilizan como productos activos en una gran variedad de medicamentos. Con tan sólo cuatro vías metabólicas, la síntesis de flavonas, isoflavonas, lignanos y cumestanos representan las dos caras de la moneda: por un lado, tienen efectos positivos sobre varias patologías del humano; por otro lado, en varios casos aún se desconocen las funciones que desempeñan en la fisiología de la propia planta que los produce.

1 Departamento de Biología. Laboratorio de Propagación y Micropropagación Vegetal y 4Laboratorio de Mamíferos

2 Departamento de Biotecnología. Laboratorio de Fitoquímica

3 Departamento de Ciencias de la Salud. Laboratorio de Biomembranas y 6Laboratorio de Biología Molecular. Regulación Endócrina

5 Departamento de Biología de la Reproducción. Laboratorio de Fisiología Animal, Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa.

1 Autor para correspondencia. Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa. Av. San Rafael Atlixco 186. C.P. 09340. México, D.F. Tel (525) 5804-4733. Fax (525) 5804 4727. e-mail: lolí@xanum.uam.mx

INTRODUCCIÓN

Las plantas sintetizan los productos que requieren para su crecimiento y desarrollo a través de distintas rutas metabólicas, conocidas como metabolismo primario y metabolismo secundario, las cuales presentan características, necesidades y proporcionan atributos particulares a las plantas (cuadro 1).

El metabolismo secundario interviene en muchos procesos fisiológicos de importancia, pero considerados como no vitales para la planta, ya que no intervienen en los procesos de respiración, asimilación y transporte. Se consideran como un grupo indeterminado de compuestos elaborados por las plantas y cuyo origen se lleva a cabo me-

Cuadro 1. *Diferencias entre los tipos de metabolismo vegetal*

| | Primario | Secundario |
|--|---|--|
| Distribución | Amplia, se encuentran en todas las plantas | Restringida a ciertas plantas; a veces característico de un género o de una especie |
| Indispensabilidad | Indispensable o necesario para la vida; interviene directamente en la supervivencia, crecimiento y reproducción de las plantas | Considerado como no necesario o dispensable para la vida de las plantas. Éstas elaboran compuestos con funciones no esenciales, su carencia no es letal para la planta |
| Procesos característicos | Fotosíntesis, respiración, translocación, síntesis proteica, asimilación de nutrientes, diferenciación de tejidos | Relacionados con las interacciones ecológicas entre la planta y su ambiente |
| Función de aminoácidos y nucleótidos | Síntesis de proteínas, replicación y transcripción | Síntesis de compuestos para la defensa contra depredadores y patógenos, atracción de polinizadores |
| Moléculas principales y su origen | Glicósidos, polisacáridos, nucleótidos, acilglicéridos, aminoácidos proteicos, ácidos grasos, ácidos derivados del ciclo del ácido tricarbóxico | Moléculas con estructura química variada, origen biosintético a partir de componentes de metabolismo primario |
| Grupos de biomoléculas representativas | Carbohidratos no estructurales (glucosa, fructosa) y estructurales (almidón, celulosa), ácidos nucleicos, lípidos, proteínas. | Alcaloides, esteroides, fenilpropanoides o fenoles (cumarinas, flavonoides, lignanos), policétidos, taninos, terpenos |
| Usos | Producción de oxígeno y fuente alimenticia (carbohidratos) para otros organismos | Principios activos para el desarrollo de nuevas drogas, antibióticos, insecticidas y herbicidas |

Basado en: Ascon-Bieto y Talón, 2008; Barakat et al., 1977; Buchanan et al., 2000; Cseke et al., 2006; García, 2004; Harborne 1989; Lees et al., 1993; Maldonado, 1985; Verpoorte, 2000; Taiz y Zeiger, 2006.

El metabolismo primario de las plantas es considerado como esencial en la elaboración de moléculas nutricionales, a partir de la elaboración del producto principal de la fotosíntesis: los carbohidratos y la elaboración de proteínas, lípidos y ácidos nucleicos, productos de necesidad vital para la planta (Ascon-Bieto y Talón, 2008; Taiz y Zeiger, 2006).

dante cuatro vías diferentes. Su papel fisiológico o su función específica en el metabolismo de la planta no está elucidado en todos los casos. Se considera que su aparición se debe a factores relacionados con la historia evolutiva de cada especie y como resultado de un proceso adaptativo. Se les confiere un papel ecológico de relevancia, como una respuesta hacia factores bióticos y abióticos donde

crecen (Barakat *et al.*, 1977; Buchanan *et al.*, 2000; Harborne, 1989; Maldonado, 1985; Taiz y Zeiger, 2006).

Los metabolitos secundarios se sintetizan en la planta en cantidades muy bajas, a veces en células especializadas, lo que hace que su extracción sea difícil y costosa. En ocasiones, estas células especializadas pueden formar tejidos e incluso órganos de la planta, y dentro de ellas, pueden ser almacenados en diferentes organelos celulares como: vacuolas, cloroplastos, lisosomas. Cuando el metabolito llega a acumularse en demasía dentro de las células y tejidos, pueden llegar a causar toxicidad.

La elaboración de los metabolitos secundarios por las plantas puede ser muy específico, e incluso llegar a caracterizarse a nivel de género, especie o familia. Su importancia es evidente por su diversidad en función y variabilidad que presentan, ya que incluso influyen en la propia fisiología del desarrollo y crecimiento de la planta, así como en los mecanismos de defensa, formación de clorofilas, elaboración de reguladores del crecimiento, así como en otras funciones bioquímicas y fisiológicas. Hoy en día se reconocen cerca de 85 000 metabolitos secundarios en plantas, y se detectan anualmente aproximadamente alrededor de otros 4000 más, sin que se tenga una idea real de su número, por lo que es un campo experimental muy atractivo (Ascon-Bieto y Talón, 2008; Buchanan *et al.*, 2000; Cseke *et al.*, 2006; García, 2004; Lees *et al.*, 1993; Verpoorte, 2000).

Los metabolitos secundarios son derivados de vías laterales a la producción de los metabolitos primarios, particularmente de la fotosíntesis, y son igualmente importantes para las plantas. Sin embargo, no forman parte del metabolismo nutricional de éstas. Su distribución en el reino vegetal es más limitada y para determinados compuestos queda restringida a ciertas especies e incluso a algunos grupos dentro de una misma especie. A pesar de esta restricción conceptual, algunos de ellos han sido considerados como productos que tienen un papel fundamental en el metabolismo primario,

como ocurre con los flavonoides. Estos compuestos, desde su posición como productos del metabolismo secundario de las plantas, influyen en su desarrollo y crecimiento, se sintetizan en todas las plantas terrestres y constituyen uno de los grupos más característicos y extensos de compuestos secundarios de las plantas superiores.

Las cuatro vías metabólicas que elaboran los metabolitos secundarios en las plantas son: i) la vía del ácido shikímico; ii) la vía del ácido malónico; iii) la vía del ácido mevalónico; y iv) vía MEP (2C-metil-D-eritritol-4-fosfato) (figura 1).

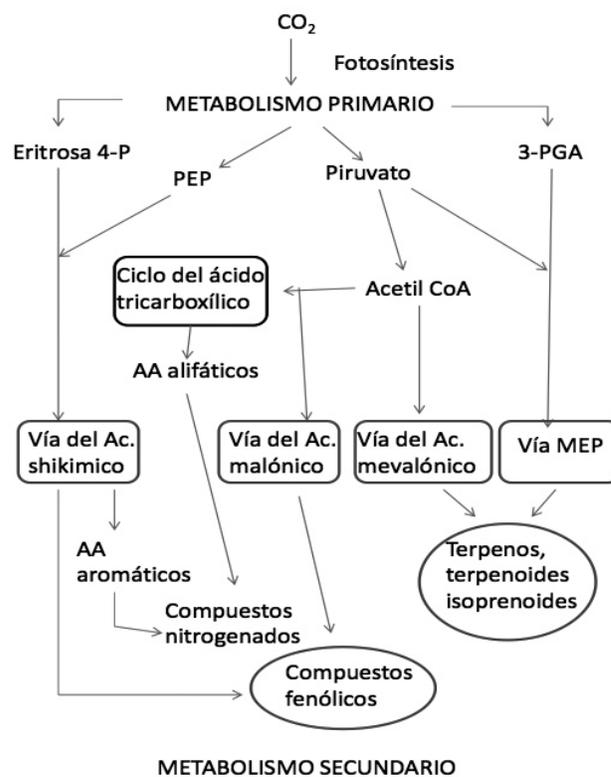


Figura 1. Diagrama de las cuatro vías del metabolismo secundario y su relación con el metabolismo primario de las plantas. Abreviaturas: PEP (Fosfoenolpiruvato); MEP (2C-metil-D-eritritol-4-fosfato) AA (aminoácidos), Ac. (Ácido), CoA (coenzima A), 3-PGA (3-fosfogliceraldehído), Eritrosa 4-P (Eritrosa 4-fosfato). Modificado de Taiz y Zeiger (2006).

- i) La vía del ácido shikímico es responsable de la biosíntesis de la mayoría de los compuestos fenólicos de las plantas superiores y de productos secundarios nitrogenados; es precursor de diversos metabolitos aromáticos, aminoácidos

aromáticos (tirosina, fenilalanina, triptófano), aminas biogénicas aromáticas, clorafenicol, ácido 4 aminobenzoico, betalinas, bisindoles, cateocolaminas, glucósidos cianogénicos aromáticos, felinilpropanoides, lignanos, taninos y flavonoides (Buchanan *et al.*, 2000; Knaggs, 2003; Tzin y Galili, 2010).

- ii) La vía del ácido malónico también es una fuente importante de compuestos fenólicos. En plantas superiores, junto con la vía del ácido shikímico participa en la biosíntesis de flavonoides, ligninas y otros fenoles o fenilpropanoides como cumarinas y taninos (Ávalos y Pérez, 2009).
- iii) La vía del ácido mevalónico produce los terpenos y sus derivados. Se conocen más de 25 000 metabolitos secundarios. Muchos sesquiterpenos actúan como fitoalexinas o antibióticos; otros, como las vitaminas A, E y K, son isoprenoides del tipo lipídico. Algunas algas y vegetales superiores producen ficoecdisteroides sintetizados para la defensa contra insectos fitófagos. Son réplicas de las hormonas que uti-

lizan los artrópodos y crustáceos en el proceso de la ecdisis. Cuando los insectos las ingieren, sufren mudas prematuras y daños metabólicos que incluso les causan la muerte (Dinan, 2001; Goodwin, 1971).

- iv) La vía MEP (2C-metil-D-eritritol-4-fosfato): se sintetizan isoprenoides derivados del isopentenil difosfato (IPP) y su isómero dimetil alil-difosfato (DMAPP), de interés para el desarrollo de nuevos fármacos. Producen una enorme diversidad estructural y funcional de terpenoides que en plantas producen las giberelinas y el ácido abscísico (Cancino-Rodezno, 2008; León y Guevara-García, 2007).

La eficiencia de las vías metabólicas depende del estado de desarrollo y crecimiento de las plantas, de su metabolismo primario y de los factores medioambientales de los lugares que habitan. Los metabolitos secundarios que producen son varios miles de compuestos que se han dividido en cuatro grupos: terpenos, alcaloides, glicósidos y fenólicos o fenilpropanoides (cuadro 2).

