

PERSPECTIVAS DE INVESTIGACIÓN EN GENÉTICA Y AMBIENTE



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE TLAXCALA
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y POSGRADO



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE TLAXCALA

Dr. Serafín Ortiz Ortiz
Rector

M.A. Víctor Job Paredes Cuahquentzi
Secretario Académico

Mtra. Dora Juárez Ortiz
Secretaria de Investigación Científica y Posgrado

Mtro. Efraín Ortiz Linares
Secretario de Extensión Universitaria y Difusión Cultural

M. en C. Sergio Eduardo Algarra Cerezo
Secretario Técnico

Mtro. Felipe Hernández Hernández
Secretario Administrativo

Dr. Alfredo Adán Pimentel
Coordinador de la División de Ciencias Biológicas

Dra. Madaí Angélica Gómez Camarillo
Coordinadora del Centro de Investigación en Genética y Ambiente

PERSPECTIVAS DE INVESTIGACIÓN EN GENÉTICA Y AMBIENTE

Compiladoras:

**Elizabeth García Gallegos
Edelmira García Nieto
Madaí Angélica Gómez Camarillo**



© 2010 Centro de Investigación en Genética y Ambiente
Universidad Autónoma de Tlaxcala
Av. Universidad No. 1
Col. La Loma Xicohténcatl
Tel/Fax 01(248) 155 00
Derechos reservados conforme a la ley
Primera edición
ISBN 978-607-7698-35-7
Impreso en México

Cuidado de la edición: Aracely Méndez Licona y Mario Alberto Hernández Cuapio
Diseño editorial: Centro de Investigación en Genética y Ambiente
Diseño de portada: Marypaz Hernández Vázquez
Primera edición: Agosto de 2010

Ejemplo de la manera correcta de citar cualquier capítulo de este libro:

Juárez-Santacruz, L. y Ortiz-Ortiz R. 2010. *Vicia faba*: un sistema biológico de prueba para el monitoreo de contaminantes ambientales. En: García, GE, García, NE, y Gómez, CMA. (Comps.) *Perspectivas de Investigación en Genética y Ambiente*. Universidad Autónoma de Tlaxcala, México. p. 99-111.

CONTENIDO

	Página
Prefacio	8
Agradecimientos	10
Presentación	12
<i>Madaí Angélica Gómez Camarillo</i>	
Capítulo 1.....	17
Genética forestal y ambiente	
<i>Oscar G. Vázquez Cuecuecha y Eunise Marina Zamora Campos</i>	
Capítulo 2.....	33
Contaminación del suelo	
<i>Elizabeth García Gallegos</i>	
Capítulo 3.....	47
Tratamiento aerobio asistido de las aguas residuales	
<i>José Mariano R. Montiel González</i>	
Capítulo 4.....	67
Contaminación atmosférica: causas y efectos	
<i>Emma Socorro Soto Mora</i>	
Capítulo 5.....	81
Toxicología ambiental	
<i>Edelmira García Nieto y Elvia Ortiz Ortiz</i>	
Capítulo 6.....	99
Vicia faba: un sistema biológico de prueba para el monitoreo de contaminantes ambientales	
<i>Libertad Juárez Santacruz y Rosalba Ortiz Ortiz</i>	
Capítulo 7.....	113
Genotoxicidad y cáncer	
<i>Raquel Ortiz Marttelo</i>	

PREFACIO

En el marco de la creciente industrialización del estado de Tlaxcala observada en la actualidad, el aumento del uso de agroquímicos, la utilización de tecnologías obsoletas, la destrucción de los bosques, el envenenamiento de nuestros ríos, la contaminación de las aguas subterráneas, y un largo etcétera, surge este libro con fines académicos y el afán de dejar constancia de los efectos de la contaminación sobre los ecosistemas. Consiste en una serie de lecturas a nivel de introducción que explican e ilustran temas que todo estudiante debe saber, en particular los de las ciencias biológicas y ambientales. Nace con el propósito de incrementar el interés del estudiante por temas considerados como fundamentales en su formación, mediante la descripción de las líneas de investigación que se desarrollan en el Centro de Investigación en Genética y Ambiente (CIGyA).

Los autores abordan temas que desde el punto de vista de su especialidad son los más importantes, no sólo de nuestro Estado, sino de la región, el país y el mundo, tales como el efecto de los contaminantes ambientales en el equilibrio ecológico; la relación entre sustancias químicas y daño al genoma; la contaminación atmosférica, del agua y el suelo; la deforestación, y otros. En la preparación de estas lecturas se ha buscado que el estudiante conozca de viva voz, puntos de vista y las experiencias de connotados científicos dedicados al estudio de los temas incluidos.

El objetivo fundamental de los autores es estimular a los estudiantes de licenciatura de biología, ciencias ambientales, química e ingeniería ambiental a adentrarse en alguno de los temas analizados, para que posteriormente realicen estudios de posgrado en el área de la genética y el ambiente, la cual adquiere cada vez más importancia, pues nos ha tocado vivir los años del desorden y la catástrofe más destructivos del ser humano. La generación de conocimiento nuevo y el avance científico de nuestro estado contribuirán a paliar la violencia de la degradación del ambiente, que observamos a nuestro alrededor y en todo el mundo.

El propósito final es contribuir a la creación de una cultura de cuidado del medio ambiente entre el mayor número posible de personas, entendiendo por cultura un sistema de valores, creencias y actitudes que determina en gran medida la forma en que cada persona piensa, cree y actúa. La sociedad occidental vive de espaldas a la naturaleza, en el siglo anterior y el actual nos hemos dedicado a destruir el planeta con una saña suicida, y estamos comenzando a sufrir las consecuencias. En una cultura de cuidado del ambiente debemos dejar de considerarnos como los dueños absolutos de todos los seres vivos y las cosas materiales que nos rodean, en cierta manera sólo somos sus administradores, que si bien tenemos el derecho a usarlos, no tenemos el derecho a destruirlos, y en todo momento tenemos la obligación de tratarlos con respeto y más si se trata de seres tan útiles como los animales y las plantas, los microorganismos y otras formas de vida.

Mario Alberto Hernández Cuapio
Colaborador editorial

AGRADECIMIENTOS

Esta sección es parte obligada de cualquier libro que se precie, pues el agradecimiento es la respuesta que se da a personas e instituciones de las cuales se ha recibido un bien en el pasado, y un libro que carezca de un apartado destinado a tal fin implicaría presunción y autosuficiencia.

Estas líneas son de agradecimiento hacia aquellas personas e instituciones que han influido de manera muy importante en la forma y en el fondo de este libro. A veces incluso sin saberlo.

Es por ello que expresamos un amplio reconocimiento al apoyo recibido de las autoridades de la Universidad Autónoma de Tlaxcala, a través de la Secretaría de Investigación Científica y Posgrado. Asimismo, a nuestros estudiantes que con sus inquietudes nos motivaron a exponer las actividades científicas que se realizan en el CI-GyA, con el fin de que les sirva de base para elegir en el futuro un área de especialización.

En particular queremos manifestar nuestro agradecimiento al Biól. Mario Alberto Hernández Cuapio por su labor de apoyo editorial. No podemos dejar pasar la oportunidad para brindar nuestro más sincero agradecimiento a la Coordinación del Centro de Investigación en Genética y Ambiente por su incondicional apoyo para la culminación de este libro.

Sobre todo, te agradecemos a ti, lector, por tu interés en el contenido de este libro, esperamos que estimule aún más tu inclinación por este campo de la ciencia.

Los autores

PRESENTACIÓN

El Centro de Investigación en Genética y Ambiente (CIGyA) de la Universidad Autónoma de Tlaxcala se fundó en febrero del año 1992 con el propósito de que sus actividades contribuyeran a fortalecer las tareas académicas y de investigación de los profesores y estudiantes del entonces Departamento de Agrobiología (en la actualidad Facultad de Agrobiología).

En sus inicios se emprendieron proyectos de investigación en las áreas de **toxicología ambiental** y genética forestal, en virtud de tratarse de campos en los cuales se estimularía la conformación de grupos de trabajo que se dedicaran a estudiar el impacto de las actividades antropógenas sobre los recursos naturales.

Actualmente las investigaciones que se realizan están dirigidas a: i) al diagnóstico y evaluación de la contaminación ambiental, ii) evaluación biológica en diversos organismos mediante biomarcadores de exposición y efecto, particularmente **mutagenicidad** y **genotoxicidad**, iii) divulgación de estrategias para eliminar y/o reducir la exposición a contaminantes ambientales, aplicando prácticas de educación ambiental y técnicas de remediación y rehabilitación y iv) la aplicación del mejoramiento genético forestal. De esta manera, el CIGyA se ha convertido en un elemento estratégico de vinculación de la UAT con otras instituciones de investigación, órganos gubernamentales y la sociedad.

ACTIVIDADES

Algunos efectos en la salud humana son iniciados, mantenidos, o exacerbados por factores ambientales. Según la Organización Mundial de la Salud, 24% de la **morbilidad** y 23% de la mortalidad en el mundo son atribuibles a aquéllos. Por otra parte, el Plan Nacional de Salud 2001-2006 estima que 35% de la **carga de enfermedad** total, tiene sus orígenes en los factores ambientales y 15% en las exposiciones ocupacionales. Es importante señalar que muchos de los efectos de la contaminación ambiental se manifiestan en el mediano y/o largo plazo y permanecen imperceptibles durante un tiempo prolongado, lo que impide la detección oportuna y la percepción de la verdadera dimensión del problema.

La relación tan estrecha entre la calidad de vida y la calidad del ambiente entraña una amplia gama de interacciones, las cuales forzosamente requieren la colaboración de diversas disciplinas para entenderlas. Es aquí donde intervienen la **toxicología ambiental** y la **genética toxicológica**, disciplinas que en conjunto analizan: i) los mecanismos de toxicidad de las sustancias químicas sintéticas o naturales encontradas en el ambiente (aire, agua, suelo, sedimento, alimentos, etc.), como **plaguicidas**, metales pesados y **compuestos o contaminantes orgánicos persistentes (COPs)**, ii) la interacción de dichas sustancias con el material genético, lo cual provoca alteraciones que deterioran la salud humana y podrían ser las etapas iniciales de la aparición de algunas enfermedades, entre ellas el **cáncer**.

Con ayuda de diversos sistemas biológicos de prueba y de varios **biomarcadores** de exposición y efecto, es posible analizar la vulnerabilidad de los organismos vegetales y animales —incluidos los seres humanos— expuestos a contaminantes ambientales. Lo anterior con el propósito de determinar el riesgo para la salud humana y los efec-

tos sobre los seres vivos haciendo hincapié en los daños causados al material genético, y de esta manera explicar los mecanismos de **genotoxicidad**.

Los sistemas biológicos de prueba establecidos en el CIGyA son:

- *Salmonella typhimurium*.
- Células meristemáticas de la raíz de *Vicia faba* (haba).
- Alas de *Drosophila melanogaster*.
- *Daphnia magna*.
- Linfocitos humanos en cultivo.
- Eritrocitos de fauna silvestre
- Semillas de plantas vasculares

Los biomarcadores de daño utilizados son:

- Determinación del daño y la reparación del ADN mediante la electroforesis alcalina de células individuales en humanos, fauna silvestre y *V. faba*.
- Intercambios de cromátidas hermanas en linfocitos humanos y *V. faba*.
- Índice mitótico en linfocitos humanos y *V. faba*.
- Cinética de proliferación celular en linfocitos humanos y *V. faba*.
- Micronúcleos en linfocitos humanos, fauna silvestre y *V. faba*.
- Revertantes de *Salmonella typhimurium*.
- Porcentaje de letalidad en plántulas y *Daphnia magna*.
- Número de mutaciones en alas de *Drosophila melanogaster* (Prueba SMART).