Cuadro 2. Algunos metabolitos secundarios y usos

| METABOLITO SECUNDARIO | INDUSTRIA | USO Y EJEMPLOS DESTACADOS |
|--|---|---|
| TERPENOIDES Se conocen 25 000 compuestos derivados del isopentenil difosfato | ALIMENTICIA, FARMACÉUTICA, PETROQUÍMICA | Aceites esenciales. Son utilizados en perfumería, farmacia, alimento y medicina; producen inhibidores del crecimiento vegetal, giberelinas y ácido abscísico |
| ALCALOIDES De estructura diversa. Se conocen alrededor de 12 000 compuestos | ALIMENTICIA, FAR- MACÉUTICA | Se encuentran en el 20% de plantas vasculares dicotiledóneas, algunos ejemplos son: mescalina, cocaína, morfina, atropina, cafeína, nicotina, colchicina, estricnina, quinina |
| GLICÓSIDOS Se encuentran también algunos sub-productos tóxicos inhibidores del crecimiento: <i>Brassica-ceae</i> y <i>Putranjiva-ceae</i> | ALIMENTICIA, FARMACÉUTICA, QUÍMICA | Utilizados en la fabricación de fármacos cardiotónicos, usados en el tratamiento de la insuficiencia cardiaca. Algunos tienen capacidad de generar ácido cianhídrico |
| SAPONINAS Se hallan ampliamente distribuidas en el reino vegetal, especialmente entre las <i>Leguminosae</i> , <i>Agavaceae</i> y <i>Araliaceae</i> | ALIMENTICIA, FARMACÉUTICA, QUÍMICA | Se utilizan glicósidos esteroideos alcaloides, o bien, glicósidos triterpenos como precursores en la síntesis química de esteroides y corticosteroides. Por su actividad tensoactiva, son útiles como emulgentes y hemolizantes |

| | | |
|---|--|--|
| <p>FENOLES</p> <p>Grupo heterogéneo de productos con más de 10 000 compuestos. Se dividen en dos: fenoles simples y fenoles complejos</p> | <p>ALIMENTICIA, FARMACÉUTICA, QUÍMICA</p> | <p>Poseen actividad de defensa ante patógenos como antifúngicos y desinfectantes. Antioxidantes. Pueden reducir la peroxidación de los lípidos. Proveen soporte mecánico a la planta. Sustancias aromáticas que atraen polinizadores o dispersores de frutos; algunos de ellos absorben la radiación ultravioleta o actúan como agentes alelopáticos</p> |
| <p>FLAVONOIDES</p> <p>Se encuentran los flavonas, flavanoles e isoflavonas. Se han encontrado más de 4000 flavonoides, principalmente en cítricos</p> | <p>ALIMENTICIA, FARMACÉUTICA, QUÍMICA</p> | <p>En medicina alternativa, utilizados para reducir hemorragias por fragilidad capilar; protegen en estados tóxicos y como anti-inflamatorios; coadyuvan en la terapia de reemplazo de mujeres menopáusicas. Principio activo como antioxidantes auxiliares en medicina cosmética. Forman los pigmentos de flores y frutos; forman parte de los atraentes para polinizadores y dispersores de semillas. Están entre los mecanismos de defensa de las plantas</p> |
| <p>TANINOS</p> <p>Compuestos polifenólicos muy astringentes y de sabor amargo</p> | <p>FARMACÉUTICA, QUÍMICA, INDUSTRIA PELETERA</p> | <p>Principios activos de fármacos astringentes y antisépticos. Desnaturalización de proteínas en peleterías. Útiles en la fabricación de tintas y otros colorantes. Protegen a las plantas heridas y resultan tóxicos para patógenos y herbívoros de éstas</p> |
| <p>CUMARINAS</p> <p>Se han aislado unas 1500 cumarinas naturales en unas 800 especies, distribuidas en aproximadamente 30 familias</p> | <p>FARMACÉUTICA, QUÍMICA</p> | <p>Actúan como antibióticos y anticoagulantes; útiles en el tratamiento de cáncer hormono-dependiente; aromatizantes, inhibidores de la germinación y fototoxicidad inducida por insectos</p> |
| <p>LIGNANOS</p> <p>Es la sustancia orgánica más abundante en las plantas, después de la celulosa; forman parte de la lignina de la pared celular; participan en el crecimiento de las plantas. Se han aislado más de 500 compuestos en casi 60 familias</p> | <p>ALIMENTICIA, FARMACÉUTICA, QUÍMICA</p> | <p>Antioxidantes. Utilizados en la industria como suplementos alimenticios. El lignano secoisolariciresinol diglicósido (SDG), proveniente de la linaza, es el más estudiado junto con matairesinol, pinoresinol e isolariciresinol. Los lignanos se pueden encontrar en la mayor parte de las plantas</p> |

Basado en: Ávalos y Pérez, 2009; Barakat et al., 1977; Buchanan, 2000; Coley y Barone, 1996; Chasquibol et al., 2003; Goodwin, 1971; Rodman et al., 1998; Taiz y Zieger, 2006.

a) Terpenos, terpenoides o isoprenoides. Pigmentos o aceites esenciales y reguladores del crecimiento. Son alrededor de 25 000 compuestos conocidos de actividad biológica importante, derivados del compuesto IPP (isopentenil difosfato o 5-carbono isopentenil difosfato) que se forman en la vía del ácido mevalónico y en la vía MEP. Distribuidos ampliamente en las plantas, muchos de ellos tienen funciones fisiológicas primarias; son utilizados en perfumería, farmacia, industria alimenticia y medicina (Goodwin, 1971).

b) Alcaloides o compuestos nitrogenados. Se conocen alrededor de 12 000 alcaloides biosintetizados a partir de aminoácidos que tienen uno o más átomos de nitrógeno, poseen una gran diversi-

dad de estructuras químicas. Algunos ejemplos de ellos son la cafeína, nicotina, mezcalina, cocaína, morfina, atropina, colchicina, quinina, estricnina. En este grupo se han colocado compuestos cuya interacción con las células animales modifican su estado. Poseen una gran diversidad de estructuras químicas y son fisiológicamente activas en animales aún en bajas concentraciones, de ahí su utilidad en medicina (Barakat *et al.*, 1977).

c) Glicósidos. Dentro de los glicósidos se encuentran las saponinas, un grupo de compuestos oleos solubles en agua que forman espuma al agitarlos. Además de ellos, y de gran importancia, se encuentran los glicósidos cardiotónicos, cuyos representantes destacados son la lactona digitoxina

o su análogo digoxina, utilizados como fármacos para el tratamiento de la hipertensión. Los glicósidos cianogénicos cumplen funciones de defensa, ya que al ser hidrolizados por algunas enzimas liberan ácido cianhídrico. Finalmente, los glucosinolatos, aceites de mostaza, que al hidrolizarse producen subproductos tóxicos e inhibidores del crecimiento; se encuentran en dos familias: *Brassicaceae* y *Putranjivaceae* (Rodman *et al.*, 1998; Taiz y Zeiger, 2006)

d) Fenoles o fenilpropanoides. Es un grupo heterogéneo con más de 10 000 compuestos. Dentro de éstos se encuentran: flavonoides, isoflavonoides, cumestanos, lignanos y estilbenos (fenilpropanoides de doble simetría) estilpironas y cumarinas, lactonas del ácido resorcílico, lignina y taninos (Scheenan y Medlock, 1995; Baker *et al.*, 1998; Cassidy *et al.*, 2000; Serrano *et al.*, 2006; Pérez Rivero *et al.*, 2007). Su síntesis se realiza mediante dos vías, la del ácido shikímico y la del ácido málnico (figura 1). Se pueden clasificar, con base en su esqueleto químico, en fenoles simples y fenoles complejos (cuadro 3).

Cuadro 3. Fenilpropanoides o fenoles simples y complejos

| FENOLES SIMPLES | FENOLES COM |
|---|--|
| Ácido transcinámico, ácido p-cumárico, ácido cafeico | Lignina |
| Lactonas de fenilpropanoides y cumarinas: umbeliferona, miroestrol doexymirestrol | Flavonoides o flavonas: kaempferol quercitina, naringenina |
| Furanocumarina o psolareno | Isoflavonoides o isoflavonas: genisteína y daidzeina formononetina |
| Derivados del ácido benzoico: vainillina y ácido salicílico | Estilbenos: resveratrol |

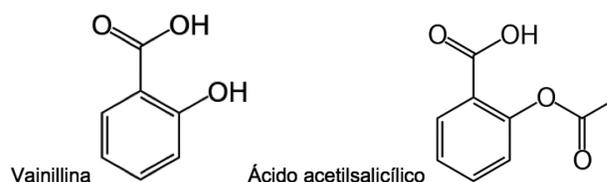
Basado en: Patisaul y Jefferson, 2010; Tzin y Galili, 2010; Zhao y Mu, 2010; Zierau *et al.*, 2008.

Los fenoles simples.

Derivados del ácido benzoico

La estructura química de los fenoles simples presenta un esqueleto básico fenilpropanoide. Ejemplos de este tipo de compuestos incluyen al ácido transcinámico, el ácido p-cumárico y derivados como el ácido cafeico; entre ellos están las lactonas fenilpropanoides o ésteres cíclicos (cumarinas): umbeliferona (simple), furanocumarina o psolareno; y los derivados del ácido benzoico: la vainillina y el regulador del crecimiento, ácido salicílico. Algunos de estos tienen gran importancia industrial (figura 2).

Figura 2. Compuestos fenólicos derivados del ácido benzoico.



Los fenoles simples son catalizados por la fenilalanina amonio liasa (PAL) y se metabolizan para formar ácidos cumáricos, ferúlico y cafeico, los cuales forman a su vez cumarinas, lignina, taninos flavonoides e isoflavonoides. Las cumarinas y furanocumarinas y estilbenos protegen frente al ataque bacteriano y de hongos patógenos, repelen herbívoros e inhiben la germinación de las semillas. Muchos otros compuestos fenólicos (cuadros 3 y 4), contribuyen con un papel defensivo o imparten sabores y olores característicos a cada planta. Son muchas las familias que los presentan, dentro de las cuales destacan *Rubiaceae* y *Orchidaceae* (Ávalos y Pérez, 2009; Buchanan *et al.* 2000).

Los fenoles complejos: las ligninas y los flavonoides

La formación de ligninas refuerza las paredes celulares, lo cual contribuye a fortalecer diferentes tejidos, como el vascular, de tal manera que el transporte de agua puede realizarse desde la raíz

hasta las hojas. Es considerada como la sustancia orgánica más abundante de las plantas después de la celulosa. Participa en el crecimiento de las plantas y de estos dímeros se han aislado más de 500 compuestos. Asimismo, los lignanos actúan como antioxidantes en flores, semillas, frutos, tallos, cortezas, hojas y raíces. Las suberinas (biopolímeros con cadenas largas de compuestos fenólicos), contribuyen a reforzar las cortezas de los tallos y las raíces, previenen los efectos de la desecación atmosférica y el ataque de patógenos (Taiz y Zeiger, 2006). Se encuentran en una gran variedad de plantas en aproximadamente 60 familias: *Legumi-*

nosae, Fabaceae, Poaceae, Cucurbitaceae, Pedaliaceae, Brassicaceae, Myristicaceae, Magnoliaceae, Piperaceae y *Aristolochiaceae*.

Los flavonoides se biosintetizan en todas las plantas terrestres. Constituyen uno de los grupos más característicos y extensos de compuestos secundarios de las plantas superiores. Estos compuestos son muy distintos entre especies y se forman en respuesta al ambiente. Son sintetizados en los cloroplastos y se acumulan en dicho organelo; se transportan hacia el retículo endoplasmático y la vacuola, siendo muchos de ellos reconocibles como pigmentos de las flores. Su estructura está

Cuadro 4. Algunos ejemplos de compuestos metabólicos secundarios y su actividad

| ESPECIE VEGETAL | METABOLITO SECUNDARIO | ACTIVIDAD | FAMILIA VEGETAL DONDE SE PRESENTAN |
|---|--|--|------------------------------------|
| CAFÉ <i>Coffea arabica</i> | Ácido clorogénico, cafeína | Aroma y sabor; estimulante del sistema nervioso central | Rubiaceae |
| CLAVO <i>Syzygium aromaticum</i> | Kenferol, miricetina, ácido oleanólico, esteroides y eugenol | Antiséptica y analgésica o anestésica; antiinflamatoria | Myrtaceae |
| DEDALERA <i>Digitalis purpurea</i> | Digitalina | Horticultura, droga medicinal | Escrofulareaceae |
| GRANADA <i>Punica granatum</i> | Ácido elágico | Desinflamación, control de presión arterial, reduce el colesterol LDL | Lythraceae |
| LINAZA <i>Linum usitatissimum</i> L. | Lignano secoisolariciresinol diglicósido (SDG), matairesinol, pinoresinol e isolariciresinol | Los lignanos actúan como antioxidantes y fitoestrógenos con propiedades anti-cancerígenas | Linaceae |
| TABACO <i>Nicotiana tabacum</i> | Nicotina | Tóxico, insecticida en horticultura, droga de abuso | Solanaceae |
| TÉ VERDE <i>Camellia sinensis</i> | Catequinas, taninos y flavonoides | Aroma sabor y color a bebidas. Auxiliar en tratamientos contra aterosclerosis, cáncer, diabetes, sobrepeso y enfermedades neurodegenerativas | Theaceae |
| VAINILLA <i>Vanilla planifolia</i> | Ácido ferúlico, metilvainillina | Agente saborizante, fuente de sustancias aromáticas | Orchidaceae |

Basado en: Ávalos y Pérez, 2009; Buchanan et al., 2000.

basada en un anillo flavano y son compuestos producidos por una síntesis mixta, por la ruta del ácido shikímico y la ruta de los policétidos. Se conocen más de 2000 estructuras isoflavonoides; las dos más conocidas son la genisteína y la daizeína (figura 3), que en las plantas pueden inducir la germinación del polen y la elongación del tubo polínico (Martínez Flores *et al.*, 2002; Taiz y Zeiger 2006).

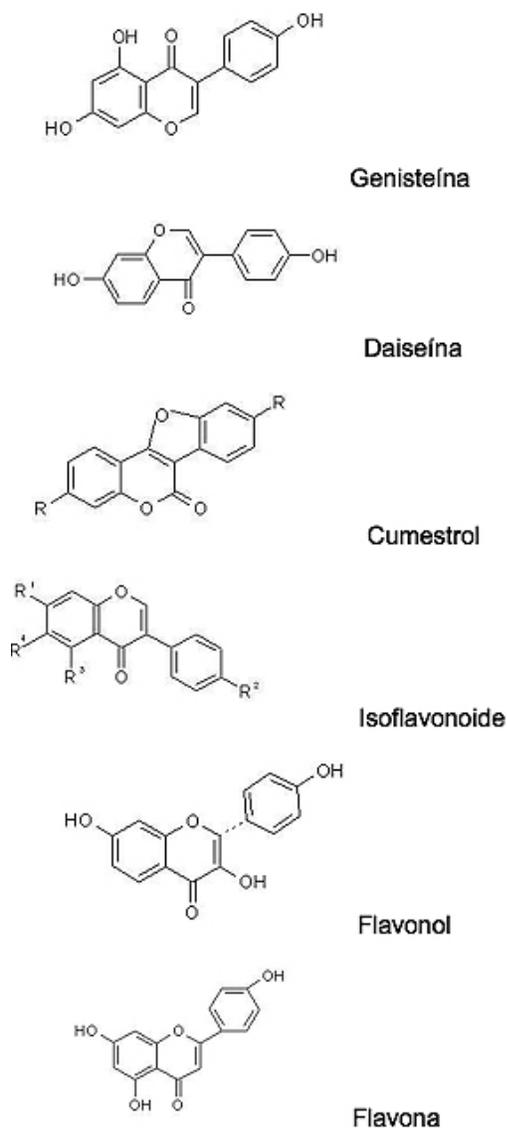


Figura 3. Estructura química de fitoestrógenos con anillo flavano

Los estrógenos de origen vegetal o fitoestrógenos: isoflavonas, lignanos y cumestanos

Los fenilpropanoides, al ingresar en el organismo de humanos o animales, actúan imitando la acción de los estrógenos y se les conoce como estrógenos naturales o fitoestrógenos. Presentan una variabilidad de efectos dentro del metabolismo de humanos o animales que consumen plantas, y cuyo efecto va a depender del tipo y cantidad de compuesto ingerido. Estos efectos estrogénicos son tanto agonistas como antagonistas, y se considera que poseen una estructura difenólica heterocíclica común, a la cual se encuentran unidos grupos oxo, ceto, hidroxilo o ésteres. Muchos son los ejemplos dentro de las relaciones planta-animal, tanto por sus efectos como por su consumo y actividad endógena.

Los fitoestrógenos que se encuentran en las plantas no son esteroides, sino compuestos que poseen grupos hidroxilo que se alinean en una posición estereoquímica análoga al 17 β -estradiol, el estrógeno natural más potente en seres humanos, y pueden competir con el receptor del estrógeno de los mamíferos (García y López, 2004; Lenis Sanin *et al.*, 2010; Serrano y Pérez Rivero, 2011).

A pesar de que las isoflavonas, lignanos y cumestanos se encuentran en las plantas de manera común y frecuente, aún no se ha determinado su papel dentro de la fisiología de la planta. Se ha reportado que la fluorescencia natural de estas moléculas cuando son expuestas a radiación ultravioleta, se incrementa al unirse a proteínas (Serrano *et al.*, 2007b). En la actualidad existen pocos datos reportados con experimentación adecuada sobre su actividad biológica y química; la mayor parte de los estudios están relacionados con su efecto en animales el cual varía desde una simple respuesta estrogénica hasta casos de infertilidad (Serrano *et al.*, 2007a).

El grupo que cuenta con mayor cantidad de compuestos del tipo de los fitoestrogenos son los flavonoides y dentro de ellos, las más estudiadas son las isoflavonas, pero también presentan actividad estrogénica los lignanos, cumestanos y lacto-

nas (cuadros 5 y 6). Son muchos los beneficios de los fitoestrógenos para la salud, pues han mostrado efectos anticancerígenos en tumores de mama y alivian síntomas de menopausia, ayudan al equilibrio hormonal, favoreciendo la turgencia de la piel, o como potenciales anticonceptivos (cuadro 7) (Serrano y Pérez-Rivero, 2010; Sheehan, 1995).

Isoflavonas

Las isoflavonas y flavonas forman parte de los flavonoides, que son compuestos antioxidantes. Son compuestos polifenólicos no esteroideos con actividad menor que el estradiol. Además de su efecto estrogénico, las isoflavonas mejoran la perfusión arterial sistémica. Son muy variados, al igual que su efecto estrogénico. Entre ellos se encuentran la liquiritigenina y la narigenina, sustratos de la isoflavona sintetasa, daidzeína, genisteína, formononetina y biochanina A, siendo estos cuatro últimos los más estudiadas por su participación en la dis-

rupción de la función reproductiva animal y humana (Serrano y Pérez-Rivero, 2010).

Se encuentran en diversas plantas, principalmente dentro de la familia *Leguminosae* en el grupo de las *Fabaceae* (cuadro 6), como la soya (*Glycine max*), los cereales y legumbres como frijoles (*Phaseolus vulgaris*), lentejas (*Lens esculenta*) y chícharos (*Pisum sativum*). Los granos de soya y granos enteros de leguminosas constituyen la fuente más abundante de genisteína, daidzeína y antocianidinas. La cantidad ingerida en alimentos, aparentemente, es segura; sin embargo, estudios en el perejil (*Petroselinum crispum*), han comprobado el aumento en la producción de estrógenos; en altas concentraciones puede ser tóxico y tener contraindicaciones (Chasquibol *et al.*, 2003; Patisaul y Jefferson, 2010; Serrano *et al.*, 2006; Zierau *et al.*, 2008).

El resveratrol polifenol isoflavonoide que actúa como compuesto antioxidante (cuadro 5).

Cuadro 5. Principales grupos de fitoestrógenos

| GRUPO QUÍMICO | PRINCIPALES FITOESTRÓGENOS | FUENTE |
|---------------|---|--|
| ISOFLAVONAS | Genisteína, genistina, daidzeína, daidzina, liquiritigenina, narigenina, biochanina A, gliciteína, glicitina, pueranina, naringenina, formononetina, formononetina, resveratrol | Harina de soya, tofu, frijoles, lentejas, chícharos, uva, trébol rojo, kudzu |
| LIGNANOS | Dibencilbutano, enterodiol, enterolactona | Lentejas, soya, avena, cereza, manzana, ajo, granos enteros, frutas y verduras |
| CUMESTANOS | 4'-cumestrol, metoxycumestrol, 3,9-dihidroxi-6-benzofuro, 3,2-benzopirano, 6-onametoxi-cumestrol, miroestrol, desoximiroestrol | Alfalfa, col blanca, trébol, vid y cebada |
| LACTONAS | Lactonas del ácido resorcilico: zeranol, zearalenona | Soya, cebada, centeno, cacahuete, trigo, arroz, maíz |

Basado en Cassidy *et al.*, 2000; Murkies *et al.*, 1998; Patisaul *et al.*, 2010; Pérez-Rivero *et al.*, 2007; Scheenan y Medlock, 1995; Zhao y Mu, 2010; Zierau *et al.*, 2008.

Se encuentra presente en algunos vegetales y frutas rojas como las uvas (*Vitis vinifera*), arándanos

(*Vaccinium erythrocarpum*), nueces (*Junglans regia*) o cacahuates (*Arachis hipogaea*) (cuadro 6).

Cuadro 6. Algunas especies vegetales que producen fitoestrógenos

| Compuesto | Nombre común | Nombre científico |
|----------------|--|---|
| ISOFLAVONAS | Frijol Lenteja Chícharo Trébol rojo Kudzu Kwao, krúa o butea Soya Alfalfa | Phaseolus vulgaris L. (Fabaceae) Lens esculenta Moech. (Fabaceae) Pisum sativum L. (Fabaceae) Trifolium pratense L. (Fabaceae) Pueraria lobata Willd. (Fabaceae) Pueraria mirifica Airy Shaw & Suvatab (Fabaceae) Glycine max (L.) (Fabaceae) Medicago sativa L. (Fabaceae) |
| ISOFLAVONOIDES | Cacahuete, maní Vid, parra Bambú japonés | Arachis hypogaea L. (Fabaceae) Vitis vinifera L. (Vitaceae) Polygonium cuspidatum Siebold & Zucc. (Polygonaceae) |
| LIGNANOS | Avena Cerezo Manzana Ajo Falsa lima Viña de magnolia Viña Arroz | Avena sativa L. (Poaceae) Prunus avium L. (Rosaceae) Malus sp. Mill (Rosaceae) Allium sativum L. (Amaryllidaceae) Aglaiia tomentosa subsp. cordata (Hiern) Pannell (Meliaceae) Schisandra grandiflora var. rubriflora (Wallich) J. D. Hooker & Thomson (Schisandraceae) Kadsura angustifolia A.C. Smith Sargentia (Schisandraceae) Oriza sativa L. (Poáceae) |
| CUMESTANOS | Alfalfa Trébol Vid Cebada Col Vainilla Kwao, krúa o butea | Medicago sativa L. (Fabaceae) Trifolium sp L. (Fabaceae) Vitis vinifera L. (Vitaceae) Hordeum vulgare L. (Poaceae) Brassica oleracea L. (Brassicaceae) Vainilla planifolia Jacks ex Andrews (Orchidaceae) Pueraria mirifica Airy Shaw & Suvatab (Fabaceae) |

Basado en Bacciottini et al., 2007; Glitso et al., 2000; Kopcewicz, 1971; Lenis et al., 2010; Park et al., 2012; Patisaul y Jefferson, 2010; Pérez-Rivero et al., 2007; Serrano y Pérez-Rivero, 2010; Tennen et al., 2012; Xue et al., 2008; Zhao y Mu, 2010; Zierau et al., 2008.

Y, entre los más valorados, la Hierba de Santa María (*Polygonum cuspidatum*), con efectos son anticancerígenos, antienviejecimiento, antiinflamatorio, antifibrótico, hipoglucemiante, hipocolesterolemiante (cuadro 7). Recientemente se ha observado que el resveratrol es capaz de inhibir di-

rectamente varias fosfodiesterasas e interviene en el aumento de la oxidación de ácidos grasos, biogénesis mitocondrial y respiración mitocondrial; también disminuye la glucosa en la sangre (Sung-Jun Park, *et al.*, 2012; Tennen *et al.*, 2012).

Cuadro 7. Beneficios de los fitoestrógenos

| Patología | Efecto principal | Efecto simple |
|-----------------------|---|--|
| CIRCULACIÓN SANGUÍNEA | Actúan como antioxidantes favoreciéndola | Evitan la aparición de celulitis |
| CÁNCER | Disminuye la incidencia de cáncer de colon, próstata y mama | Aumenta la resorción de tumores |
| APOPTOSIS | Retardan el deterioro y muerte celular | Efecto antioxidante |
| ENDOMETRIOSIS | Controla el exceso de estrógenos | Mejora tensión menstrual |
| MENOPAUSIA | Control del descenso de estrógenos | Ayuda en la terapia del reemplazo de estrógeno |
| COLESTEROLEMIA | Vasodilatación | Ayudan a regular los colesterolos |
| TRÁNSITO INTESTINAL | Evitan la constipación | Eliminan toxinas |
| OSTEOPOROSIS | Disminuye la incidencia | Mantienen la densidad ósea |
| DÉRMICAS | Mejora la calidad de piel y pelo | Dermotensor y estimulante folicular |

Basado en: Cassidy, 2005; Pérez-Rivero et al., 2007; Serrano et al., 2006; Tennen et al., 2012; Thompson et al., 1996; Zhao E. y Mu Q., 2010; Zierau, et al., 2008.