Con el objetivo de ampliar la batería de pruebas para evaluar la genotoxicidad, actualmente se ha implementado el ensayo de micronúcleos. Asimismo, a causa de la variedad de daños que provocan los contaminantes ambientales, se busca incrementar el número de biomarcadores de efecto utilizados; se ha empezado con la determinación de actividades enzimáticas.

Los anteriores sistemas de prueba y biomarcadores se han aplicado en los estudios realizados en el CIGyA, mediante estos ha sido posible determinar los daños causados por plaguicidas, **hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs)** y metales pesados de muestras ambientales complejas de diversos escenarios de la región.

El área de ecología forestal inició sus actividades en el año 2005, con el objetivo de estudiar las especies forestales de importancia económica del estado de Tlaxcala, para ello se estableció la línea de investigación "Estudio y manejo de ecosistemas forestales". A la fecha se realizan estudios con *Pinus oaxacana*, *P. cembroides*, *P. ayacahuite*, *P. montezumae*. Estos proyectos tienen el propósito de establecer fuentes de semilla locales (**rodales**, áreas y huertos semilleros), para abastecer los mercados de **germoplasma** que satisfagan las demandas de reforestación y plantaciones comerciales forestales de Tlaxcala y la región, ofreciendo un espacio de vinculación entre la Universidad y la sociedad.

MISIÓN DEL CIGyA

El Centro de Investigación en Genética y Ambiente realiza investigación científica básica y aplicada, forma recursos humanos de alta calidad, atiende las demandas de los sectores público y privado con impacto a nivel regional, nacional e internacional.

VISIÓN DEL CIGyA

Ser un Centro de Investigación reconocido en el estudio y manejo de recursos naturales, en evaluación de riesgo por exposición a contaminantes ambientales y su impacto en diversos organismos, con énfasis en el daño al ADN.

OBJETIVOS

- Ejecutar proyectos de investigación básica y aplicada, que generen conocimientos para el mejoramiento de la calidad ambiental y la conservación de los recursos naturales.
- Contribuir a la formación de recursos humanos capaces de proponer soluciones a los problemas ambientales de la región y lograr el desarrollo sustentable.
- Formar una conciencia ambiental, mediante la puesta en práctica de estrategias de educación y capacitación, que contribuyan a educar para la vida.

ESTRATEGIAS

- Establecer y fortalecer vínculos con instituciones de educación superior, centros de investigación y otras organizaciones relacionadas con las áreas de investigación del CIGyA.
- Promover y fortalecer la formación de académicos del Centro de Investigación y contribuir a la formación de recursos humanos a través de tutorías académicas, asesoría de tesis, servicio social, prácticas profesionales, etc.
- Convertirse en un espacio al servicio de la sociedad para la formación y difusión de la cultura ambiental.

Madaí Angélica Gómez Camarillo
Coordinadora General del CIGyA

GENÉTICA FORESTAL Y AMBIENTE

Oscar G. Vázquez Cuecuecha
Eunise Marina Zamora Campos
Laboratorio de Ecología Forestal

INTRODUCCIÓN

Basándose en la diversidad o número de especies como indicador para comparar la **diversidad biológica** o **biodiversidad** entre los distintos países, a México se le considera como uno de los 17 países **megadiversos** del mundo. Con todo, hablar de la biodiversidad no es sólo referirse a la riqueza de especies. El término biodiversidad se entiende como una entidad formada por tres conceptos fundamentales: i) la diversidad genética, ii) la diversidad de especies, y iii) la diversidad ecológica.

- La *diversidad genética* está formada por la variabilidad de la información genética que tienen los organismos de una misma especie.
- La *diversidad de especies* es la variabilidad de especies que existen en nuestro planeta.
- La *diversidad ecológica* significa la multitud de **medioambientes** donde las especies se establecen formando comunidades y ecosistemas.

En otras palabras, la biodiversidad abarca tres niveles de expresión: i) ge-

nes, ii) especies y iii) ecosistemas. Esta diversidad se expresa en el cambio en la riqueza de especies de una región a otra, el número de **especies endémicas**, subespecies y variedades o razas de una misma especie; el número de especies; y los diferentes tipos de ecosistemas.

En México se reconocen diferentes zonas ecológicas, cuyos componentes bióticos y abióticos es importante determinar para su mejor utilización y conservación. Toledo y Ordoñez clasifican a las comunidades naturales mexicanas, con excepción de las acuáticas, de la siguiente manera: i) tropical húmeda, ii) tropical subhúmeda, iii) templada húmeda, iv) templada subhúmeda y v) árida y semiárida. Ciertas características de estas zonas las hacen únicas para la existencia de algunas especies consideradas como endémicas.

En cuanto a la diversidad vegetal con que cuenta la República Mexicana, destacan los **árboles** del grupo taxonómico de las gimnospermas conocidos comúnmente como **coníferas**, término que alude a la forma cónica de la copa de la mayor parte de los árboles que

constituyen este grupo. La familia Pinaceae, representada por los pinos, constituye la más importante de las coníferas. De las 110 especies de pinos que existen en el mundo, alrededor de 40% se encuentran en el país. Tan sólo en el estado de Tlaxcala se ha señalado la existencia de los siguientes géneros y especies de coníferas: *Cupressus lusitánica*, *Juniperus blancoi*, *J. deppeana*, *J. monticola*, *Abies religiosa*, *Pinus hartwegii*, *P. cembroides*, *P. ayacahuite*, *P. montezumae*, *P. pseudostrobus*, *P. patula*, *P. teocote*, *P. rudis*, *P. oaxacana*, *P. leiophylla*, *Pseudotsuga menziesii* y *Taxodium mucronatum*, una gran diversidad para un estado tan pequeño.

Por otra parte, con respecto a las **latifoliadas** —todos los árboles clasificados desde el punto de vista botánico como angiospermas—, destacan las especies del género *Quercus* o encinos, cuyas comunidades en México ocupan 5.18% de la cubierta vegetal, es decir 100 588 km². Este tipo de vegetación ocupa la mayor parte de la cubierta vegetal en áreas de clima templado y semihúmedo. También se le encuentra en climas tropicales, lo cual indica que estos encinares se han desplazado de zonas templadas hacia las zonas bajas de la planicie costera.

Por lo anterior, México es reconocido por su gran diversidad de especies forestales, pero muchas han sido y continúan siendo desplazadas de sus **sitios**,

se encuentran **amenazadas**, o están **en peligro de extinción**, por lo cual aquellas que están en peligro deben ser protegidas mediante **conservación in situ**, **ex situ**, o ambas, antes de que se pierdan definitivamente algunas poblaciones. En el pasado, la mayor parte de los bosques se eliminaron para dedicar las tierras a la agricultura como resultado de la necesidad de alimentar a una población en expansión. Los bosques que no se convirtieron en tierras agrícolas, se cortaron quizá de una, hasta seis veces. Primero se eliminaron las especies de mayor valor, es decir las coníferas —también conocidas como árboles de madera suave— más altas y con troncos grandes, para postes y madera de construcción, y los mejores árboles de especies latifoliadas —o árboles de madera dura— para la fabricación de muebles. Cada generación derribó los árboles mejor formados y dejaron los enfermos, torcidos y de lento crecimiento. Los bosques experimentaron degradación en forma progresiva, menos de 0.0025% de los bosques primarios quedaron en pie.

De igual manera, es importante considerar lo que está pasando en la actualidad en México; entre los años 1990 y 2000 la **deforestación** fue de 348 000 ha, aunque entre 2000 y 2005 disminuyó a 234 000 ha. En un esfuerzo por paliar la situación, se han llevado a cabo programas de **reforestación** y establecimiento de **plantaciones**, y se busca

instituir una alianza entre la sociedad y el gobierno para enfrentar el grave deterioro de los recursos forestales e hídricos, los cuales constituyen un binomio vital para la seguridad nacional. Dentro de los programas de reforestación han sido plantados 100 mil millones de árboles, cuyo porcentaje de supervivencia ha aumentado de 10 a 58%.

Es indudable que lo realizado hasta ahora para volver a establecer sitios o rehabilitar los dañados por las actividades del pasado es positivo, pero también es muy importante y urgente considerar la parte de la **diversidad genética**, es decir la variedad en los diferentes tipos de genes en una especie o población, ya que es el punto central de la conservación. Los recursos genéticos de los bosques son la base del cultivo y la explotación de las plantaciones forestales en la mayor parte del mundo. La capacidad de detener o revertir los efectos perjudiciales causados a los bosques, al igual que lograr la conservación de los recursos forestales en todas las categorías de diversidad, requiere un conocimiento detallado de cómo interacciona la fase genética con el ambiente en individuos, poblaciones, comunidades y ecosistemas forestales.

EL AMBIENTE

La capa del planeta donde se lleva a cabo la vida, incluyendo el conjunto de todos los organismos y el medio físico

donde se desarrollan e interactúan, constituye la **biosfera**. La hidrosfera, atmósfera y **pedosfera** constituyen el ambiente en el cual crecen las plantas, y por ende los árboles. También forman parte de este espacio los factores físicos y químicos del **hábitat** y las influencias ejercidas por otros organismos en éste, ya sean favorables o desfavorables para la supervivencia y el éxito de la vegetación. De lo anterior se desprende que el ambiente es la totalidad de las condiciones externas que actúan sobre un organismo o una comunidad en un **biotopo**.

El ambiente inmediato a las plantas es la **fitosfera**, la cual es el área en que la planta lleva a cabo su ciclo de vida bajo la influencia de condiciones específicas impuestas por el hábitat y es también el escenario de todos los procesos morfogénéticos implicados en la **adaptación**.

La **rizosfera**, o zona de interacción de las raíces de la planta y los microorganismos del suelo, representa un compartimento ecológico especial dentro de la fitosfera. Dentro de este ambiente orgánico e inorgánico, la vegetación en turno influye en su alrededor.

En el desarrollo de la mayoría de los vegetales influye considerablemente el entorno debido a que estos organismos no pueden desplazarse, en consecuencia las plantas se adaptan al medio que les corresponde modificando el curso de su desarrollo.

LA GENÉTICA FORESTAL

En un mundo que posee millones de diversas formas de vida, los árboles son los seres vivos más grandes y uno de los más complejos. No obstante, a pesar de la vasta diversidad que existe en la naturaleza, los mecanismos básicos de la herencia son comunes a todas las especies, incluyendo los árboles forestales.

Al igual que todos los organismos, los árboles están compuestos de células. Existen numerosos tipos de árboles, pero todas las células vegetales vivas tienen en común una pared celular, un citoplasma y un núcleo. Desde el punto de vista genético, el núcleo es de especial interés ya que contiene a los cromosomas, los cuales albergan la información genética necesaria para el crecimiento y desarrollo del árbol. El número de cromosomas es por lo general constante en cualquier **célula somática** de un organismo, en todas las poblaciones de una especie y, en la mayoría de los casos, en cualquier individuo de una especie.

Desde el punto de vista químico los cromosomas están compuestos de ácido desoxirribonucleico (ADN) y una cubierta de proteínas. Los genes, las unidades funcionales de la herencia, están arreglados en una serie lineal a lo largo de la molécula de ADN de cada cromosoma.

Los árboles, al igual que el resto de los organismos vivos, tienen la capacidad de heredar a su prole las ca-

racterísticas genéticas que poseen. Los valores de **heredabilidad** expresan la proporción de la variación en la población atribuible a diferencias genéticas en los individuos. Por lo tanto, la heredabilidad es una proporción que indica el grado en que los progenitores transmiten sus características a su descendencia.

Sistemas genéticos

Los árboles crecen y se reproducen por extensión y división celulares. Por otra parte, las especies, o grupos de especies, poseen métodos particulares de reproducción, modos característicos de variación y heredabilidad, que se denominan **sistema genético**. Este incluye el sistema reproductivo, el sistema de apareamiento, los factores cromosómicos y el tamaño de la población.

Sistema de reproducción

Las plantas poseen diversos mecanismos de **reproducción** —es decir, la formación de nuevos individuos— para sobrevivir y para maximizar su adaptación al medio donde se desarrollan.