Lignanos

Los lignanos son uno de los principales grupos de fitoestrógenos que actúan como antioxidantes, disminuyendo los efectos de los radicales libres. Algunos lignanos son: secoisolariciresinol, pinoresinol, lariciresinol, matairesinol. Hay lignanos simples y lignanos cíclicos que combaten los efectos dañinos de los radicales libres y cuyos compuestos como el enterodiol y la enterolactona tienen potencial anticancerígeno que imita las funciones de hormonas humanas; pueden inhibir el crecimiento de tumores de mama y de próstata (cuadros 5-7).

Los lignanos forman parte de la lignina de la pared celular, participan en el crecimiento de las plantas y prácticamente se encuentran en diferentes órganos de las plantas y en todas las familias del reino vegetal. Se les encuentra en frutas, verduras y semillas, como por ejemplo brócoli, coliflor, coles de Bruselas, repollo del género *Brassica sp.*, cebollas (*Allium cepa*), ajos (*Allium sativum*) puerros (*Allium ampeloprasum*), ejotes (*Phaseolus vulgaris*), pimientos rojos y verdes (*Capsicum annum*),

zanahorias (*Daucus carota*), pepinos (*Cucumis sativus*), tomates (*Solanum lycopersicum*), cerezas (*Prunus avium*), duraznos (*Prunus persica*), peras (*Pyrus sp.*), uvas (*Vitis vinifera*), manzanas (*Malus sp.*), mandarinas (*Citrus reticulata*), kiwis (*Actinidia deliciosa*), ciruelas (*Prunus sp.*), naranjas (*Citrus sinensis*), semillas de lentejas (*Lens culinaris*), avena (*Avena sativa*), sésamo (*Sesamum indicum*), linaza (*Linum usitatissimum*), amapola (*Papaver somniferum*) y girasol (*Helianthus annuus*). En plantas como la lima falsa (*Aglaia tomentosa*), magnolia (*Magnolia sp.*), viña (*Schisandra rubriflora*), y bejuco (*Kadsura angustifolia*) (Bylund et al., 2005; Coley y Barone 1996; Cotterchio et al., 2008; Chasquibol et al., 2003; Thompson, et al., 1996; Xue et al., 2008).

Cumestanos

El cumestrol es un fitoestrógeno que mimetiza los efectos biológicos de los estrógenos. Presenta la misma afinidad de unión al receptor a estrógenos, por lo que parece afectar en la diferenciación sexual, el crecimiento de células dependientes de es-

trógenos y la secreción de gonadotropina. También es capaz de estimular la mineralización de huesos y reduce el colesterol. Debido a la semejanza con el 17 β -estradiol, es capaz de realizar un control hormonal inhibiendo la actividad de la aromatasa y de las deshidrogenasas. En fechas recientes se han descubierto dos cumestanos con mayor actividad estrogénica que el resto de los fitoestrógenos: el miroestrol y desoxymiroestrol, que se encuentran en el kwao kreu (*Pueraria mirifica* Airy Shaw & Suvatab [Papilionoideae]), planta herbácea de Tailandia hoy día conocida internacionalmente por sus propiedades. Se consideran incluso con mayor eficacia que los fitoestrógenos genisteína, daidzeína, daidzina, genistina y que el propio cumestrol que se encuentra en la soya (*Glycine max* [L. Fabaceae]) (cuadro 6) (Chansakaow et al., 2000; Murkies et al., 1998; Murray et al., 1982; Pérez-Rivero et al., 2008).

El cumestrol es uno de los fitoestrógenos más importantes. Se aisló por primera vez de la alfalfa (*Medicago sativa*). Presenta actividad estrogénica y se encuentra en muchos alimentos como frijol (*Phaseolus vulgaris*), espinacas (*Spinaceae oleraceae*), trébol (*Trifolium repens*, *Trifolium fragiferum*), germen de soya (*Glycine max*), coles de Bruselas (*Brassica oleraceae*). Los cumestanos derivan de la cumarina, compuesto volátil de fragancia agradable, muy abundante en algunos frutos como la cápsula de la vainilla (*Vainilla planifolia*), chícharos (*Pisum sativum*) y habas (*Vicia faba*) (cuadro 6).

Lactonas

Los terpenoides abarcan los terpenos, monoterpenos y sesquiterpenos, con diferentes tipos de sustituciones como hidrocarburos, alcoholes y cetonas, además de que pueden ser acíclicos, monocíclicos, bicíclicos, o tricíclicos. Están presentes en varias familias de plantas, principalmente en *Asteraceae*, *Apiaceae*, *Magnoliaceae*, *Myrtaceae*, *Rutaceae*, *Lauraceae* y *Agavaceae*. Algunos de los compuestos son helenanina, ambrosina, partenina, lactupi-

crina, vernolepina y mexicanina. En general, son aceites esenciales que presentan propiedades alimenticias, farmacológicas (como los cardiotónicos de aplicación terapéutica). Otros, como las saponinas, tienen aplicación industrial. Las sustancias aromáticas o esencias son empleadas tanto en la industria farmacéutica como en la cosmética. Los aceites esenciales pueden ser utilizados como antisépticos para conservar alimentos, como antiespasmódicos, expectorantes; eliminador de gases (carminativo) y digestivo (eupéptico). Dosis elevadas de aceites esenciales pueden llegar a ser tóxicos, a nivel del sistema nervioso central. Otros, como el de ruda (*Ruda graveolens*) o enebro (*Juniperus communis*), se considera que poseen propiedades abortivas. Algunos otros pueden ocasionar problemas tópicos como irritación o alergias (Romo de Vivar y Romo, 1961; Seaman, 1982).

Las lactonas del ácido resorcílico zearanol y zearalenona son estimulantes del crecimiento, presentan actividad estrogénica que puede ocasionar problemas en la reproducción de animales, lo mismo que en el humano. Ambas son micotoxinas producidas por el hongo *Fusarium* y se pueden encontrar contaminando granos de maíz (*Zea mays*), arroz (*Oriza sativa*), trigo (*Triticum sp.*), cacahuate (*Arachis hipogea*), cebada (*Hordeum vulgare*), soya (*Glycine max*) (Kupier-Goodman et al., 1987; Saenz de Rodríguez, 1984).

Las saponinas triterpénicas y esteroideas se encuentran en semilla de castaño (*Castanea sativa*), regaliz u orosuz (*Glycyrrhiza glabra*), ginseng (*Panax ginseng*), agaves (*Agave sisalana*) y dioscoreas (*Dioscorea sp.*). A diferencia de otros fitoestrógenos, su acción es en receptores hipotalámicos (Taiz y Zeiger, 2006), y no de la manera clásica, uniéndose en el citoplasma de las células blanco a los receptores estrogénicos (Serrano y Pérez Rivero, 2010).

Otros efectos de los fitoestrógenos, además de su actividad estrogénica, es que también pueden presentar efectos antioxidantes, antiproliferativos y antiangiogénicos (Cassidy, 2005). Es raro que

una especie vegetal produzca un solo tipo de compuesto con actividad biológica; lo común es que se produzcan múltiples componentes activos. Por ejemplo la granada (*Punica granatum*, *Lythraceae*) contiene ácido elágico, que actúa como antioxidante; contiene además un polifenol con efecto protector sobre inflamaciones crónicas y es utilizado en el control nutricional de hipercolesterolemias. Además de los fitoestrógenos, la granada contiene minerales como potasio y zinc, que aparentemente le permiten tener efectos importantes en el control de la presión arterial, en la reducción del colesterol unido a LDL y previene la formación del ateroma; contiene además los ácidos grasos oléico, linoléico, eicosanoico, araquidónico y palmítico, que junto a minerales como magnesio y hierro, contribuyen a sus efectos antioxidantes y estrogénicos.

Fisiología ecológica y algunos usos de los metabolitos secundarios

El papel fisiológico o función en el metabolismo de la planta de los distintos metabolitos secundarios se encuentra hoy día en estudio, tanto por bioquímicos como por ecólogos y fisiólogos. Se ha propuesto que, en algunos casos, son el resultado de un proceso evolutivo vegetal que confiere mayor aptitud de sobrevivencia a las especies vegetales que los presentan. Actualmente se ha confirmado un papel ecológico importante, sobre todo si se abordan con la perspectiva de interacción planta-animal o en las interacciones ecológicas entre la planta y su ambiente (Barakat *et al.*, 1977; Harborne, 1989; Maldonado, 1985).

Si se atiende a su importancia respecto a las relaciones con el ámbito natural, particularmente la relación planta-animal, el metabolismo secundario de las plantas puede tener un significado que puede ser visto desde diferentes aspectos (Goodwin y Mercer, 1990; Harborne 1989 Landry *et al.*, 1995):

- i) Producción de sustancias alelopáticas, que inhiben el crecimiento de otros organismos.
- ii) Producción de fitoalexinas que evitan las in-

fecciones.

- iii) Producción de compuestos antimicrobianos.
- iv) Producción de disuasorios nutritivos, como sabor amargo, que evitan a los depredadores haciendo a las plantas indigestas o incluso venenosas.
- v) Interacciones planta-herbívoro, relacionadas con la atracción o repelencia de animales como aves, insectos, mamíferos u otros organismos como hongos y bacterias.
- vi) Producción de pigmentos que proporcionan color a hojas y flores.
- vii) Producción de diferentes sustancias aromáticas que dan olor a flores y frutos; atraen a polinizadores o dispersores de frutos a fin de mantener las poblaciones vegetales.
- viii) Actúan como pesticidas, elaborando sustancias que evitan el ataque de patógenos (como antifúngicos y desinfectantes).
- ix) Poseen actividad de defensa ante herbívoros.
- x) Proveen de soporte mecánico a la planta,
- xi) Algunos compuestos pueden absorber la radiación ultravioleta.

Se calcula que la flora mundial descrita es de 250 000 especies de plantas con flores, faltando otro tanto por describir. Alrededor de 10 000 son comestibles y tan sólo se ocupan entre 150 a 200 especies para la alimentación humana. Las especies vegetales con propiedades curativas se calculan alrededor de 37 000, es decir, el 15% de la flora mundial, faltando mucho por descubrir y estudiar. Es así que existe una alta probabilidad de encontrar nuevas sustancias que ayuden a resolver las principales enfermedades que aquejan a la humanidad. Hoy día hemos recopilado, con el uso y tradición cultural, información relacionada con los posibles usos de sus principios activos, provenientes de diferentes especies vegetales. Éstas pueden brindar a la humanidad un gran potencial, tanto químico como biológico. Como se muestra en los cuadros 2 y 7, son varias las industrias que se han desarrollado con los principios activos de plantas a las cuales

se les ha encontrado actividad antimicrobiana, antioxidante, anticancerígena, antiviral, citotóxica y fitotóxica, o como herbicidas e insecticidas (Leyva *et al.*, 2011).

CONCLUSIONES

La producción de los metabolitos secundarios en plantas ha sido una respuesta a los factores abióticos y bióticos de su entorno y a su gran plasticidad metabólica adaptativa. De hecho, ha sido considerada como una de las adaptaciones más sorprendentes del reino vegetal. Es así como hoy en día se estudia una gran variedad de compuestos orgánicos sintetizados por las plantas.

Los metabolitos secundarios presentan una gran versatilidad y el hombre ha utilizado estos compuestos con fines prácticos para su bienestar; también ha visualizado su explotación a nivel industrial, utilizándolos en medicina, en la industria de las fragancias, en la producción agrícola, la alimentación humana y animal, la producción de colorantes, saborizantes y polímeros.

Mucho del conocimiento que hoy día se tiene, finca sus raíces en la medicina tradicional; es así que los compuestos de importancia farmacéutica obtenidos de muy diversas plantas son el resultado del conocimiento tradicional de diversas etnias, cuyas relaciones con su ambiente natural y la serie de pruebas de ensayo y error, a lo largo de cientos de años, nos han provisto de una serie de compuestos bioactivos que han sido llevados a pruebas de laboratorios en todo el mundo.

Mucho se ha realizado para la identificación y caracterización biológica y molecular de plantas de gran interés para la medicina y otras industrias, así como para la propia agricultura moderna. Evaluar, aislar y caracterizar química y biológicamente los metabolitos secundarios de diversas especies vegetales y sus múltiples posibilidades de usos y respuestas a las condiciones naturales donde habitan ha sido y será para el futuro de la investigación un gran reto.

Si bien el metabolismo secundario no se había considerado como vital para las plantas, sí constituye una de las adaptaciones más relevantes. Básicamente son cuatro rutas metabólicas que se conocen para la síntesis de la mayor parte de compuestos asociados a este metabolismo. Se sabe también que los factores abióticos, es decir las señales externas que los modulan como la luz, ciclos circadianos, así como los propios factores internos provenientes del metabolismo primario, han ido dando luz respecto a la importancia de estos metabolitos.

Los fitoestrógenos se encuentran en cada una de las especies vegetales en diferentes concentraciones, así como diferentes compuestos dependientes de la bioquímica vegetal de la especie de que provengan. Su consumo tanto humano como animal puede proporcionar dietas ricas en fitoestrógenos que incentiven su acción estrogénica, cuyos efectos pueden ser tanto benéficos como en detrimento de la salud humana.

Los fitoestrógenos hoy día son considerados como los metabolitos secundarios de mayor interés científico de este siglo. Los beneficios que de ellos se obtienen son muy variados: actúan como antioxidantes, favorecen la circulación, evitan la aparición de ciertos tumores, presentan un efecto antienvjecimiento, controlan el exceso de estrógenos, eliminan tóxicos, mejoran la calidad de piel y pelo, inducen a la oligospermia y pueden tener un control reproductivo. Las investigaciones que se realicen a fin de conocer más su funcionamiento dentro de la alimentación, darán posibilidades en la mejora de la nutrición así como en otros aspectos relacionados con el bienestar, para los humanos tanto como para los animales, en su salud y biología reproductiva (cuadro 7).

Los desafíos a enfrentar día a día se han ido resolviendo mediante las diversas formas de realizar los estudios como su caracterización, cuantificación y dosis a ingerir.

REFERENCIAS

- Ávalos-García, A. y E. Pérez-Urria Carril. (2009). Metabolismo secundario de plantas. *La Reduca* (Biología). Serie Fisiología Vegetal, 2, 119-145.
- Azcón-Bieto, J. y M. Talón. (2008). *Fundamentos de fisiología vegetal* (2ª ed.). España: McGraw Hill-Interamericana, U. Madrid.
- Bacciottini, L., Falchetti, A., Bartolini, E., Carosino, A., Brandi, M. (2007). Phytoestrogens: food or drug? *Clin Cases Min Bone Metab*, 4, 123-130.
- Baker, M., K, Medlock, D. Sheehan (1998). Flavonoids inhibit estrogen binding to rat alpha-fetoprotein. *Proc. Soc. Exp. Biol. Med.* 217, 317.
- Barakat, T., A. H. Jackson, M. I. Abdullah (1977). Further studies of *Erythrina* alkaloids. *Lloydia* 40, 471.
- Buchanan, B. B., W. Gruissem, R. L. Jones (2000). *Biochemistry and molecular biology of plants*. Maryland: American Society of Plant Physiologists, pp. 1281-1292.
- Bylund, A., N. Saarinen, J. X., Zhang, J. X., Bergh, A., Widmark, A., Johansson, A., Lundin, E., Adlercreutz, H., Hallmans, G., Stattin, P., Mäkela, S. (2005). Anticancer effects of a plant lignan 7-hydroxymatairesinol on a prostate cancer model in vivo. *Exp. Biol. Med.*, 230, 217-223.
- Cancino- Rodezno, A. (2008). La síntesis de isoprenoides en plantas a través de la vía del 2C metil-D-eritritol-4-fosfato (MEP). *Rev. Ciencia Forestal México*, 33, 139-153.
- Cassidy, A. (2005). Dietary phyto-oestrogens: molecular mechanisms, bioavailability and importance to menopausal. *Nutr. Res. Rev.*, 18, 183-201.
- Cassidy, A., Hanley, B., Lamuela-Raventós, R. (2000). Isoflavones, lignans and stilbenes—origin, metabolism and potential importance to human health. *J. Sci. Food Agric*, 80, 1044-1062.
- Chansakaow, S., Ishikawa, T., Seki, H., Sekine, K., Okada, M., Chaichantipyuth, C. (2000). Identification of deoxymiroestrol as the actual rejuvenating principle of “kwao keur”, *pueraria mirifica*. The known miroestrol may be an artifact. *J. Nat. Prod.*, 63, 173-175.
- Chasquibol, S., Lengua-C., Laura, Delmás, D., Rivera, C. D., Bazán, R., Aguirre, R., Bravo, A. M. (2003). Alimentos funcionales o fitoquímicos, clasificación e importancia. *Rev. Per. Quím. e Ing. Quím*, 5, 920.
- Coley, P. D. y Barone, J. A. (1996). Herbivore and plant defenses in tropical forest. *Annu. Rev. Ecol. Syst.*, 27, 305-335.
- Cotterchio, M., Boucher, B. A., Kreiger, N., Mills, C. A., Thompson, L. U. (2008). Dietary phytoestrogen intake—lignans and isoflavones—and breast cancer risk (Canada). *Cancer Causes & Control*, 19, 259-272.
- Cseke, L. J., Kirakosyan, A., Kaufman, P. B., Warber, S., Duke, J. A., Brielman, H. L. (2006). *Natural products from plants* (2nd ed.). Boca Raton FL: CRC Press.
- Dinan, L. (2001). Phytoecdysteroids: biological aspects. *Phytochemistry*, 57, 325-339.
- Farnsworth, N. R., Bingel, A. S., Cordell, G. A., Crane, F. A., Fong, H. H. S. (1975). Potential value of plants as sources of new antifertility agents. *J. Pharm. Sci.*, 64, 717-754.
- García, D. E. (2004). Los metabolitos secundarios de las especies vegetales. *Pastos y Forrajes*, 27, 1-12.
- García, D. E. y López, O. (2004). Los fitoestrógenos: ¿mito o amenaza para la alimentación animal en el trópico? *Pastos y Forrajes*, 27, 303-316.
- Goodwin, T. W. (1971). *Aspects of terpenoid chemistry and biochemistry*. Londres: Academic Press.
- Goodwin, T. W. y Mercer, E. I. (1983). *Introduction to plant biochemistry* (2nd Ed.) Londres: Pergamon Press.
- Glitso, L., Mazur W., Adlercreutz, H., Wahala, K.,

- Makela, T., Sandstrom, B., Bach Kundsen, K. E. (2000). Intestinal metabolism of rye lignans in pigs. *Brit J. Nutr.*, 84, 429-437.
- Harborne, J. B. (1989). Recent advances in chemical ecology. *Nat. Prod. Rep.*, 6, 85-108.
- Knaggs, A. R. (2003). The biosynthesis of shikimate metabolites. *Nat. Prod. Rep.*, 20, 119-136.
- Kopcewicz, J. (1971). Estrogens in developing bean (*Phaseolus vulgaris*) plants. *Phytochemistry*, 10, 1423.
- Kupier-Goodman, T., Scott, P. M., Watanabe, H. (1987). Risk assessment of the mycotoxin zearalenone. *Regul. Toxicol. Pharmacol.*, 7, 253-306.
- Landry, L. G., Chapple, C. C. S., y Last, R. L. (1995). Arabidopsis mutants lacking phenolic sunscreens exhibit enhanced ultraviolet-B injury and oxidative damage. *Plant Physiol*, 109, 1159-1166.
- Lees, G. L., Suttill, N. H., Gruber, V. (1993). Condensed tannins in sainfoin. I. A histological and cytological survey of plant tissue. *Can. J. Bot.* 71, 1147.
- Lenis Sanin, Y. Y., Gutiérrez Gómez, M. T., Tarazona Morales, A. M. (2010). Efectos de los fitoestrógenos en la reproducción animal. *Rev. Fac. Nal. Agr.*, 63, 5555-5556.
- León, P., y Guevara García, A. (2007). La síntesis de isopenoides a través de la vía MEP, un nuevo blanco de manipulación para la salud y beneficio humano. En Oria Hernández J., Rendón Huerta, E., Reyes Vivas, H., Romero Álvarez I., Velázquez López (eds.). *Mensaje Bioquímico xxxi*. Departamento de Bioquímica, Facultad de Medicina, UNAM: México.
- Leyva, E., Navarro-Tovar, G., Loredó-Carrillo, S. E., Santos Díaz, M. S. (2011). Biosíntesis y actividad biológica de fitoestrógenos y fitosteroides. *Bol. Soc. Quím.*, 5, 35-43.
- Maldonado, R. (1985). *Los productos en las plantas*. Vol. I. Coahuila: Centro de Investigación en Química Aplicada.
- Martínez Flores, S., González Gallego, J., Culebras, J. M., Tuñón, M. J. (2002). Los flavonoides: propiedades y acciones antioxidantes. *Nutr. Hosp.*, 17, 271-278.
- Murkies, A. L., Wilcox, G., Davis, R.S. (1998). Phytoestrogens. *J. Clin. Endocrinol. Metabol.*, 83, 293-303.
- Murray, R., Méndez, J., Brown, S. A. (1982). The natural coumarins. Nueva York: John Wiley & Sons, Ltd.
- Patisaul, H., y Jefferson, W. (2010). The pros and cons of phytoestrogens. *Front Neuroendocrinol.*, 31, 400-419.
- Pérez-Rivero, J., Aguilar, A., Martínez, J., Pérez, M., Serrano, H. (2007). Los fitoestrógenos y el efecto de su consumo en diferentes órganos y sistemas de animales domésticos. *Agricultura Tecnológica*, 67, 325-331.
- Pérez-Rivero, J., Martínez-Maya, J., Pérez-Martínez, M., Aguilar-Setién, A., Serrano, H. (2008). Efecto del coumestrol sobre la producción espermática y la conducta de exploración olfatoria de perros estimulados con moco vaginal estral. *Vet. Méx.*, 40, 9-16.
- Romo de Vivar, A. y Romo, J. (1961). *Mexicana E.*, una lactona norsesquiterpénica. *Boletín del Instituto de Química*. Univ. Nal. Autón Mex., XIII, 29 -39.
- Sáenz de Rodríguez, C. A. (1984). Environmental hormone contamination in Puerto Rico. *New Engl. J. Med.*, 310, 1741-1742.
- Seaman, F. C. (1982). Sesquiterpene lactones as taxonomic characters in the Asteraceae. *Bot. Rev.*, 48, 121-195.
- Serrano Drago, M. E., López López, M., Sainz Espuñes, T. (2006). Componentes bioactivos de alimentos funcionales de origen vegetal. *Rev. Mex. Ciencias Farmac.* 37, 58-68.
- Serrano, H., Pérez-Rivero, J. J., Aguilar-Setién, A., De Paz, O., Villa-Godoy, A. (2007a). Vampire bat reproductive control by a naturally occurring phytoestrogen. *Reprod. Fertil. Develop.*, 19, 470-472.
- Serrano, H., Pérez-Rivero, J. J., Martínez Maya,

- J. J., Aguilar Setién, A., Pérez Martínez, M., García-Suárez, M. D. (2007b). Fluorescence and immunohistological detection of estrogen receptors in dog testis and epididymis after oral coumestrol administration. *Neuroendocrinol., Lett.* 29, 977-980.
- Serrano, H. y Pérez-Rivero, J. (2010). Mecanismos de control hormonal: la superfamilia de los receptores nucleares. En S. Caballero y A. Villa-Godoy (eds.), *Fisiología veterinaria, introducción a la fisiología de los procesos productivos* (pp. 181-188). México: UNAM.
- Sheehan, D. M. (1995). The case for expanded phytoestrogen research. *Proc. Soc. Exp. Biol. Med.*, 208, 3-5.
- Sheehan, D. M., Medlock, K.L. (1995). Current signs regarding phytoestrogens. *Polyphénols Actualités*, 13, 22-24.
- Park, S. J., Ahmad, F., Philp, A., Baar, K., Williams, T., Luo, H., Ke, H., Rehmann, H., Taussig, R., Brown, A. L., Kim, M. K., Beaven, M. A., Burgin, A. B., Manganiello, V., Chung, J. H. (2012). Resveratrol ameliorates aging-related metabolic phenotypes by inhibiting cAMP phosphodiesterases. *Cell* 148, 421-433.
- Taiz, L. y Zeiger, E. (2006). Secondary metabolites and plant defense. En *Plant physiology* (4th ed). Sinauer Associates, Inc.
- Tennen, R. I., Michishita-Kioi, E., Chua, K. F. (2012). Finding a target for resveratrol. *Cell* 148, 421-433.
- Thompson, L. U., Rickard, S. E., Orcheson, L. J., Seidl, M. M. (1996). Flaxseed and its lignan and oil components reduce mammary tumor growth at a late stage of carcinogenesis. *Carcinogenesis* 17, 1373-1376.
- Tzin, V. y Galili, G. (2010). New insights into the shikimate and aromatic amino acids biosynthesis pathways in plants. *Mol. Plant* 3, 956-972.
- Verpoorte, R. (2000). Secondary metabolism. En (R. Verpoorte y A. W. Alfermann (eds.), *Metabolic engineering of plants secondary metabolism* (pp. 1-29). Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
- Gao, X. E., Pu, J. X., Huang, S. X., Yang, L. M., Huang, H., Xiao, W. L., Zheng, Y. T., Sun, H. D. (2008). Lignans from *Kadsura angustifolia*. *J. Nat. Prod.* 71, 558-563.
- Zhao, E. y Mu, Q. (2010). Phytoestrogen biological actions on mammalian reproductive system and cancer growth. *Scientia Pharmaceutica*. 79, 1-20.
- Zierau, O., Kretzschmar, G., Möller, F., Weigt, C., Vollmer, G. (2008). Time dependency of uterine effects of naringenin type phytoestrogens *in vivo*. *Mol. Cell Endocrinol.*, 294, 92-99.