Modo de reproducción

- Sexual. En esta forma de reproducción el nuevo individuo se origina a expensas de dos células reproductoras especializadas que se producen en los órganos sexuales de la planta. El proceso entraña **polinización**, fertilización y producción de semillas.

Cuando la reproducción ocurre a través del ciclo sexual normal, cada individuo comienza como un **cigoto** unicelular. Éste se forma durante el proceso de la **fecundación** por la unión de dos células reproductoras (gametos), cada una de las cuales tiene sólo la mitad del número usual de cromosomas de las células somáticas. Uno de los gametos es un óvulo proveniente del progenitor femenino y otro es un espermatozoide aportado por el progenitor masculino. El cigoto tiene dos juegos o series de cromosomas arreglados en pares (por lo que se dice que el cigoto es **diploide** o $2n$), pues cada gameto aporta un juego de cromosomas (por esta razón se dice que los gametos son **haploides** o $1n$). Cada miembro de un par de cromosomas del cigoto lleva los genes que determinan la misma función, por lo que se les denomina **cromosomas homólogos**. En consecuencia, cada **locus** del gen está representado dos veces en el cigoto, una vez en el cromosoma de uno de los progenitores y otra en el cromosoma homólogo del otro progenitor.

- Asexual. En la reproducción asexual —también conocida como reproducción vegetativa— no hay producción de células reproductoras especializadas ni de órganos sexuales, y se lleva a cabo por acodos, brotes o retoños y vástagos de raíces. El crecimiento ve-

getativo de un árbol ocurre a lo largo de todo su ciclo de vida. Un árbol contiene miles de millones de células, cada una de las cuales desciende directamente del cigoto formado durante la fecundación y lleva la misma información genética. Las células somáticas se dividen por mitosis. A medida que los árboles crecen y maduran, se forman numerosos tipos de células, cada uno con una función y forma especiales, pero la información genética contenida en el núcleo de cada célula es idéntica a la de la célula original. Las plantas son capaces de crecer gracias a los grupos celulares (**meristemos**) que conservan indefinidamente la capacidad para dividirse como células madre autorrenovables, por lo que es a partir de las zonas meristémicas de las plantas que puede originarse un organismo completo con las mismas características de la planta de la cual proviene (**clon**).

Distribución y aspectos fenológicos de los órganos reproductores

La **fenología** se define como el estudio de los procesos que se producen de un modo cíclico en la vegetación; por ejemplo, la floración, la polinización, etc. El conocimiento de la fecha, duración e intensidad de estos acontecimientos proporciona información valiosa acerca de los posibles efectos de las fluctuaciones y los cambios climáticos sobre los árbo-

les, así como también para explicar el estado actual de la vegetación. Algunos de los fenómenos que la fenología forestal observa y registra de manera sistemática, para obtener información complementaria sobre el desarrollo y el estado de la vegetación, son:

- **Monoicidad:** cada árbol individual produce tanto estructuras reproductoras femeninas como masculinas.
- **Dioicidad:** producción de estructuras femeninas y masculinas en individuos separados.
- **Arreglo sexual:** con flores en grupos pistilados (♀) o estaminados (♂), o en flores perfectas (♀ y ♂).
- **Dicogamia:** diferentes momentos de receptividad y liberación de polen para evitar la autopolinización.
- **Hercogamia:** concentración de estructuras femeninas y masculinas en diferentes partes de la copa para permitir la autopolinización.

Vectores de polinización

La polinización de las plantas consiste en el transporte del polen desde la antera hasta el estigma en las gimnospermas, o hasta la abertura **micropilar** en las angiospermas, a fin de realizar la fecundación. Si el transporte se realiza por el viento, se denomina **polinización anemógama** o **anemófila**; si los transportadores son animales, **polinización zoógama**. De ordinario la mayoría de las

angiospermas presentan **polinización cruzada**, pero la **autopolinización** no es rara. La primera tiene la ventaja de producir nuevas y diferentes combinaciones de los genes existentes, pero la autopolinización es un método más seguro no sujeto a los azares de los vientos o a los insectos voladores.

Los insectos son los agentes más comunes de la polinización cruzada, y regularmente se especializan en especies individuales (en particular en los bosques tropicales), con lo cual se realiza de un modo eficiente la polinización y se facilita la recombinación genética.

Dispersión de la semilla

Los animales, las corrientes de agua, y el viento contribuyen a la dispersión de las semillas; asimismo, los rasgos morfológicos especiales (alas, sustancias grasas, etc.) ayudan en la dispersión y la protección de las semillas contra el frío y el agua. La alta dispersión de las semillas incrementa la recombinación genética.

Sistema de apareamiento

Este sistema es el patrón que los gametos siguen al unirse para transferir genes de una generación a otra. Los dos sistemas de apareamiento son el preferencial y el aleatorio o al azar.

Cualquier apareamiento que no ocurra al azar por razones de proximidad, se puede decir que es preferencial. El apareamiento preferencial es positivo

—se conoce también como homogamia— si se elige un fenotipo igual o similar al propio, y negativo —conocido también como heterogamia— si se elige un fenotipo diferente al propio. Cuando el apareamiento preferencial es positivo y se elige como pareja un **fenotipo** similar al propio, hay un cierto grado de endogamia ya que los individuos con fenotipo similar también cuentan con un **genotipo** parecido. El resultado principal es el mismo que en el caso de la endogamia: un aumento de la **homocigosis** y un descenso de los heterocigotos. Sin embargo, hay una diferencia muy importante, y es que en el caso de la endogamia todos los genes son afectados por el proceso de consanguinidad, en tanto que en el apareamiento preferencial sólo resultan afectados directamente los genes implicados en el fenotipo objeto de la elección, es decir, en el carácter que se elige. La polinización de las plantas alógamas —o de polinización cruzada— ofrece casos frecuentes de apareamiento preferencial; por ejemplo, si el tiempo de floración es corto y hay diferencias en el momento de inicio de ésta, las plantas de floración temprana serán polinizadas por plantas también tempranas, y las tardías por otras tardías. En este ejemplo, el tiempo de inicio de la floración es el carácter que da origen al apareamiento preferencial.

Las especies que presentan un sistema de apareamiento preferencial

toleran incluso la modalidad más cercana de éste llamada **endogamia**. Ésta resulta en una **homocigosis** que no es perjudicial pues los genes deletéreos recesivos han sido eliminados. Este sistema se encuentra en muchas especies agrícolas, pero no se ha encontrado en los árboles forestales de las zonas boreales y templadas. Aunque algunas especies, como *Pinus resinosa*, *P. torreyana*, *Sequoia sempervirens* y *Picea omorika*, experimentan menos **depresión por endogamia** que muchas otras especies, no cuentan con un sistema de apareamiento preferencial verdadero. Por otra parte, las especies tropicales presentan distintos grados de endogamia ya que se autopolinizan o se cruzan con individuos del mismo género, como *Leucaena leucocephala*.

El segundo sistema —el aleatorio o al azar— es típico de la mayoría de las especies forestales y de un modo general la polinización es efectuada por el viento (anemógama) y existe mucha variación genética dentro de las poblaciones; sin embargo, se hallan presentes genes recesivos, por lo que si llega presentarse la endogamia hay producción de semilla vana, pérdida de vigor, así como mortalidad. Sin embargo, el sistema de apareamiento al azar no es una constante, este mecanismo integra características específicas de cada especie como una entidad dinámica variando en el tiempo y el espacio, y es afectado por

el grado de autocompatibilidad, la densidad de la población, los procesos fenológicos y el clima.

Factores cromosómicos

Las diferencias en el número de cromosomas se observan fundamentalmente entre las gimnospermas y las angiospermas. Las gimnospermas tienen generalmente el mismo número de cromosomas en todas las especies de un género e incluso en algunos géneros de la misma familia, pero los géneros de las angiospermas regularmente consisten en especies o poblaciones diferenciadas por **poliploidia**. Por ejemplo, el género *Betula*, de ordinario tiene un número haploide de cromosomas somáticos de 14; sin embargo, este número en *B. papyrifera*, una especie transcontinental de Norteamérica —es decir que crece entre el Este y el Oeste de esta región continental—, podría ser de 56, 70 y 84, en tanto que en *B. populifolia* del Este es de 28. El número de cromosomas en las especies arbóreas es alto, lo que sugiere un alto índice de recombinación genética.

Tamaño de la población

Este parámetro influye también en el sistema genético. Una población pequeña almacena menos variación genética que una grande, en particular la variación causada por diferencias en genes raros. Si la población se fragmenta en varias subpoblaciones aisladas, la deriva gené-

tica y la endogamia comenzarán a manifestarse. Habrá pérdida de algunos alelos y mayor uniformidad dentro de las subpoblaciones. En contraste, las grandes poblaciones contienen mayor variabilidad genética. Se distribuyen sobre grandes extensiones en que el ambiente cambia gradualmente y tienden a presentar un sistema de recombinación abierto, en particular aquellas especies que presentan polinización anemófila o anemógama y amplia dispersión de sus semillas. Tales poblaciones presentan de un modo característico **variación clinal**, es decir sus caracteres morfológicos cambian gradualmente a lo largo de un **gradiente** geográfico; por ejemplo, altitudinal o latitudinal.

GENÉTICA FORESTAL Y AMBIENTE

Los árboles que se encuentran en una localidad difieren entre sí debido a la constitución genética y al ambiente, así como a la interacción entre ambos factores. La interacción árbol-ambiente puede expresarse como:

$$\text{Ambiente} + \text{Genotipo} = \text{Fenotipo}$$

Factores genéticos

Al igual que en otros organismos, el crecimiento y desarrollo de los árboles está controlado por la potencialidad genética que poseen, la cual se expresa en grado variable según las condiciones ambientales donde crecen. Es decir, la interacción

entre la herencia y el ambiente se realiza a través de procesos fisiológicos que controlan tanto el crecimiento como el desarrollo. Por ejemplo, si un híbrido crece mejor que sus progenitores en el mismo ambiente, se debe a que una nueva combinación de genes produjo un equilibrio de procesos fisiológicos más eficiente; si un árbol produce más goma que su vecino en el mismo ambiente, es probable que sea a causa de diferencias relacionadas con la constitución genética que determinan variantes estructurales o una mayor o menor eficiencia en los procesos fisiológicos implicados; o si una especie es más tolerante al frío, a la sequía, o al sombreado, se debe a que su constitución genética determina el desarrollo de estructuras o la adecuación de procesos fisiológicos a dichas condiciones ambientales.

En mayor detalle, el ambiente ejerce presiones sobre el organismo y el genotipo de éste. Es posible que como respuesta a lo anterior se acentúen determinados rasgos, o más específicamente, determinadas combinaciones genéticas se perpetúen con mayor frecuencia en una población creciendo en un ambiente dado, lo que resulta en la predominancia de un fenotipo particular.

Un fenotipo puede estar representado por un solo individuo —un árbol—, o una familia de árboles. Lo importante es hacer notar que aunque los árboles de una localidad tengan genotipos similares,

éstos variarán de acuerdo con el ambiente particular de la localidad. Además, las diferencias genotípicas son la regla más que la excepción, lo que hace que las diferencias fenotípicas sean más evidentes. Las características de los árboles, como la forma del tronco, el tamaño de las ramas, el ángulo de éstas y el ancho de la corona, evidentemente se encuentran bajo estricto control genético, de tal manera que los miembros de una familia serán similares en una amplia gama de ambientes. En tanto que las grandes diferencias morfológicas entre las especies son bastante evidentes, las variaciones genotípicas individuales son menos obvias y más difíciles de distinguir entre un grupo de árboles de la misma especie.

Las diferencias en las características morfológicas pueden ser explicadas por las variaciones en los genes individuales, o en un conjunto de genes. De este modo, la reproducción sexual provee el mecanismo mediante el cual se producen nuevas combinaciones de material genético. El hecho de que se aparezcan dos genes que afecten el carácter en **loci** homólogos (alelos) da como resultado una gran variedad de expresiones fenotípicas.

La adaptación de los individuos al ambiente ocurre como resultado de los árboles individuales y las razas dentro de las especies, los cuales son capaces de sobrevivir y reproducirse con mayor facilidad en un ambiente particular que los

tipos no adaptados; así los tipos genéticamente adaptados prevalecerán a la larga en una comunidad.

Los efectos genéticos de interés para el mejoramiento genético forestal son los relacionados con las diferentes combinaciones que influyen en los rasgos morfológicos, anatómicos y fisiológicos de los árboles. La modificación de estas características mejora la utilidad de los árboles como materia prima para la industria y su adaptabilidad al ambiente. Por consiguiente, es necesario examinar los factores y efectos de la hibridación, la **procedencia** —origen geográfico de la semilla o los árboles—, los patrones de la herencia y cómo influyen estos en los diferentes rasgos arbóreos.

Factores físicos

Los factores físicos ambientales varían a lo largo de un **gradiente** y presumiblemente producen la diferenciación genética de poblaciones dentro de las especies. Dichos factores incluyen luz, temperatura, agua, nutrientes, aire, fuego, hielo y nieve. Los últimos dos no han sido bien estudiados hasta el momento en relación a su influencia en la variación genética de los árboles a pesar de su gran importancia ecológica en ambientes extremos. Por otra parte, está claro que muchos factores están correlacionados e influyen en las poblaciones forestales al mismo tiempo; sin embargo, aquí se explican de un modo separado.

Temperatura

La temperatura afecta muchos procesos fisiológicos, incluyendo la germinación, el crecimiento, la reproducción y la supervivencia. Para completar todos los procesos, la planta que se está desarrollando en una estación del año requiere alcanzar cierta altura. La estación o temporada de crecimiento regularmente se basa en el número de días en que la temperatura media diaria aumenta en un valor entre 5.6°C y 10°C.

Basándose en este intervalo, la estación de crecimiento para muchas especies del Hemisferio Norte es de 2 a 5 meses. En latitudes más al norte, cerca de los límites de la distribución de los árboles, la temperatura no es lo bastante alta para que los árboles completen adecuadamente todos sus procesos; la meiosis se interrumpe, los órganos reproductores son dañados por las heladas tardías y las semillas no pueden alcanzar la madurez.

Luz

La luz no es únicamente una fuente de energía para la fotosíntesis sino que también actúa como una señal de los procesos hormonales que controlan el crecimiento y el desarrollo vegetal. Por ejemplo, la disminución del **fotoperiodo** en el otoño induce la senescencia y la **abscisión** de las hojas, la formación de yemas, la finalización del crecimiento y el proceso de lignificación.

Agua

Las plantas en crecimiento contienen alrededor de 90% de agua esencial para la fotosíntesis. Las diferencias entre procedencias —material vegetal procedente de un origen específico— en cuanto a requerimientos de agua están bien expresadas por *Pseudotsuga menziesii*, distribuido a lo largo de regiones de alta y baja precipitación anual. En la Columbia Británica, las procedencias costeras y del interior tienen hojas de diferentes colores, lo que ha resultado en el reconocimiento de diferentes subespecies. Por otra parte, existen grandes diferencias entre procedencias en lo que se refiere a crecimiento, tolerancia a las heladas y las enfermedades, etc.

Nutrientes

La diferenciación de procedencias en relación con los nutrientes es rara. Uno de los ejemplos compete a *Picea glauca*, la cual está adaptada a sitios graníticos y calizos. Las procedencias propias de sitios con **material parental** calizo crecen mucho mejor en sitios con alto contenido de calcio que aquellas originarias de sitios con material parental granítico, pero las procedencias propias de suelos graníticos superan a las procedencias de suelos calizos cuando crecen en sitios graníticos.

Fuego

Los incendios naturales son un factor

ambiental importante en las regiones subhúmedas continentales. Algunas especies nativas de América del Norte, incluyendo *Pinus banksiana* y *P. contorta*, están adaptadas al fuego y una parte de sus conos permanece cerrada hasta que se abren por el calor producido por un incendio forestal.

COMUNIDADES Y ECOSISTEMAS FORESTALES Y AMBIENTE

La influencia ejercida por el ambiente sobre el genoma forestal no es la única que ocurre ya que también se presenta el fenómeno inverso, esto es, las comunidades forestales afectan el medio ambiente en que se desarrollan. Estos efectos se manifiestan en la temperatura del aire y el suelo, el escurrimiento del agua, la capa de nieve y otros fenómenos relacionados con el flujo del agua.

Las comunidades y los ecosistemas forestales realizan una serie de funciones ambientales que afectan el entorno; por ejemplo, forman y conservan los suelos, se encargan de la absorción de CO₂, regulan el ciclo del agua, crean paisajes, o constituyen hábitats que permiten la conservación de la biodiversidad mediante el establecimiento de asociaciones de diferente tipo entre las distintas formas forestales y las plantas y los animales que viven en el bosque. Ya se ha explicado con anterioridad que México es un país megadiverso, por lo cual es importante la conservación de los recursos

forestales mediante el conocimiento de éstos como sistemas dinámicos. Asimismo, es importante reconocer los beneficios que brindan actualmente los ecosistemas forestales; los propietarios y usuarios de los bosques siempre han reconocido que éstos ofrecen una amplia variedad de beneficios ambientales, además de otros bienes como madera, fibras, plantas comestibles y medicinales y animales de caza.

Dentro de los servicios ambientales identificados y reconocidos —e incluso considerados como de seguridad nacional— que brindan los bosques, destacan: i) protección de cuencas hidrológicas, ii) servicios derivados de la biodiversidad, iii) captura de carbono, y iv) aportación de belleza escénica. A continuación se hace una breve descripción de estos cuatro tipos de servicios.

Servicios de protección de cuencas hidrológicas

Los beneficios obtenidos de la protección de las cuencas hidrológicas son:

- Regulación del ciclo hidrológico, es decir, mantenimiento del caudal durante la temporada de secas y control contra inundaciones.
- Conservación de la calidad del agua, esto es, la reducción al mínimo de la carga de sedimentos, nutrientes (por ejemplo, fósforo y nitrógeno) y sustancias químicas, así como una disminu-

ción de la salinidad.

- Control de la erosión del suelo y la sedimentación.
- Reducción de la salinidad del suelo y regulación de los niveles freáticos.
- Mantenimiento de los hábitats acuáticos, gracias a la reducción de la temperatura del agua mediante el sombreado de ríos o corrientes y a la aportación de restos adecuados de madera para hábitats de especies acuáticas.

Con lo anterior se pone de manifiesto la importancia de proteger las cuencas hidrológicas, lo cual —aunado al deterioro de los cuerpos de agua, como ríos, lagos y lagunas, observado en nuestra propia entidad— basta para reflexionar sobre el problema existente, que se acrecentará con el tiempo si no se toman medidas para detener el deterioro de este recurso mediante la participación de cada uno de nosotros como beneficiarios.

Biodiversidad

La biodiversidad, como ya se ha mencionado, comprende tres componentes: i) diversidad genética, ii) taxonómica o de especies, y iii) ecológica o de ecosistemas, y su importancia depende del sitio en que se encuentra. Uno de los beneficios derivados de la biodiversidad para los propietarios de los sitios es la venta de recursos no maderables, como hon-

gos, plantas medicinales y fauna silvestre, entre otros; el resto de los habitantes del mundo se beneficia de manera indirecta por medio de la adquisición de fármacos provenientes de la naturaleza o sintetizados por el ser humano imitando productos naturales. Una considerable cantidad de estos productos fue hallada siguiendo pistas dejadas hace mucho por pueblos que descubrieron las propiedades benéficas de plantas y animales. De ahí la importancia y el interés de conservar la vasta biblioteca génica que constituye la biodiversidad. Otro beneficio importante que supone la variabilidad genética es que permite contar con bancos de genes para la obtención de organismos o **ecotipos** capaces de adaptarse a ambientes extremos (uno de los efectos del cambio climático global) y así lograr la conservación de los recursos para el futuro como parte de un desarrollo sustentable.

Captura de carbono

En la actualidad se sabe que los bosques realizan una función importante en la regulación del clima mundial. Las plantas toman el bióxido de carbono de la atmósfera en el proceso de la fotosíntesis y lo utilizan para elaborar azúcares y otros compuestos orgánicos necesarios para su crecimiento y metabolismo. Dicho gas, a través de una serie de procesos, sirve de materia prima para la formación de madera aprovechable por los

propietarios del bosque. Teniendo presente lo anterior y con la comprensión del ciclo del carbono es fácil entender que los bosques son parte esencial del funcionamiento eficiente del sistema global, ya que ayudan a regular la concentración de este gas en la atmósfera. Esto hace que sea conveniente el pago de este servicio a los propietarios, así como el de los antes ya mencionados, para de esta manera conservar el recurso, ya que los dueños no se verían obligados a cambiar el uso del suelo para conseguir un recurso económico extra.

Belleza escénica

Los ecosistemas al integrarse adoptan formas sorprendentes, la mayoría de las veces hermosas, que se traducen en paisajes y escenarios naturales ideales para la recreación y el deleite de la humanidad. Esto constituye uno de los servicios ambientales más evidentes para el ser humano. La naturaleza provee de belleza en sus más distintas expresiones: un paisaje de colinas ondulantes, esplendorosas cascadas, grandes desfiladeros, el verde de la selva, etc. La naturaleza es también la fuente más importante de la creatividad intelectual y artística. Con su magna diversidad biológica y sus atractivos paisajes, México representa un gran atractivo para el turismo nacional e internacional. Este interés por nuestro país representa un enorme potencial económico que podría explotarse

mediante la organización de visitas a lugares con atractivos naturales con fines educativos, o de aventura, lo que se conoce como turismo ecológico. Este servicio ambiental imprescindible para el equilibrio del ser humano podría generar una serie de actividades productivas que fomenten el desarrollo comunitario sobre bases de sustentabilidad.

COMENTARIOS

El manejo de los recursos naturales depende en gran medida de saber con qué se cuenta y cómo funcionan los ecosistemas. En la actualidad, el aprovechamiento inadecuado está resultando en la pérdida de los tres componentes de la biodiversidad con efectos graves para el mundo, como el calentamiento global derivado de la contaminación del aire. El aire depende de los ecosistemas forestales para su purificación; sin embargo, al igual que otros **biomas**, los bosques

han sido afectados de un modo adverso por las actividades humanas resultantes de un cambio en el uso del suelo y un aprovechamiento inadecuado, no sólo de las poblaciones de las especies sino también de los recursos genéticos, elementos fundamentales para el desarrollo sustentable.

Las medidas correctivas que se apliquen para resolver los problemas sociales, ecológicos, económicos, etc. en el área forestal deben apoyarse en el conocimiento de cada uno de los niveles de organización de los ecosistemas forestales. En este capítulo se han examinado dos de los componentes fundamentales de los bosques: el genético y el ambiental, así como su interacción. En particular en México, estos aspectos han sido olvidados en la mayor parte de los programas de manejo, reforestación y restauración, pero ya se les empieza a dar la importancia correspondiente.

BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

Benitez Díaz, H. y M. Bellot Rojas. Biodiversidad: uso, amenazas y conservación. (En línea) Disponible en: http://www.ine.gob.mx/ueajei/publicaciones/libros/395/benitez_bellot.html. (13 de abril, 2008).

Bishop, J. y N. Landell-Mills. 2007. "Los servicios ambientales de los bosques". En: Pagiola, S., J. Bishop, N. Landell-Mills (Compiladores.). *La venta de servicios ambientales forestales*. 2a Ed. SEMARNAT, INE.

Bruce, A. *et al.* 2002. *Biología molecular de la célula*. Editorial Omega, Barcelona.

Challenger, A. 1998. *Utilización y conservación de los ecosistemas terrestres de México. Pasado, presente y futuro*. Conabio, IBUNAM y Agrup. Sierra Madre, Méx.