Valor nutrimental y funcional del cuatomate (*Solanum glaucescens* Zucc), fruto silvestre de la región mixteca

Kati Medina-Dzul,^{1*} David Muñoz-Rodríguez,¹ Rosa Isela Guzmán-Gerónimo,² Pablo Óscar Acereto-Escoffí.¹

RESUMEN

El cuatomate es un fruto silvestre altamente cotizado de la región mixteca. En este estudio se determinó la composición proximal, fibra dietética, minerales, vitamina C y fenoles totales de dos cosechas secuenciales: otoño del 2006 (C1) e invierno del 2007 (C2). C1 mostró mayor cantidad de proteína mientras que en C2 se incrementó el contenido de fibra dietética. Se encontraron diferencias estadísticas ($P < 0.05$) entre cosechas para todos los componentes. El fruto presentó altos niveles de fibra dietética total (32.44 y 41.05 %), proteína (13.17 y 10.53 %) y minerales (183 y 123, 2914 y 3385, 4.73 y 4.48, 189 y 180 mg/100 g para Ca, K, Fe y Mg respectivamente), destacando el elevado contenido de compuestos fenólicos (204.06 mg/100 g de fruto fresco equivalente a ácido gálico). Esto hace del cuatomate un fruto adecuado para su consumo como alimento, y que podría prevenir enfermedades crónicas relacionadas con estrés oxidativo.

Palabras clave: Cuatomate, características nutrimentales, composición de alimentos, fenoles totales, fibra dietética, vitamina C, minerales.

1 Universidad Autónoma de Yucatán, Facultad de Ingeniería Química. Periférico Norte km. 33.5, Tablaje Catastral 13615, Colonia Chuburná de Hidalgo Inn, C.P. 97203. Mérida Yucatán, México.

2 Universidad Veracruzana, Instituto de Ciencias Básicas. Av. Dr. Castelazo Ayala S/N Colonia Industrial Ánimas, C.P. 91190. Xalapa, Veracruz, México.

* kati.medina@uady.mx, kmedina46@hotmail.com Teléfono: +52 (999) 946-0956, Fax: +52 (999) 946-0994 (autor para correspondencia).

1. INTRODUCCIÓN

El cuatomate (*Solanum glaucescens* Zucc) es una planta que pertenece a la familia de las solanáceas del género *solanum* y subfamilia *solanoidea* (fig. 1) localizada en la región mixteca de los estados de Oaxaca, Puebla y Guerrero en México. El fruto en estado inmaduro es carnoso y firme (fig. 2). Debido a su firmeza puede almacenarse sin refrigeración, con una vida de anaquel de aproximadamente 15 días.

Aunque es posible encontrar frutos todo el año, 92.82 % de la cosecha se obtiene de junio a septiembre [1]. El cuatomate es un cultivo no convencional que posee un papel importante en el ingreso económico de la región mixteca; es altamente apreciado por sus características sensoriales (olor y sabor) y en estado inmaduro se usa en la elaboración de salsas. Sin embargo, en la actualidad, son nulos los estudios acerca de su composición nutrimental. Por lo tanto, es importante conocer cuál es el aporte nutrimental para el consumidor y sus posibles efectos benéficos en la salud. Asimismo, es importante generar información sobre su contenido de fibra dietética, ya que su consumo proporciona muchos beneficios para la salud: una generosa ingesta de fibra reduce el riesgo de desarrollar enfermedades coronarias, accidentes cerebrovasculares, hipertensión, diabetes, obesidad y ciertos desórdenes gastrointestinales, entre otros [2]. Por otra parte, existe un creciente interés en los compuestos antioxidantes presentes en los frutos comestibles, a los que se atribuye la capacidad de inhibir los procesos de oxidación, generados en el organismo por la presencia de radicales libres, que caracterizan a ciertas enfermedades como cáncer, cataratas y patologías cerebrales [3]. Con base en lo anterior, el objetivo del presente trabajo fue determinar la composición proximal del cuatomate, el contenido de minerales (Ca, Fe, Mg y K), así como las concentraciones de fibra dietética, vitamina C y polifenoles totales.

Figura 1. Planta del cuatomate



Figura 2. Fruto del cuatomate



2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Selección y preparación de la muestra

Las plantas de cuatomate (*Solanum glaucescens* Zucc) fueron identificadas taxonómicamente con base en espécimen de herbario MEXU: OAX917220, del Instituto de Biología de la Universidad Nacional Autónoma de México y posterior descripción botánica de Gutiérrez-Rangel *et al.* [1]. Los frutos se recolectaron en octubre de 2006 (cosecha de otoño) y febrero de 2007 (cosecha de invierno). Las colectas se realizaron en los viveros del Instituto Tecnológico Agropecuario No. 22 de Tecamatlán, Puebla, México. El muestreo de los frutos se realizó en un área de cultivo de cuatro bloques con diez arbustos cada uno; de cada bloque se recogieron al azar diez frutos de aproximadamente 26 g; la muestra estuvo compuesta por cuarenta frutos, los cuales fueron liofilizados y pasados a través de un molino Ika®Werke mod Mf 10 basic, a 5250 rpm. Para el análisis proximal y de minerales, el fruto se procesó incluyendo semillas y cáscara. Para la determinación de vitamina C y fenoles totales, el fruto se analizó en estado fresco (sin liofilizar).

2.2. Composición proximal

Para la determinación de la composición proximal se utilizaron los métodos oficiales de la AOAC (Association of Official Agricultural Chemists) [4]: humedad (925.09), nitrógeno (954.01), lípidos (920.39) y cenizas (923.03). Los carbohidratos totales se cuantificaron como elementos libres de nitrógeno por diferencia (restando al 100 % el contenido de proteína, lípidos, cenizas y humedad). El factor de conversión para proteínas fue 6.25 ($N \times 6.25$).

2.3. Determinación de fibra dietética

La fibra dietética total (fdt) y fraccionada en soluble (fds) e insoluble (fdi) se cuantificó por el método gravimétrico enzimático de la aoac, señalado por Prosky *et al.* [5], con el Kit tdf-100 (Sigma®), Saint Louis Missouri, usa. Las muestras del blanco

y referencia también fueron analizadas simultáneamente por duplicado para la comparación. La fds se determinó por diferencia $fds = fdt - fdi$.

2.4. Determinación de minerales

Se empleó un espectrofotómetro de absorción atómica modelo AA800, marca Perkin Elmer. Para la determinación de cada mineral se tomaron en cuenta las indicaciones del manual del equipo; para su calibración se siguieron los métodos oficiales de la AOAC (975.03, 985.35) y las recomendaciones efectuadas por Villegas *et al.* [6]. Las cenizas de la muestra liofilizada se solubilizaron por calentamiento en 2 mL de ácido nítrico 1:1; antes de la dilución final se aforó con agua bidestilada y la solución ácida fue usada para determinar Ca, Mg, K y Fe.

2.5. Determinación de vitamina C

La vitamina C se determinó de acuerdo al método Tillmans de la AOAC [4]. Se utilizó una solución estándar de L-ácido ascórbico (99 % de pureza, Sigma® Madison Wisconsin, usa). La extracción se realizó en condiciones de oscuridad para evitar la degradación de la vitamina C. Este análisis se realizó en fruto fresco por triplicado. Los resultados fueron expresados como mg de ácido ascórbico por cada g de cuatomate.

2.6. Determinación de compuestos fenólicos totales

El contenido de fenoles totales se determinó en el fruto fresco de cuatomate solamente en la cosecha de invierno (febrero de 2007), utilizando el método de Folin-Ciocalteu reportado por Kim *et al.* [7], en el cual se empleó una mezcla de ácidos wolfrámico y fosfomolibdico en medio básico, que se reduce al oxidar los compuestos fenólicos originando óxidos azules de wolframio y molibdeno. La absorbancia del color desarrollado se midió a 750 nm en un espectrofotómetro Shimadzu uv-1700. Se realizó una curva de calibración en el rango de 0.11 a 2.33 $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ usando ácido gálico como patrón. Los re-

sultados se expresaron en mg de fenoles totales por 100 g de fruto fresco equivalentes a ácido gálico.

2.7. Análisis estadístico

Los resultados se reportaron como medias y desviación estándar de triplicados de la muestra por cada cosecha (excepto el contenido de fenoles totales). La comparación entre medias se hizo con la prueba de Duncan, utilizando el programa estadístico Statgraphics plus 5.1, con un valor prefijado de ($P < 0.05$).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el cuadro 1 se expresa la composición proximal expresada en base seca del cuatomate en dos cosechas. La composición proximal del cuatomate indicó que existe diferencia estadística significativa entre cosechas, con un nivel de confianza del 95 % para todos los análisis.

Cuadro 1. Composición proximal, fibra soluble, insoluble y total (g/100 g) y minerales mg/100 g) del fruto de cuatomate expresado en base seca.

| Componente | Cosecha de otoño (octubre 2006) | Cosecha de invierno (febrero 2007) |
|-----------------|-------------------------------------|---------------------------------------|
| Proteína** | 13.17 ^a ± 0.29 | 10.53 ^b ± 0.27 |
| Lípidos | 2.79 ^a ± 0.03 | 2.99 ^b ± 0.05 |
| Genizas | 6.53 ^a ± 0.18 | 7.03 ^b ± 0.20 |
| Carbohidratos | 77.51 | 79.45 |
| Fibra soluble | 1.58 ^a ±0.7 | 9.14 ^b ±1.0 |
| Fibra insoluble | 30.85 ^a ±0.07 | 31.91 ^b ±1.0 |
| Fibra total | 32.44 ^a ±0.4 | 41.05 ^b ±0.1 |
| Minerales | | |
| Ca | 183 ^a ±0.79 | 123 ^b ±0.71 |
| K | 2914 ^a ±0.09 | 3385 ^b ±0.04 |
| Fe | 4.73 ^a ±0.24 | 4.48 ^b ±0.36 |
| Mg | 189 ^a ±1.73 | 180 ^b ±1.52 |

Los valores indican las medias para determinaciones por triplicado en base seca y su desviación estándar. Letras diferentes entre columnas indican diferencias estadísticas ($P < 0.05$). ** N x 6.25. Humedad de la primera cosecha (88.8 ± 0.76); hu-

medad de la segunda cosecha (89.61 ± 0.97). Los carbohidratos fueron calculados por diferencia.

3.1. Contenido de proteína

Ambas cosechas del cuatomate mostraron un alto contenido de proteínas, similar a lo reportado por Pantoja *et al.* [8] para el tomate de árbol (*Solanum betaceum*) originario de Brasil en dos variedades: amarella (12.37 % base seca) y vermelha (13.10 % base seca). Comparando los valores de proteína con otras solanáceas, el cuatomate también fue similar en su contenido a los valores reportados en las tablas de composición de los alimentos del Instituto de Nutrición “Salvador Zubirán” [9] para el tomate (13.89 % base seca), pero superior a la papa (6.19 % base seca). El contenido proteico encontrado en el cuatomate, equivalente o superior a otras solanáceas, respalda su consumo como alimento para humanos así como la necesidad de evaluar la calidad de la proteína.

3.2. Contenido de lípidos

El alto contenido lipídico se atribuye a las semillas, ya que generalmente son una fuente rica de grasa. Los valores encontrados en el cuatomate resultaron mayores a lo reportado por Vasco *et al.* [10] para el tomate de árbol en la variedad amarillo dorado, y un contenido lipídico de 0.35 %, y 0.57 % para la variedad rojo púrpura, cultivados en España; estos valores son inferiores a los del tomate cultivado en Ecuador, con 9 % y 7.5 % para las variedades amarillo dorado y rojo púrpura respectivamente. Así, la cantidad de lípidos presente en el cuatomate, de 2.79 % (otoño) y 2.99 % (invierno) en base seca, fue superior al de los frutos antes mencionados. Tomando en cuenta que las frutas y las hortalizas son fuentes insignificantes de grasa, con algunas excepciones, [11] el porcentaje de lípidos encontrado en este fruto hace del mismo una buena fuente de contenido energético.

3.3. Evaluación de carbohidratos totales

Los carbohidratos en el cuatomate fueron deter-

minados por diferencia, restando el contenido de humedad, proteína, extracto etéreo y cenizas al 100 %; sus valores fluctuaron en el rango de 77.51-79.45 % en base seca para las cosechas de invierno y otoño, respectivamente. Este valor fue superior al reportado para el tomate (*Solanum lycopersicum*) (50.22 % base seca), similar al de la berenjena (*Solanum melongena*) (64.13 % base seca) e inferior al de la papa (*Solanum tuberosum*) (85.79 % base seca) [9].

3.4. Contenido de fibra total (FDT), soluble (FDS) e insoluble (FDI)

El aporte de fibra dietética para el cuatomate fue superior a lo reportado por Dhingra *et al.* [12] y por Li *et al.* [13] para tomates crudos maduros (cuadro 1). Estos altos valores en el cuatomate se pueden atribuir al pretratamiento de la muestra para su análisis, la cual incluyó las cáscaras, que tienen altas cantidades de fibra. También se observó que la fdi predominó sobre la fds. La diferencia entre cosechas de la fds probablemente se deba a los diferentes periodos en la recolección de los frutos, ya que el contenido de los diferentes compuestos en algunos frutos como la naranja se ve modificado durante el periodo de desarrollo y condiciones de crecimiento [14]. La proporción de fdi/fds fue de 95/5 para la cosecha de otoño y 78/22 para la de invierno. El cuerpo humano requiere un balance de fdi/fds de 70/30 para mejorar su funcionamiento [15]. El predominio de la fracción insoluble en el cuatomate, dada una ingesta importante del mismo, podría traducirse en un menor tiempo de digestión, una reducción de problemas de constipación y disminución del riesgo de cáncer intestinal [12]. Los valores altos en fdi también son importantes, porque podrían ayudar a la fácil absorción de agua en el estómago [15], lo que haría que las personas se sintieran satisfechas y consumieran menos alimentos.

3.5. Contenido de cenizas y minerales

El contenido de cenizas en base seca (6.53 y 7.03 %) para las cosechas de otoño e invierno respectivamente, fue superior a los reportados para el tomate de árbol de la variedad amarillo dorado que se cultiva en España (5.83 %) [10].

El valor elevado de cenizas en el cuatomate, indicó que éste es un fruto con alto contenido de minerales (cuadro 1), de los cuales el potasio fue el más abundante; en la cosecha de invierno, éste aumentó 471 mg con respecto a la de otoño. La cantidad de K en el cuatomate es importante, ya que resultó superior al de la banana (330.6 mg/100 g en peso fresco), considerada una buena fuente de este mineral [17]. El cuatomate también presentó valores de minerales superiores a los reportados para el fruto del tamarillo (*Solanum betaceum Cav.*): en la variedad amarillo-dorado los contenidos de Ca, K, Fe y Mg fueron de 11-25, 398-440, 0.22-0.6, 16-22 mg/100 g, respectivamente; para la variedad rojo-púrpura del tamarillo los contenidos de Ca, K, Fe y Mg fueron de 9.2-22, 347-379, 0.4-0.46 y 14-20 mg/100 g, respectivamente [10]. Por el contenido elevado de minerales, es posible que el consumo regular del cuatomate haga una aportación importante de estos en los requerimientos necesarios para el adecuado funcionamiento del organismo.

3.6. Contenido de vitamina C

Con respecto al contenido de vitamina C, se encontraron diferencias estadísticas entre las dos cosechas (cuadro 2). El contenido fue mayor en la cosecha de otoño (42.89 mg/100 g) que en la de invierno (39.7 mg/100 g). Estos valores resultaron superiores a lo reportado para tomates silvestres de Oaxaca (*Lycopersicon esculentum var Cerasiforme Dunal*) [16] y también fueron mayores para el tomate verde maduro (16.45 mg/100 g) [18]. Por otro lado, el contenido de vitamina C fue cercano al 43.4 mg/100 g, reportados por Masamba y Ngu-

yen, [19] para la naranja de Valencia; este cítrico es considerado uno de los frutos con mayor contenido de vitamina C. El cuatomate se convierte así en una excelente fuente de esta vitamina.

Cuadro 2. Comparación de contenidos de vitamina C

| | Vitamina C (mg/100 g) | Referencia |
|---------------------|----------------------------------|---------------------------------------|
| Cuatomate otoño | 42.89 ^a ±0.80 | |
| Cuatomate invierno | 39.7 ^b ±0.74 | |
| Tomate silvestre | 6.1-13.7 | Crisanto-Juarez <i>et al.</i> [16] |
| Tomate verde maduro | 6.45 | Karki [18] |
| Naranja Valencia | 43.4 | Masamba and Nguyen [19] |

Diferentes letras en la misma columna indican diferencias estadísticas significativas ($P < 0.05$).

3.7 Contenido de fenoles totales

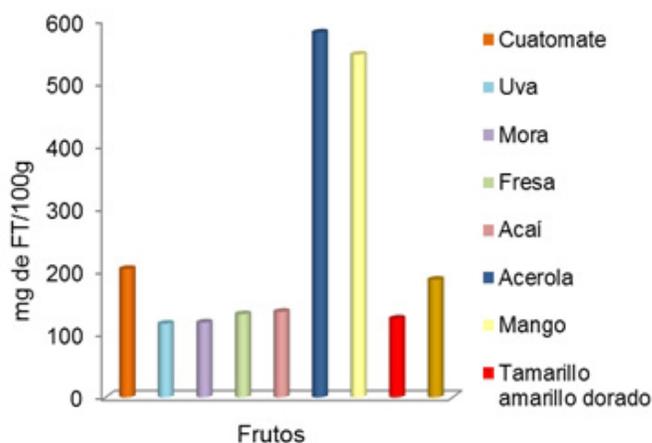
Los fenoles totales (ft) solamente fueron determinados en la cosecha de invierno. Se encontró un valor de 204.06 mg de ft/100 g de muestra en peso fresco, equivalentes a mg de ácido gálico. El contenido de ft (fig. 3) superó al de la uva, mora, fresa y acaí, pero no al de la acerola y el mango [20]. El cuatomate también presentó un contenido mayor de ft que el tamarillo, con una concentración de 125 y 187 mg de ácido gálico/100 g en peso fresco, en las variedades amarillo-dorado y rojo-púrpura respectivamente [10]. Aunque cada componente fenólico puede contribuir de forma y proporción diferente, a todos se les atribuye capacidad antioxidante, por lo que se puede suponer que la presencia de estos compuestos encontrados en el cuatomate, en valores relativamente elevados, presenta efectos benéficos para la salud de sus consumidores.

CONCLUSIONES

Los resultados de los análisis fisicoquímicos demostraron que el cuatomate posee un contenido de proteína (10.53-13.17 %) equivalente o superior al de otras solanáceas. También destaca en contenido de fdt (32.44-41.05 %), en especial de fdi (30.85-31.91%). Por su mayor contenido de fibra dietética total, y dada su mayor proporción relativa de fdi/fds al compararlo con otras solanáceas, una ingesta moderada de cuatomate podría contribuir con diversos efectos positivos en la nutrición. Además, el fruto posee un aporte importante de K, Mg y Ca, comparado con el fruto de tamarillo (*Solanum betaceum Cav.*)

El cuatomate también resultó especialmente importante por su aporte de vitamina C (39.7-42.89 mg/100 g, equiparable al de la naranja Valencia. Así, el contenido de esta vitamina, en conjunto con los fenoles totales, hacen de este fruto una buena fuente de metabolitos secundarios con actividad antioxidante.

Figura 3. Comparación del contenido de fenoles totales del cuatomate



REFERENCIAS

1. Gutiérrez-Rangel, N., Medina-Galicia, A., Ocampo-Fletes, I., Antonio-López, P., Pedraza-Santos, M. E. (2011). Conocimiento tradicional del cuatomate (*Solanum glausencens* Zucc) en la Mixteca baja poblana, México. *Agricultura, sociedad y desarrollo*. 8, 407-420.
2. Anderson, J. W., Baird, P., Davis, R. H Jr., Ferreri, S., Knudtson, M., Koraym, A., Waters, V., Williams, C. L. (2009). Health benefits of dietary fiber. *Nutr Rev* 67, 188-205.
3. Floegel, A., Kim, D., Chung, S., Koo, S., Chun, O. (2011). Comparison of abts/dpph assays to measure antioxidant capacity in popular antioxidant-rich us foods. *J. Food Comp. Anal.* 24, 1043–1048.
4. AOAC (2000). *Official methods of analysis of the Association of Official Analytical Chemists* (17th edition). Vol. 1 Kenneth Helrich (ed.). Washington, D.C.
5. Prosky, L., Asp, N., Swchueizer, T., De Vires, J. Y Fruda, I. (1998). Determination of insoluble, soluble and total dietary fiber in foods and foods products: Interlaboratory study. *J. AOAC*. 71, 1017-1023.
6. Villegas, W., Acereto, P., Vargas, M. (2006). *Análisis ultravioleta-visible; la teoría y la práctica en el ejercicio profesional*. Mérida: Universidad Autónoma de Yucatán.
7. Kim, D. O., Chun, O. K., Kim, Y. J., Moon, H. Y., Lee, C. Y. (2003). Quantification of polyphenolics and their antioxidant capacity in fresh plums. *J. Agr. Food Chem.* 51, 6509-6515.
8. Pantoja, L., Dessimoni-Pinto, N. A., López, C; Gandra, R; Soares dos Santos, A. (2009). Physical and physicochemical characterization of fruits of two varieties of tamarillo originated from the North of Minas Gerais”. *Rev. Bras. Frutic.* [online] 31, 916-919.
9. Borges-Rodríguez, H., Camacho-Parra, M., Morales de León, J., Escobedo, G. (1996). Tablas de composición de los alimentos. Subdirección de Nutrición Experimental y Ciencia de los Alimentos, Instituto Nacional de la Nutrición “Salvador Zubirán”.
10. Vasco, C., Avila, J., Ruales, J., Svanberg, U., Kamal-Eldin, A. (2009). Physical and chemical characteristics of golden-yellow and purple-red varieties of tamarillo fruit (*Solanum betaceum* Cav.). *Int. J. Food Sci. Nutr.* 60, 278-288.
11. Badui, S. (2006). *Química de los alimentos* (4ª ed.). España: Pearson 4ª ed.
12. Dhingra, D., Michael, M., Rajput, H., Patil, R. T. (2012). Dietary fiber in foods: a review. *J. Food Sci. Technol.* 49, 255-266.
13. Li, B. W., Andrews, K. W., Pehrsson, P. R. (2002). Individual sugars, soluble, and insoluble dietary fiber contents of 70 high consumption foods. *J. Food Comp. Anal.* 15, 715-723.
14. Sáenz, C., Estévez, A. M., Sanhueza, S. (2007). Utilización de residuos de la industria de jugos de naranja como fuente de fibra dietética en la elaboración de alimentos. *Arch Latinoam Nutr* 57, 186-191.
15. Grigelmo-Miguel, N., Martín-Belloso, O. (1999). Influence of fruit dietary fiber addition on physical and sensorial properties of strawberry jams. *J. Food Eng* 41, 13-21.
16. Crisanto-Juárez, A. U; Vera-Guzmán, A. M.; Chávez-Servia, J. L.; Carrillo-Rodríguez, J. (2010). Calidad de frutos de tomates silvestres (*Lycopersicon esculentum* var. cerasiforme Dunal) de Oaxaca, México. *Fitotecnia Mexicana*, 33, 7-13.
17. Wall, M. M. (2006). Ascorbic acid, vitamin A and mineral composition of banana (*Musa* sp.) and papaya (*Carica papaya*) cultivars grown in Hawaii. *J. Food Comp. Anal.* 19, 434-445.
18. Karki, D. B. (2005). Effect of harvesting states on the quality of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill CV. Avinash-2, hybrid). *Journal Tribhuvan University*. XXV, 141-147.