Dvorak, W. S. *et al.* 2000. "The evolutionary history of the Mesoamerican Oocarpace". En: *Conservation & testing of tropical y subtropical forest tree species by the CAMCORE Cooperative*. College of

- Natural Resources, NCSU Raleigh, NC. USA.
- FAO. 2002. Evaluación de los recursos forestales mundiales 2000: informe principal. Roma. (En línea) Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/005/y1997s/y1997s00.HTM>. (31 de mayo, 2008).
- Flores, R. C. I. y R. J. Márquez. 2004. Estudio Poblacional de *Quercus oleoides* Schl. et Cham. en un gradiente altitudinal del centro de Veracruz. *Foresta Veracruzana* 7(1):31-36.
- Gutiérrez, Z. I. y C. G. Morales. 2004. *Sistemática y distribución de las coníferas en el estado de Tlaxcala*. Tesis de Licenciatura UATx, México.
- Harold, W. y Hocker Jr. 1984. *Introducción a la Biología Forestal*. AGT Editor, Méx., D.F.
- Larcher, W. 1995. *Physiological Plant Ecology*. Third Edition. Springer-Verlag, Berlín.
- Ledig, F. T. 1997. "Conservación y Manejo de Recursos Genéticos Forestales". En: Vargas H, J. Jesús, Basilio Bermejo y F. Thomas Ledig (Eds.). *Manejo de Recursos Genéticos Forestales*. Colegio de Postgraduados, Montecillo, Méx. y División de Ciencias Forestales, UACH., Méx.
- Little, E. L. Jr, 1989. *Checklist of United States trees (native and naturalized)*. Agricultural Handbook No. 541, U.S.D.A. Forest Service Washington, DC.
- Lomelí R., Ma. G. y R. Tamayo O. Biodiversidad. (En línea) Disponible en: <http://www.sagan-gea.org/hojared/CBio.html>. (13 de abril, 2008).
- López, R. G. F. 2005. *Ecofisiología de árboles*. UACHapingo. México.
- Morgenstern, E. K. 1996. *Geographic variation in forest trees: Genetic basis and application of knowledge in silvicultura*. UBC, Vancouver, British Columbia.
- Nuñez, I. y A. Barahona. 2006. "La biodiversidad o la variedad de la vida, reflejo de una historia". En: Barahona, A. y L. Almeida (coordinadoras). *Educación para la conservación*. Facultad de Ciencias, UNAM, Méx.
- Pagiola, S., N. Landell-Mills, J. Bishop. 2007. "Los mecanismos basados en el mercado para la conservación y el desarrollo". En: Pagiola, S., J. Bishop, N. Landell-Mills (Compiladores). *La venta de servicios ambientales forestales*. 2a Ed. SEMARNAT. INE, México.
- PNUMA. Derecho ambiental. Grupo de países megadiversos afines. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. Oficina Regional para América Latina y el Caribe. (En línea) Disponible en: <http://www.pnuma.org/deramb/GroupofLikeMindedMegadiverseCountries.php>. (13 de abril, 2008).
- Toledo, V. y M. J. Ordoñez. 1993. "The biodiversity scenario of Mexico. A review of terrestrial habitats". En: Ramamoorthy, T. O., R. Bye, A. Lot y J. Fa (Eds.). *Biological diversity of Mexico. Origins and distribution*. Oxford University, N.Y.
- Vázquez, C. O. G. 2005. Análisis de conos y semillas de *Pinus oaxacana* Mirov en Lázaro Cardenas, Tlaxcala, México. Tesis de Maestría en Ciencias. Universidad Veracruzana, Xalapa, Méx.

CONTAMINACIÓN DEL SUELO

Elizabeth García Gallegos

Laboratorio de Fertilidad de Suelos

INTRODUCCIÓN

El suelo es uno de los recursos naturales más importantes ya que es el soporte de las plantas y los animales de la Tierra; en estos términos, se le debe tratar y preservar de un modo cuidadoso. El desarrollo tecnológico, el crecimiento demográfico, la industrialización y el uso de nuevos métodos de agricultura tecnificada, son factores que contribuyen a la entrada continua en el ambiente edáfico de cantidades crecientes de numerosas sustancias químicas —sintéticas y naturales— conocidas como **contaminantes**, cuyas interacciones y efectos adversos, tanto sobre el ambiente como sobre los seres vivos, en general no se conocen o se conocen insuficientemente. Para los propósitos de este capítulo, un contaminante se puede definir como toda materia o sustancia —sus combinaciones o compuestos, así como sus derivados químicos o biológicos— que altera la composición del suelo al incorporarse, o actuar sobre, éste.

Según el origen se considera que la contaminación del suelo es de dos tipos: i) **natural**, es decir la contaminación producida por causas naturales o geoquímicas y en la cual de modo gene-

ral no influye el ser humano, y ii) **antropógena**, es la contaminación provocada por las actividades de los seres humanos.

Con el fin de estar en condiciones de aplicar una tecnología de **remediación**, es decir la remoción de contaminantes del suelo para la protección general de la salud humana y del ambiente, resulta indispensable entender el transporte y destino de los contaminantes en el sistema suelo, lo que se logra mediante una buena caracterización del sitio en cuanto a propiedades físicas, químicas y biológicas.

De igual manera, se requiere conocer la naturaleza física y química del contaminante.

El avance de las tecnologías de remediación a nivel mundial se inició en los países industrializados hace poco más de 10 años. Una de las más desarrolladas es la **remediación biológica**, también conocida como **biorremediación**. En México, existen actualmente varias empresas tanto nacionales como internacionales que ofrecen ya, este tipo de tecnologías para la remediación de suelos contaminados.

EL SISTEMA SUELO

Suelo se define como un cuerpo natural que se encuentra sobre la superficie de la corteza terrestre, contiene materia viva y sostiene o es capaz de sostener plantas. En un sentido más amplio se le considera como una mezcla de material mineral, materia orgánica, agua y aire. Las proporciones de estos componentes varían en el transcurso del tiempo y según el lugar.

El material sólido que forma parte del suelo es muy diverso y se divide en dos clases: inorgánico y orgánico. Dentro del inorgánico se encuentran las partículas coloidales provenientes de la erosión de rocas y las partículas constituidas por minerales arcillosos u orgánicos, además de minerales, óxidos y carbonatos. La porción orgánica incluye la mezcla de biomasa, plantas parcialmente degradadas, microorganismos y **humus**. El humus es la sustancia de naturaleza coloidal proveniente de la acción de hongos y bacterias sobre los restos de animales y vegetales muertos y está compuesto por una fracción soluble y una fracción insoluble en medio alcalino y relativamente inerte: la **humina**, constituida por ácidos húmicos intrínsecamente ligados a la materia mineral del suelo. El humus realiza una función importante en los procesos físicos y químicos que ocurren en el suelo.

La distribución de los materiales que constituyen el suelo no es homogé-

nea. A medida que evoluciona el suelo, los materiales pasan de una distribución superficial al principio a una cada vez más profunda. Lo anterior hace que se distingan estratos sucesivos de color, así como textura y estructura diferentes, denominados **horizontes**. El conjunto de éstos constituyen el **perfil** de un suelo, que al estudiarlo revela los procesos bioquímicos y físicoquímicos experimentados por él.

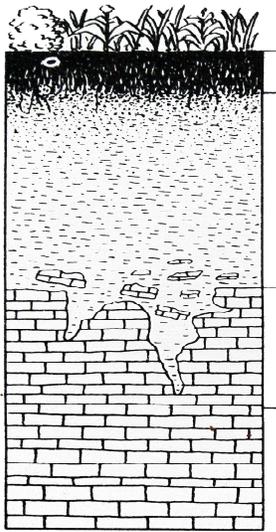
En un suelo se distinguen los siguientes horizontes (*véase la figura 1*).

Propiedades del suelo

Cada suelo se caracteriza por sus propiedades físicas, químicas y biológicas particulares. El conocimiento de estas características permite predecir el movimiento de las sustancias contaminantes en el suelo.

Propiedades físicas

Como se explica líneas atrás, el suelo es una mezcla de materiales sólidos, líquidos (agua) y gaseosos (aire). La relación adecuada entre estos componentes determina la capacidad de hacer crecer a las plantas y la disponibilidad de nutrientes suficientes para ellas. La proporción en que se encuentran los componentes determina una serie de propiedades que se conocen como **propiedades físicas o mecánicas** del suelo: textura, estructura, porosidad, ventilación, temperatura y color.



Horizonte A. Suelo superficial, constituido mayormente por materia orgánica, color oscuro, partículas muy finas, con una gran cantidad de poros. Esta es la zona de la cual pasan los óxidos de hierro al horizonte B. Se le conoce también como zona de lixiviación.

Horizonte B. Subsuelo, formado por productos de alteración de las rocas subyacentes, recibe material orgánico y mineral del horizonte superior, color pardo-rojizo por la presencia de óxido de hierro. A causa de que el material se deposita en este horizonte, se conoce a éste como zona de acumulación.

Horizonte C. El más profundo, zona de roca parcialmente desintegrada y descompuesta (material parental). Parte de los minerales de la roca original subyacente están presentes todavía, pero otros se han transformado en materiales nuevos. El horizonte C pasa gradualmente hacia abajo a la roca madre.

Roca basal original o roca madre.

Figura 1. En un suelo típico es posible distinguir tres capas verticales, es decir en profundidad, denominadas **horizontes**. La sucesión de distintos horizontes se denomina **perfil** del suelo. El suelo aquí representado se supone derivado de roca caliza.

Textura

La textura indica el contenido relativo de partículas de diferente tamaño, como arena, limo y arcilla, en el suelo. La textura tiene que ver con la facilidad con que se puede trabajar el suelo, la cantidad de agua y aire que retiene y la velocidad con que el agua penetra en el suelo y lo atraviesa.

Estructura

La estructura del suelo se define por la forma en que se agrupan las partículas individuales de arena, limo y arcilla. Cuando las partículas individuales se agrupan, toman el aspecto de partículas mayores y se denominan **agregados**. La agregación del suelo puede asumir diferentes modalidades, lo que da por resultado distintas estructuras de suelo. La

circulación del agua en el suelo varía notablemente de acuerdo con la estructura. Por otra parte cuando se tienen contenidos altos de sodio, los contaminantes pueden provocar la destrucción de la estructura al dispersarse.

Porosidad

La porosidad es la relación entre el volumen de los espacios vacíos y el volumen total de la masa del suelo. En un suelo hay varios tamaños de poros y cada uno tiene una función específica. Los poros grandes y medianos facilitan la ventilación y la infiltración; además, permiten la circulación del aire y el agua. Los poros pequeños conducen el agua, y los microporos la almacenan. La proporción de los poros grandes y pequeños en el suelo permite establecer un equili-

brio aire-agua. Los poros determinan la movilidad de los compuestos solubles y volátiles.

Temperatura

De ella dependen los procesos de alteración de los **materiales parentales**, o la difusión de los contaminantes.

Color

El color del suelo depende de los componentes de éste y se emplea como una medida indirecta para algunas de sus propiedades.

El color varía con el contenido de humedad. El color rojo indica contenidos de óxidos de hierro y manganeso; el amarillo indica óxidos de hierro hidratado; el blanco y el gris indican presencia de cuarzo, yeso y caolín; y el negro y café indican materia orgánica.

Propiedades químicas

Gran parte de los componentes del suelo terminan por convertirse en compuestos solubles que constituyen la solución del suelo (fase líquida) de la cual se nutren los vegetales. En algunos casos, los suelos muy ácidos evolucionan con el tiempo hacia suelos de características neutras o ligeramente alcalinas. Los cambios en las propiedades se deben a transformaciones químicas producto de mecanismos de tipo electroquímico y en otros casos a mecanismos puramente químicos.

pH

El pH es una propiedad química de los suelos que determina el comportamiento y la evolución de los componentes químicos de éstos, así como la actividad y las funciones de los seres vivos presentes. Una modificación del pH ocasiona alteraciones en la biodisponibilidad de elementos, por un lado pueden presentarse excesos (toxicidad) y por otro, deficiencias. Por esto la contaminación, el tratamiento, o ambos, de los suelos agrícolas generan cambios en el pH con repercusiones graves.

Reacciones ácido-base

Influyen en el grado de descomposición de la materia orgánica y los minerales, en la solubilidad de algunos contaminantes y, conjuntamente, en los procesos controlados por el pH del suelo.

Reacciones redox

Las condiciones de oxidación-reducción del suelo se originan en el metabolismo de los microorganismos del suelo y son de gran importancia para los procesos biológicos de **meteorización**, y de formación de suelos. De igual manera, están relacionadas con la disponibilidad de algunos elementos nutritivos.

Los procesos de oxidación-reducción incluyen elementos que actúan con diferentes valencias, entre otros: Fe, Mn, S, N. Algunos ejemplos de procesos de oxidación en el suelo son: i) la oxida-

ción del Fe^{+2} de minerales primarios en Fe^{+3} para formar óxidos e hidróxidos; ii) la transformación del Mn^{+2} en Mn^{+4} ; iii) la oxidación de S^- , como la pirita, en sulfatos; y iv) la nitrificación, o sea la transformación de NH_4 en nitritos y nitratos.

Por el contrario, muchos procesos se realizan en condiciones reductoras, como la **desnitrificación**, la **desulfuración**, la formación de compuestos Fe^{+2} y Mn^{+2} .

En los suelos normales el ambiente está ventilado y por tanto la tendencia general es oxidante. En los suelos **hidromorfos** o anegados la saturación de agua origina un ambiente reductor.

Los valores de pH y potencial redox delimitan los campos de estabilidad de los materiales del suelo. Los compuestos de Fe y Mn son muy sensibles a los cambios de pH.

Capacidad de intercambio catiónico

Corresponde a la cantidad de iones metálicos que una determinada cantidad de suelo es capaz de intercambiar. Estos intercambios son vitales para que los iones metálicos puedan entrar a la planta. La capacidad depende fundamentalmente de la naturaleza del mineral arcilloso que forma parte del suelo, y del tamaño de las partículas.

Propiedades biológicas

La actividad biológica de un suelo se refiere principalmente a la descomposición

de la materia orgánica, así como a la formación de compuestos orgánicos específicos a partir de las rocas y los minerales presentes. Los principales factores que intervienen en estos procesos son los microorganismos y las plantas.

Bacterias

Son los principales organismos que efectúan las reacciones bioquímicas del suelo, en particular las de oxidación-reducción que proporcionan la energía necesaria para los microorganismos.

Hongos

Intervienen en la colonización de zonas muy húmedas, se ha encontrado que sus secreciones ácidas y su tendencia a formar complejos químicos ayudan en los procesos de disolución de los minerales.

Rizosfera

Es una zona de interacción entre las bacterias y las raíces de las plantas, en ella existe un flujo de compuestos producto de la fotosíntesis, los cuales son exudados por la raíz en forma de carbohidratos, aminoácidos, ácidos orgánicos, vitaminas, enzimas, nucleótidos, flavononas, así como hormonas vegetales y otros compuestos importantes para la actividad microbiana. La comunidad microbiana en la zona de la raíz depende del tipo de raíz, la especie de planta, la edad de la planta y el tipo de suelo, así como los tipos de contaminante. La de-

gradación microbiana de los compuestos orgánicos contaminantes o de otro tipo en la rizosfera se estudia con particular cuidado, puesto que una sola especie de microorganismo, o bien toda una comunidad, podría ser la que efectúe la biotransformación del compuesto.

Materia orgánica

Denominada la “sangre vital” del suelo, la materia orgánica es importante por ser fuente de elementos nutritivos para las plantas, disminuir la erosión y mejorar las propiedades físicas del suelo. Se forma por la descomposición de residuos de origen vegetal y animal.

Cuando las condiciones son favorables, la materia orgánica se descompone para formar humus. Al descomponerse en humus, los residuos vegetales se convierten en formas estables que se almacenan en el suelo y pueden ser utilizadas como alimento por las plantas. La cantidad de humus afecta también a las propiedades físicas del suelo, como estructura, color, textura y capacidad de retención de la humedad.

CONTAMINACIÓN DEL SUELO

Según el Diccionario de la lengua española de la Real Academia Española (vigésima segunda edición, 2001), la palabra contaminación significa “acción y efecto de contaminar”; contaminar quiere decir “alterar nocivamente la pureza o las

condiciones normales de una cosa o un medio por agentes químicos o físicos”.

De acuerdo con las definiciones anteriores, la contaminación del suelo consiste en la introducción de un elemento extraño al sistema suelo, o la existencia en cantidades inusuales de un elemento natural de dicho sistema que, por sí mismo o su efecto sobre los otros componentes, produce un efecto nocivo en los organismos del suelo y los consumidores de éstos, o bien es susceptible de transmitirse a otros sistemas. En estos términos, un suelo contaminado es aquel cuyas características han sido alteradas negativamente por la presencia de componentes químicos peligrosos de origen antropógeno y natural, en concentración tal que comporte un riesgo inaceptable para la salud humana o el ambiente.

Entre los efectos nocivos para organismos, poblaciones y ecosistemas destacan los siguientes:

- Perjuicios a la salud humana (intoxicaciones, enfermedades infecciosas y crónicas, muerte).
- Daños a la flora y fauna (**eutrofización**, enfermedad y muerte).
- Alteraciones de ecosistemas (erosión, eutrofización, acumulación de compuestos dañinos persistentes).
- Molestias estéticas (malos olores, sabores y apariencia desagradables).

Fuentes de contaminación del suelo

Como se menciona al principio, la contaminación del suelo puede ser de dos tipos: i) natural, y ii) antropógena. La contaminación natural es el resultado de la alteración mineral misma que da origen al suelo, ya que algunas rocas provenientes de ese proceso poseen un alto contenido de determinados elementos, por lo que los suelos que sobre ellas se forman adquieren también esa elevada concentración. La contaminación antropógena afecta principalmente a las zonas rurales agrícolas y es una consecuencia del uso creciente de ciertas prácticas agrícolas. Los fertilizantes químicos aumentan el rendimiento de las tierras de cultivo, pero su uso repetido resulta en la contaminación del suelo, aire y agua. Además, los fosfatos y nitratos son arrastrados por las aguas superficiales a los lagos y ríos donde producen eutroficación, y también contaminan las aguas subterráneas. Los plaguicidas minerales u orgánicos utilizados para proteger los cultivos contaminan los suelos y la biomasa. De igual manera, los suelos están expuestos a ser contaminados a través de las lluvias que arrastran metales pesados como el Pb, Cd, Hg y Mo, así como también sulfatos y nitratos producidos por la lluvia ácida. En la tabla 1 se enumeran las principales fuentes de contaminación del suelo, así como también los contaminantes antropógenos más importantes.

Metales pesados

A los metales pesados se les conoce también como elementos vestigiales, oligoelementos, o elementos traza, y en agricultura como micronutrientes, ya que su presencia en cantidades pequeñísimas en los seres vivos resulta indispensable para la actividad normal del organismo. Estos elementos pueden llegar a ser tóxicos para las plantas y los microorganismos del suelo cuando alcanzan una concentración alta. Entre otros es posible mencionar a los siguientes: As, Be, Sb, Cd, Cr, Cu, Pb, Hg, Ni, Se, Ag y Zn. Actualmente, el avance de nuevas tecnologías de toda índole depende de los elementos obtenidos de las actividades minerometalúrgicas o del reciclaje de otros materiales, ya que muchos de los componentes de los equipos modernos (computadoras, instrumentos analíticos y teléfonos celulares, entre otros) están fabricados de metales — como Fe, Cu, Cd, Au, Pb, Ag— y metaloides, como —Si—.

Por otra parte, la excavación de minas, la remoción de minerales y el procesamiento y extracción de metales podrían causar daños ambientales y en casos extremos, destruir el ecosistema; por ejemplo, se podrían dañar suelos de cultivo, favorecer la erosión y contaminar cuerpos de agua con sales solubles de elementos potencialmente tóxicos (EPT), como As, Se, Pb, Cd y óxidos de S, entre otros. El impacto de la minería sobre el

ambiente y la salud se relaciona con la composición del mineral, el tipo de explotación, el proceso de beneficio, así como con la escala de las operaciones y las

características del entorno. Además la composición y la cantidad de los residuos varían según las condiciones particulares de cada mina.

Tabla 1. Fuentes de contaminación del suelo y principales contaminantes.

<i>Fuentes</i>	<i>Contaminantes</i>
Depósito atmosférico	<ul style="list-style-type: none"> • Residuos de combustión de combustibles fósiles (óxidos y aniones ácidos de S y N; metales pesados, hidrocarburos). • Plomo e hidrocarburos de tubos de escape de automóviles. • Fundición de metales (As, Cd, Cu, Cr, Hg, Ni, Pb, Sb, Zn). • Industrias metalúrgicas (Cd, Cu, Pb, Zn) • Industrias químicas (Hg y microcontaminantes orgánicos). • Eliminación de residuos mediante incineración. • Grandes incendios (Pb, hidrocarburos, Cr, pinturas).
Productos químicos de uso agrícola	<ul style="list-style-type: none"> • Plaguicidas y fertilizantes.
Eliminación de residuos sólidos	<ul style="list-style-type: none"> • Estiércoles de granjas. • Biosólidos y lodos residuales de plantas de tratamiento. • Residuos de minas (metales pesados). • Filtraciones de lixiviados de rellenos sanitarios. • Cenizas de la quema de combustibles fósiles.
Acumulación accidental de contaminantes	<ul style="list-style-type: none"> • Corrosión de metales en contacto con el suelo. • Conservadores de maderas. • Escapes de tanques de almacenamiento subterráneos. • Maniobras y prácticas militares. • Actividades de deporte y recreo.
Áreas industriales abandonadas	<ul style="list-style-type: none"> • Fábricas procesadoras de gas, fenoles, alquitranes, cianuros y As. • Industrias eléctricas (Cu,Pb,Zn, disolventes). • Tenerías (Cr). • Almacenes de chatarra (metales pesados).

Otras fuentes subestimadas que generan contaminación por metales son:

- **Drenaje Pluvial:** en muchas ocasiones el drenaje pluvial de las zonas urbanas contiene muchos metales, lo que depende del tipo de caminos existentes y el material de construcción de éstos, la cantidad de tráfico, la planeación urbanística y el uso de suelo.
- **Descargas y drenaje industriales:** actualmente en México existe una normativa que regula las descargas de industrias; sin embargo, algunas generan residuos con concentraciones elevadas de metales por las características de los procesos.
- **Drenaje doméstico:** transporta metales utilizados en la construcción de las tuberías (Cu, Pb, Zn, Cd, Fe, Mn, Cr, Ni, Co, Bo y As). Los tratamientos ordinarios para aguas residuales, remueven sólo 50% de los metales contenidos, dejando una carga considerable de metales en el agua tratada, además de concentrar en los lodos del tratamiento los metales removidos.
- **Rellenos sanitarios:** el lixiviado que se produce en los rellenos sanitarios normalmente contiene metales, como Cu, Zn, Pb y Hg.
- **Quema de combustibles fósiles:** es la principal fuente de metales hacia la atmósfera y es fuente potencial de contaminación de cuerpos de aguas superficiales.

Plaguicidas

Plaguicida es el nombre genérico que recibe cualquier sustancia o mezcla de sustancias usada para controlar las plagas agrícolas o insectos que son vectores de enfermedades. La aplicación de **agroquímicos** —plaguicidas utilizados en relación con las actividades agrícolas— con el fin de incrementar la producción da como resultado la contaminación del suelo, aire y agua, principalmente cuando se usan de un modo indiscriminado. Sólo en México en los últimos 30 años se elevó el consumo en 400%.