19. Masamba, K.G., Nguyen, M. (2008). Determination and comparison of vitamin C, calcium and potassium in four selected conventionally and organically grown fruits and vegetables. *Afr. J. Biotechnol* 7, 2915-2919.
20. Kuskoski, M., Asuero, A., Troncoso, A., Mancini-Fhilo, J., Fett, R. (2005). Aplicación de diversos métodos químicos para determinar actividad antioxidante en pulpa de frutos. *Cienc Tecnol Aliment* 25, 726-732.

Instructions to Authors

The Editorial Board of the journal **Ciencia en la frontera: revista de ciencia y tecnología de la UACJ**, invites authors to submit manuscripts under three categories: research articles, short manuscripts (which will be short articles showing results of undergraduate thesis and written by the undergraduate students, reviewed by their advisers), and invited reviews. Manuscripts should be sent to the Editor in Chief, according to the following specifications:

1. Papers should be from original research and with scientific content.
2. Once published, articles cannot be published elsewhere in the same form, in any language, without the consent of UACJ publishers.
3. Papers may be: research articles, short manuscripts and invited reviews, belonging to the fields of natural or exact sciences (biology, life sciences, chemistry, mathematics, physics, etc). Final decisions concerning acceptability of the manuscripts will be made by the Editorial Board.
4. Papers may be written in English, Spanish or any Romance language. If a translation to Spanish is submitted, the text in original language should also be provided. Abstracts written both in Spanish and English should also be provided.
5. Originals are not sent back.
6. If the author fails to respond to the final comments of the Editorial Board of *Ciencia en la frontera: revista de ciencia y tecnología de la UACJ*, the journal can make editing changes which do not modify the original content of the article.
7. Papers should meet the following format:
 - Short and concise title, written in both English and Spanish or Romance languages.
 - A brief abstract between 40 and 150 words, which should also be written in both languages.
 - Name and nationality of authors.
 - Affiliation of authors, including highest degree and research field of all authors.
 - Author affiliations should be included as footnotes starting from number 1.
 - Ex. Ramírez, J. L.¹ y Martínez, R.²
¹ Universidad de Puebla, México.
² Universidad de Santiago Compostela, España.
 - Footnotes should be posted at the bottom left side of the page where they are mentioned.
 - Specify type of paper, *i.e.* Research article, Short manuscript or Invited review.
 - Postal address of the corresponding author, which includes: telephone, fax and e-mail. Corresponding author should be highlighted with an asterisk (*) mark.
 - Manuscripts should be submitted in triplicate, printed in one side only, letter or A4 size paper, double-spaced, with margins of 3 cm.
 - A disk copy of the manuscript in WinWord 6.0 or higher, should also be provided. Figures and tables should be sent in Excel or WinWord 97, each saved in a different file.
 - For Research articles, manuscript length should be between 10 and 30 pages, plus figures and tables. Short manuscripts should be shorter than 10 pages, plus figures and tables.

- Figures and tables should be mentioned in the text, and numbered in arabic numbers. The software in which they were created should be mentioned.
- Figure and table legends should be concise and understandable, and should be listed at the end of the manuscript (after references).
- Bibliographic references should be quoted in the text by writing the last name of the first author and publication year between parenthesis. References will be included at the end of the text, ordered alphabetically.
- In references for book titles, capital letters should be used only at the beginning of the title and on authors names.
- When using acronyms, the full meaning of them should be provided when mentioned for the first time.
- Bibliographic references should be formatted as follows:

Book references:

Author's last name, first name (year). *Book title.*
City: Editorial, total pages.

Ex:

Foucault, Michael (1984). *Las palabras y las cosas.* México: Siglo XXI, 200 pp.

Book section references:

Author's last name, first name (year). "Section title". En: Editor's name and last name (ed.). *Book title.* City: Editorial, pages.

Ex:

Levine, Frances (1991). "Economic Perspectives on the Comanchero Trade". En: Catherine A. Spielmann (ed.). *Farmers, Hunters and Colonists.* Tucson, AZ: The University of Arizona Press, 155-169.

Journal references:

Auhor's last name, first name's initials; other authors (year). "Article's title". *Journal abbreviation,* volume, pages.

Ex:

Sagara, Y., Fernández-Belda, F., De Meis, L. e Inesi, G. (1992). "Characterization of the Inhibition of Intracellular Ca²⁺ Transport ATPases by Thapsigargin". *J. Biol. Chem.,* 267, 12606-12613.

Rivas-Cáceres, R. (1999). "Médanos de Samalayuca. Un urgente reclamo, una estrategia emergente". *Ciencia en la Frontera,* 1, 29-32.

Normas de publicación para los autores

El Comité Editorial de la revista *Ciencia en la frontera: revista de ciencia y tecnología de la UACJ*, acoge con gusto propuestas de artículos para su publicación, bajo dos modalidades: artículos de investigación y artículos síntesis de investigación o Revisiones sobre tópicos de ciencia en general. Los manuscritos pueden estar derivados de tesis de pregrado o posgrado. Las normas establecidas para la publicación son las siguientes:

1. Los trabajos deberán ser de calidad científica e inéditos avalados por un investigador de carrera.
2. Una vez publicado el artículo, los derechos de autor pasan a la UACJ.
3. Los artículos pueden ser de investigación original, revisiones invitadas (actualizaciones en temas de investigación) o comunicaciones breves (avances de investigación), los cuales deberán referirse a las áreas de ciencias naturales y exactas, ajustándose al dictamen del Comité Editorial, el que evalúa su contenido científico de calidad y decide sobre la pertinencia de su publicación.
4. Los trabajos pueden ser enviados para su publicación en idioma inglés o español. Si se envía una traducción al español, hay que adjuntar el texto también en forma original. Los artículos deberán incluir resumen en español seguido de uno en inglés (y viceversa).
5. No se devuelven los originales.
6. En caso de que el autor no responda después de haberse presentado las correcciones o dudas de su trabajo, la revista *Ciencia en la frontera: revista de ciencia y tecnología de la UACJ*, se reserva el derecho de hacer los cambios de edición sin modificar el contenido original de la obra.
7. Los trabajos deben ajustarse a los siguientes requisitos (de no cumplirse con ellos, no se considerarán para su publicación):
 - Título del trabajo, breve y conciso en inglés y español.
 - Un resumen del contenido de una extensión aproximada de 40 palabras como mínimo y 150 palabras como máximo, que deberá estar en inglés y español.
 - Nombre de los autores. De la manera tal y como los autores desean que aparezca en la versión impresa.
 - Adscripción de todos los autores, incluyendo el máximo grado de estudios y área de especialización.
 - La institución de adscripción de los autores participantes deberá incluirse como un pie de página, comenzando con el número 1.
 - Ejemplo: Ramírez, J. L.¹ y Martínez, R.²
¹ Universidad de Puebla, México.
² Universidad de Santiago Compostela, España.
 - Naturaleza del trabajo: artículo de investigación, avance de investigación, etcétera.
 - Dirección para correspondencia que incluya: teléfono, fax y correo electrónico. El nombre del autor al cual se dirigirá la correspondencia debe indicarse con un asterisco (*) y la leyenda "Autor para correspondencia".
 - La extensión del trabajo deberá ser de un mínimo de 10 cuartillas de texto más las figuras, y de un máximo de 30 cuartillas más las figuras para un artículo de investigación. La extensión de los avances de investigación deberá ser de un máximo de 10 cuartillas de texto más las figuras.
 - Las ilustraciones, cuadros y fotografías deberán referirse dentro del texto, enumerándose en el orden que se citan en el mismo, e indicar el programa de cómputo en el que están elaborados.

- Los pies de figura deberán ser explícitos sin necesidad de leer el texto principal. Deberán incluirse en un listado después de la bibliografía.
- Las referencias bibliográficas deben asentarse de la forma convencionalmente establecida en español, indicando éstas en el cuerpo del texto con los apellidos del primer autor y año de publicación entre paréntesis, y los datos bibliográficos al final del escrito. La bibliografía se presenta al final del artículo por orden alfabético.
- Al citar los títulos de libro, se deben utilizar mayúsculas solo al inicio y en nombres propios.
- Al menos la primera vez, debe proporcionarse la equivalencia de las siglas empleadas en el texto, en la bibliografía y en los cuadros y las figuras.
- Distribuir los datos de las referencias bibliográficas de la siguiente manera:

Referencia de libro:

Apellido(s), nombre(s) del autor (año). *Título del libro.* Lugar: Editorial, número de páginas totales.

Ejemplo:

Foucault, Michael (1984). *Las palabras y las cosas.* México: Siglo XXI, 30-45.

Referencia de capítulo de libro:

Apellido(s), nombre(s) del autor (año). “*Título del capítulo*”. En: Nombre(s) y apellido(s) del editor (ed.). *Título del libro.* Lugar: Editorial, páginas.

Ejemplo:

Levine, Frances (1991). “*Economic Perspectives on the Comanchero Trade*”. En: Catherine A. Spielmann (ed.). *Farmers, Hunters and Colonists.* Tucson, AZ: The University of Arizona Press, 155-169.

Referencia de revista:

Apellido(s) del autor, inicial(es); otros autores (año). “*Título del artículo*”. *Nombre de la revista,* abreviado según el Index Medicus journal abbreviations: <http://www.nlm.nih.gov/tsd/serials/lji.html>, volumen, páginas.

Ejemplos:

Sagara, Y., Fernández-Belda, F., De Meis, L. e Inesi, G. (1992). “Characterization of the Inhibition of Intracellular Ca²⁺ Transport ATPases by Thapsigargin”. *J. Biol. Chem.*, 267, 12606-12613.

Rivas-Cáceres, R. (1999). “Médanos de Samalayuca. Un urgente reclamo, una estrategia emergente”. *Ciencia en la Frontera*, 1, 29-32.

SOBRE LA REMISIÓN DE ARTÍCULO Y EL PROCESO EDITORIAL

Remitir el original por correo electrónico a:

ciencia.frontera@uacj.mx
con atención al Comité Editorial

Indicar los nombres y datos de contacto de 2 revisores que se sugieran para dictaminar el artículo.

Los datos de contacto son:

Nombre completo del revisor.
Adscripción: institución, dependencia, departamento, grupo de trabajo.
Correo electrónico.
Números de teléfono y fax.
Dirección con código postal.

- El Comité Editorial acusará recibo del trabajo mediante correo electrónico. No se extienden oficios por la recepción del manuscrito. La recepción del manuscrito no garantiza su publicación.
- Posteriormente a un tiempo de dictamen de un mes máximo, el Comité Editorial remite, vía correo electrónico, el trabajo a sus autores, para que realicen las modificaciones que hubiera con base en las acotaciones de los dictaminadores.
- Los autores remitirán la segunda versión del ma-

nuscrito en un plazo máximo de 2 semanas y el Comité Editorial acusa recibo mediante correo electrónico. En caso de no recibir la versión corregida en este plazo, el Comité se reserva el derecho de descartar la publicación y su posterior remisión se considerará como un nuevo proceso.

- No se emitirán oficios por la recepción de los trabajos corregidos.
- Posteriormente a la recepción del artículo en su versión definitiva, el Comité Editorial emite un acuse de recibo por correo electrónico y anunciará el proceso de revisión de galeras y publicación. Durante éste, el Comité Editorial trabaja en conjunto con la Subdirección de Publicaciones de la UACJ.
- No se emiten oficios por cada artículo aceptado para publicación.
- Cada fascículo se incluye en la página de publicaciones periódicas de la UACJ, bajo la dirección:

<http://www.uacj.mx/difusion/publicaciones/Paginas/cienciasdelafrontera.aspx>

- La versión impresa de cada fascículo, se procesa por la Subdirección de Publicaciones. Se obsequia un ejemplar por artículo como regalías.