La contaminación del suelo por plaguicidas se produce por alguna de las siguientes vías: i) aplicaciones directas en los cultivos agrícolas, ii) derrames accidentales, iii) lavado inadecuado de contenedores, iv) filtraciones en los depósitos de almacenamiento, y v) descarga y **disposición final** inadecuada de residuos en el suelo. Las principales vías de transformación de los plaguicidas en el suelo son fotodescomposición, lixiviación, volatilización, arrastre superficial, y degradación biológica y química.

Entre los plaguicidas se incluyen los herbicidas que eliminan a las plantas indeseables o malezas, así como también los insecticidas que matan a diversas especies de insectos. Para entender como se comporta un plaguicida en el ambiente se necesita contar con mucha información sobre las características ambientales, así como del mecanismo de

transporte, de las características geográficas del lugar y de las propiedades físico-químicas de la molécula del plaguicida estudiado.

En la actualidad existe un gran número de plaguicidas, los cuales atendiendo a su naturaleza química se clasifican en dos grandes grupos: i) orgánicos y ii) inorgánicos. Estos dos grupos engloban varias estructuras químicas diferenciadas, por lo que es posible efectuar una subdivisión de ellos. Dentro de los orgánicos se encuentran: derivados halogenados, compuestos organofosforados, carbamatos, derivados de la urea y tiourea, y compuestos heterocíclicos. Los inorgánicos incluyen: insecticidas fluorados, insecticidas arseniales, fungicidas inorgánicos y fumigantes halogenados alifáticos.

Compuestos orgánicos

La mayoría de los contaminantes orgánicos son altamente hidrófobos, por lo que se acumulan e introducen en la cadena alimentaria. Al presente se estima que existe un mínimo de un millón de compuestos orgánicos fabricados por el ser humano, que poseen una gran variedad de grupos funcionales. No obstante, la literatura que discute sus efectos sobre el sistema planta-suelo es mucho menor que el número de compuestos y elementos inorgánicos. Los compuestos orgánicos y los metales pesados difieren en su tiempo de residencia en el suelo. El pro-

medio de vida de los orgánicos persistentes (por ejemplo los PCBs) es de unos 10 años; mientras que la de los metales pesados es de miles de años.

Las fuentes principales de contaminación del suelo por hidrocarburos fósiles son las fosas de pozos petroleros y las deficiencias en su mantenimiento, las descargas provenientes de instalaciones de procesamiento y petroquímicas, así como la rotura de oleoductos. En menor cantidad, la contaminación del suelo es originada por desechos municipales, partículas transportadas por la vía atmosférica y sustancias producidas por organismos. En las zonas donde las lluvias son frecuentes e intensas ocurre contaminación por acarreo de hidrocarburos derivados del petróleo.

Evolución de los compuestos orgánicos en el suelo

En el suelo los hidrocarburos pasan primero por dos procesos: la volatilización y la fotooxidación. Posteriormente, experimentan un proceso de descomposición biológica, en el cual los microorganismos, los nutrientes, el oxígeno, la textura y el pH son fundamentales. Como resultado de este último proceso, se generan productos intermedios, células microbianas y CO₂, el cual se incorpora a la atmósfera. Finalmente, los productos de la descomposición biológica siguen dos caminos: i) se agregan al humus del suelo, o ii) se lixivian.

Procesos de transporte y acumulación de contaminantes del suelo

A diferencia de otros componentes ambientales como el agua y el aire, la contaminación del suelo no es fácil de medir en términos de composición química, ya que un suelo "puro" es difícil de definir. En un gran número de casos, la presencia de un componente en particular se debe a actividades humanas locales, por lo que esto no demuestra el estado general de un suelo.

Por lo anterior, el tema central de la contaminación del suelo es el conocimiento de los procesos de transporte y acumulación, en particular de los compuestos peligrosos. Es evidente que en la acumulación y la movilidad de estos influyen las interacciones con la fase sólida del suelo, y en casos específicos, la degradación de dichos compuestos. Tales interacciones son las siguientes:

- Adsorción positiva: inducida por atracción electrostática entre compuestos con carga opuesta a la de los constituyentes del suelo.
- Repulsión electrostática: cuando la carga eléctrica de los componentes y constituyentes del suelo son del mismo signo.
- Quimiosorción: este tipo de interacción puede confundirse con una adsorción positiva, excepto por el valor de la energía de adsorción. Ésta es considerablemente más alta en el ca-

so de la quimiosorción, por lo que este mecanismo se caracteriza por una limitada intercambiabilidad con otros compuestos.

- En el caso de compuestos orgánicos ocurren interacciones como: i) fuerzas de Van der Waals, ii) puentes de hidrógeno, iii) puentes entre sales, y iv) puentes de iones metálicos.
- Reacciones de precipitación y disolución: realizan una función muy importante en la movilidad de algunos compuestos, como N, P y K.
- Reacciones de descomposición y movimiento o desplazamiento, degradación fotoquímica, degradación microbiana, o una combinación de éstas.

CONTROL DE LA CONTAMINACIÓN DE LOS SUELOS

En los países industrializados el control de la contaminación edáfica se inició promoviendo medidas de saneamiento de suelos y aguas de índole fisicoquímica (incineración, desorción térmica seguida de combustión, solidificación, ventilación de suelos, inyección de aire y ventilación combinadas, adsorción con carbón activado, entre otros).

Estas opciones o han resultado problemáticas (emisión de sustancias y subproductos peligrosos), o caras, o ambas cosas. En tiempos recientes se atestigua un interés creciente en tecnologías ambientalmente benignas y eficaces basadas en la biodegradación.

El tratamiento biológico de los suelos es un grupo de tecnologías que utilizan microorganismos para convertir los contaminantes en especies químicas menos peligrosas o efectuar su **mineración**. Los microorganismos tienen diferentes efectos sobre los compuestos contaminantes. La **biodegradación** es el proceso de descomposición de una sustancia mediante la acción de organismos vivos y normalmente implica la descomposición completa de un compuesto orgánico en sus componentes inorgánicos, es decir, la mineralización. La **biotransformación** es la alteración química de la estructura molecular de un compuesto orgánico o inorgánico, que resulta en una complejidad diferente o en la pérdida de ciertas características sin pérdida de la complejidad molecular. Como se produce un cambio en la estructura del compuesto, la toxicidad y la movilidad del compuesto original son afectadas.

La necesidad de reparar los sitios dañados por la contaminación ha estimulado el desarrollo de nuevas tecnologías, entre las cuales la **biorremediación** y la **fitorremediación** se perfilan como dos alternativas muy atractivas para llevarse a la práctica. De manera estricta, puesto que en los procesos de biorremediación generalmente se emplean mezclas de ciertos microorganismos o plantas capaces de degradar o acumular sustancias contaminantes, la fitorremediación viene

a ser un tipo de biorremediación. Sin embargo, aquí se considera a ambas como dos procesos separados. La biorremediación es una alternativa biológica para el tratamiento de suelos contaminados, e implica el uso de microorganismos para remover contaminantes orgánicos presentes en el suelo. La fitorremediación se refiere al uso de plantas con capacidad para remover los contaminantes orgánicos e inorgánicos.

COMENTARIOS

Es evidente que el crecimiento de la población ha tenido como consecuencia una problemática ambiental globalizada, que de seguir al mismo ritmo ocasionará catástrofes de grandes magnitudes. El suelo es uno de los principales sistemas receptores de la contaminación, por lo que es imperativo tomar acciones inmediatas para detener y solucionar este problema. Las tecnologías de remediación biológica podrían ser una alternativa viable, ecológicas, además de ser a bajo costo. En el Laboratorio de Fertilidad de Suelos del CIGyA de reciente creación, los proyectos se enfocan actualmente a determinar el contenido de metales pesados y su relación con las propiedades fisicoquímicas del suelo, así como la concentración en tejido vegetal, todo esto con el apoyo de la Universidad Autónoma Chapingo.

BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

- Albert, L. A. 1999. *Curso básico de toxicología ambiental*. Limusa-Noriega Editores, México, D. F.
- Anderson, T. A., E. A. Gothrie y B. T. Walton. 1993. Bioremediation in the rhizosphere (plants roots and associated microbes clean contaminated soil). *Environ. Sci. Technol.* 27(13):2630-2636.
- Baxter, C., M. Aguilar y K. Brown. 1983. Heavy metals and persistent organics at the sewage sludge disposal site. *J. Environ. Qual.* 12(3):311-316.
- Bowen, M. 1977. "Residence times of heavy metals in environment". En: Hutchinson, L. (Ed.). *Proc. Inter. Conf. on heavy metals in the environment, Toronto*. Institute for Environmental Studies, Univ. of Toronto, Toronto, Ontario, Canada.
- Csuros, M y C. Csuros. 2002. *Environmental sampling and analisis for metals*. Lewis Publishers, Boca Raton, Florida.
- Cunningham, S. D., T. A. Anderson, A. P. Schwab y F. C. Hsu. 1996. Phytoremediation of soils contaminated with organic pollutants. *Adv. Agronomy.* 56:55-114.
- Edgington, S. M. 1994. Environmental Biotechnology. *Bio.Tech.* 12(12):1338-1341.
- Environmental Protection Agency (EPA).2000. *Introduction to phytoremediation*. EPA/600/r-99/107. Cincinnati, Ohio.
- Eweis, J. B., S. J. Ergas, D. P. Y. Chang y E. D. Schroeder. 1998. *Bioremediation principles*. McGraw-Hill International Editions, Boston.
- Ferrera-Cerrato, R. 1995. "Efecto de rizosfera". En: Ferrera C. R. y J. Pérez Moreno (Eds.). *Agromicrobiología, elemento útil en la agricultura sostenible*. Colegio de Posgraduados en Ciencias Agrícolas, Montecillo, Estado de México.
- Fries, F. 1982. Potencial polychlorinated biphenyl residues in animal products from application of contaminated sewage sludge to land. *J. Environ. Qual.* 11:14-20.
- Gocht, W. R., H. Zantop y R. G. Eggert. 1988. *International mineral economics*. Springer-Verlag, Nueva York.
- Hernández, A. E., P. J. E. Rubiños, L. J. Alvarado. 2004. *Restauración de suelos contaminados con hidrocarburos: conceptos básicos*. Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas, Montecillo, Edo. de Méx.
- Korda, A., P. Santas, A. Tenente y R. Santas. 1997. Petroleum hydrocarbon bioremediation: samplig and analytical techniques *in situ* treatments and comercial microorganism currently used. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 48:677-686.
- McGill, W. B., M. J. Rowell y D. W. S. Westlake. 1981. "Biochemistry ecology and microbiology of petroleum components in soil". En: Paul, E. A. y J. N. Ladd (Eds.). *Soil Biochemistry*, vol. 5. Marcel Dekker, Nueva York. pp. 229-296.
- Ortiz-Hernández, Ma. L., E. Sánchez-Salinas, G. de la F. Iturriaga, E. P. Castillo y E. E. Aranda. 2005. "La biotecnología hoy: avances recientes y tendencias". En: Sánchez-Salinas, E., Ortiz-Hernández, Ma. L. (Eds.). *Biociencias*. CIB, UAEMor. pp. 121-193.

- Ortiz-Hernández, Ma. L., E. Sánchez-Salinas, R. Vázquez-Duhalt y R. Quintero-Ramírez. 1997. Plaguicidas organofosforados y ambiente. *Biotecnología* 2(3):129-151.
- Ortiz, V. B y S. C. A. Ortiz. 1990. *Edafología*. Departamento de Suelos. Universidad Autónoma Chapingo, Edo. de Méx.
- Page, A. L., G. Thomas, E. Smith, K. Iskandar y L. E. Sommers. 1983. *Utilization of municipal wastewater and sludge on land*. University of California, Riverside, CA.
- Porta, J., A. M. López, C. Roquero. 1999. *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. 2a Ed. Ediciones Mundi-Prensa, España.
- Rawe, J., S. Krietemeyer y E. Meagher-Hartzell. 1993. *Guide for conducting treatability studies under CERCLA*. Biodegradation remedy selection. EPA/540/R-93/519a. USEPA, ORD, RREL, Cincinnati, Ohio.
- Sánchez-Salinas, E. y Ma. L. Ortiz-Hernández. 2005. "La degradación ambiental: Problemática en un mundo globalizado". En: Sánchez-Salinas, E. y Ortiz-Hernández, Ma. L. (Eds.). *Biociencias*. CIB, UAEMor. pp. 194-229
- Sandman, E. y M. A. Loss. 1984. Hazardous organic compounds. *Chemosphere* 13: 1073-1084.
- Saval, S. 1997. *Biorremediación de suelos y acuíferos contaminados*. Memorias Simposio Biorremediación de suelos y acuíferos. 6-7 de noviembre, Méx. D. F.
- Trujillo, N. A., E. L. C. Lagunas, R. G. A. González. 1995. "Metales pesados e hidrocarburos en suelos del estado de Tabasco". P. 41. En: Tovar S. J. L., V. Ordaz Ch. y R. Quintero Lizaola. (Eds.). *La investigación Edafológica en México*. 1992-1995. Memorias XXVI Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Cd. Victoria Tamaulipas, México.
- Valdivia, B., P. Granillo, Ma. del S. Villarreal. 2003. *Biología*. La vida y sus procesos. Publicaciones Cultural. México, D. F.
- Verstraete, W. y E. Top. 1992. *Holistic environmental biotechnology*. Proceed. 48th Symp. Soc. Gen. Microbiol, "Microbial Control of Pollution", 23-26 March 1992. Cardiff, Escocia. pp. 1-17.
- Volke, S. T., T. J. A. Velasco, P. D. A. de la Rosa. 2005. *Suelos contaminados por metales y metaloides: Muestreo y alternativas para su remediación*. SEMARNAT-INE. México. D.F.

TRATAMIENTO AEROBIO ASISTIDO DE LAS AGUAS RESIDUALES

José Mariano R. Montiel González

Laboratorio de Mutagénesis y Química Ambiental

INTRODUCCIÓN

El agua es una sustancia tan común en la vida cotidiana que de ordinario no se le valora sino hasta que se carece de ella. La importancia del agua es posible apreciarla considerando los requerimientos de los seres humanos en cuanto a este vital líquido. Una persona promedio hace pasar por su cuerpo alrededor de 2.4 litros de agua por día al beber líquidos, ingerir alimentos que contienen agua, etc. Esta agua se pierde por excreción, transpiración y exhalación. El cuerpo humano contiene aproximadamente 65% de agua, pero ésta no se halla distribuida uniformemente: la sangre contiene 90% de agua; el tejido muscular, 75%; y los huesos, alrededor de 20%. Una pérdida de únicamente 12% del contenido de agua del cuerpo resulta fatal. El agua es esencial para la digestión, el transporte de nutrientes y oxígeno, así como también la regulación de la temperatura del cuerpo.

De cualquier manera, la mayor parte del agua se gasta en la realización de las actividades diarias necesarias para mantener nuestro estilo de vida. Cada persona usa alrededor de 600 litros por

día. En la industria se usan grandes cantidades de agua en la elaboración de diferentes productos. A continuación se citan algunos ejemplos: se utilizan 163 000 L para producir una tonelada de papel; 333 000 L para una tonelada de acero; y 1 325 000 L para una tonelada de aluminio. Lo más sorprendente en cuanto al uso del agua se encuentra en la producción de alimentos. Para producir un huevo se necesita 500 L; un litro de leche, 3 800 L; un kilo de carne, 26 500 L. Si se agrega el agua necesaria para el procesamiento de alimentos y otras necesidades, el consumo individual se incrementa a 13 300 L.

En general, la mayor parte del agua se gasta en la agricultura y no en la ganadería, ni en la elaboración de alimentos. Alrededor de 99% del agua absorbida por los cultivos no se usa en la fotosíntesis, sino que se evapora en la atmósfera. Una hectárea de un cultivo de maíz pierde hasta 30 000 L de agua en un día. En contraste con el uso agrícola, el agua usada por las industrias y los municipios se puede tratar y reciclar. Cada organismo tiene un requerimiento de

agua característico. Como las plantas son organismos relativamente simples, necesitan agua para transportar nutrientes de la raíz a las hojas. En todos los organismos, el agua constituye el medio en el cual se llevan a cabo reacciones químicas vitales, como la fotosíntesis y la respiración.

LA CONTAMINACIÓN DEL AGUA

Antecedentes

La contaminación del agua como se conoce en la actualidad, un problema que afecta a grandes regiones del mundo, empezó con la revolución industrial. Cuando el hombre cazaba, pastoreaba, o los pequeños grupos dependían de los cultivos agrícolas, el manejo o **disposición final** de los desechos no representaba ningún problema. Primero mediante la evolución biológica, y luego a través del desarrollo cultural, los primeros seres humanos adquirieron un comportamiento que resultó en la práctica de la limpieza. La eliminación de los residuos seguramente provocaba problemas de salud y molestias en las grandes ciudades de la historia temprana, pero según los estándares actuales, estas ciudades eran pequeñas y estaban muy separadas unas de otras por lo que los problemas eran de naturaleza más bien local.

Los avances en los métodos agrícolas del siglo XVII incrementaron la productividad de los cultivos, con lo que disminuyó la necesidad de mano de

obra. Lo anterior obligó a algunos agricultores a dejar los campos y empezar otras ocupaciones. Los descubrimientos de nuevas tierras y los inventos, junto con el uso del capital durante este periodo, resultaron en la creación de fábricas que empleaban un siempre ascendente número de personas en las también crecientes ciudades. Este movimiento de personas hacia las ciudades aumentó durante la revolución industrial y aún continúa en la actualidad, incluso en los países cuya economía depende principalmente de las actividades agrícolas. El crecimiento de la población en el mundo occidental ha sido más grande en las ciudades que en las áreas rurales. El estándar de vida en los países industrializados de esta región del mundo se ha elevado gracias al mejoramiento en la agricultura, una mayor productividad de los trabajadores tanto fabriles como agrícolas, el uso de combustibles fósiles, el empleo de la electricidad, etc.

Sin embargo, el rápido crecimiento de las ciudades en Inglaterra a principios del siglo XIX resultó en grandes concentraciones humanas en áreas que no tenían la infraestructura adecuada para el bienestar de la comunidad. En este periodo de cambios rápidos, la condición económica del obrero no era buena y las condiciones de la comunidad donde vivía empeoraban rápidamente. En la década de 1840, las ciudades inglesas contaban con sistemas de suministro de agua y

sitios de depósito de aguas residuales inaceptables desde el punto de vista higiénico. Los suministros de agua contaminados provocaron epidemias de **cólera** y tifoidea. Había grandes problemas para proveer de agua segura y manejar de manera adecuada los residuos. Los primeros trabajos realizados por los bacteriólogos no se valoraron, lo cual fue un impedimento para la corrección de las condiciones de vida que resultó en epidemias muy graves. Las condiciones sanitarias en las ciudades de Estados Unidos no eran tan extremas como las de las ciudades de Inglaterra, ya que la revolución industrial llegó después y muchas ciudades se ubicaron a orillas de las grandes vías fluviales.

Los sistemas de suministro de agua y recolección de residuos alcanzaron niveles avanzados en los imperios de Asiria y Babilonia en Mesopotamia, los cuales no se lograron en la civilización moderna sino hasta finales del siglo XIX. En las ruinas de Eshunna (cerca de Bagdad, Irak) se han descubierto desde letrinas dotadas con sistemas para la descarga de agua hasta casas conectadas a sistemas de alcantarillado contruidos con ladrillo. Estas ruinas datan de alrededor del año 2500 a. C. El llamado sistema de alcantarillado de Roma tenía muy pocas conexiones a las casas y estaba diseñado para la eliminación de aguas superficiales y subterráneas, pero no de desechos humanos. Éstos eran

arrojados a las calles, de donde fluían a unos drenes (zanjas o canales) que descargaban en el río Tíber. Las condiciones en las ciudades de Europa en la Edad Media eran indescriptibles. Evidentemente se pensaba poco y también se hacían pocos esfuerzos, por proveer de agua segura o sistemas de eliminación de residuos a los habitantes.

Los sistemas de canales de desagüe en Estados Unidos y Europa se diseñaron originalmente para la conducción de agua pluvial, pero con el tiempo se empezó a conducir de un modo directo los residuos a estos canales. Aunque la descarga de los residuos en los drenes mejoró las condiciones de vida en torno de las viviendas, generó condiciones fétidas en ríos y manantiales. Los manantiales más pequeños y los canales de drenaje se cubrieron con una especie de techo y en el curso del tiempo se convirtieron en parte de los sistemas de alcantarillado. En Inglaterra, a pesar de las epidemias de cólera, se le concedió mayor atención a la contaminación del agua porque interfería con los usos industriales y agrícolas y no por los efectos nocivos que representaba para la salud humana.

Conflicto de intereses

Los cambios en la sociedad originados por la revolución industrial, resultaron inevitablemente en conflictos de intereses por el uso del agua. Las condicio-

nes imperantes en los ríos de Inglaterra hacían que el agua fuera inadecuada para usos industriales y agrícolas. Evidentemente esta situación sirvió de impulso para los estudios de mediados del siglo XIX cuyo propósito era el control de la contaminación. Cuando la bacteriología estaba en su infancia la población empezó a darse cuenta de los peligros que representaba descargar desechos humanos en los suministros de agua doméstica, el asunto se convirtió en materia de preocupación en cuanto a salud pública, y por lo tanto en un estímulo para controlar la contaminación.

Fue en Inglaterra y Estados Unidos donde se empezó a prestar atención a los problemas causados por el agua residual doméstica, pero las industrias textil, papelera, de tratamiento de pieles, metálica y otras se estaban ubicando a orillas de los ríos creando otros problemas que demandaban atención. Ya para 1915 en Inglaterra se afirmaba: es muy evidente que los procesos de fabricación se están volviendo más complicados desde los puntos de vista químico, bacteriológico y mecánico. En ausencia de una reglamentación sistemática, los residuos se convierten en una fuente de contaminación creciente. Algunas prácticas del uso de la tierra han tenido efectos considerables en las corrientes de agua de Estados Unidos. La deforestación ha resultado en la erosión del suelo y la alteración de las aguas freáticas, lo que a

su vez favorece las inundaciones o las sequías y los flujos bajos de las corrientes superficiales y las altas temperaturas en el verano. Las malas prácticas agrícolas han resultado en daños similares.

Las actividades mineras en busca de carbón y metales se volvieron importantes en el siglo XIX. El desagüe de las minas provocó que muchas aguas se convirtieran en inadecuadas para cualquier uso. Más tarde los residuos de petróleo también se convirtieron en un problema importante. Así, muchas **aguas superficiales** de Estados Unidos se hicieron inadecuadas para usos domésticos, agrícolas y algunos usos industriales. Los **efluentes** —aguas procedentes de las industriales— a altas temperaturas descargados en las aguas receptoras, aumentaban la temperatura de éstas con lo que disminuía su utilidad como aguas para utilizarse en sistemas de enfriamiento. Los residuos corrosivos dañaban el equipo industrial y las instalaciones portuarias. Los minerales hacían que algunas aguas fueran inadecuadas para usarse en calderas. Muchas industrias y comunidades fueron forzadas (con costos adicionales) a obtener su agua en lugares muy distantes.

Tendencias actuales

En años recientes, la contaminación del agua se ha reconocido como lo que es: una parte del grave problema del manejo de dicho recurso. El proveer agua ade-

cuada se ha convertido quizá en el problema más grande en relación con los recursos naturales. Resolverlo, sólo se logrará si se ponen en práctica programas completos de control de calidad. La mayor parte del agua usada para otros propósitos diferentes del de riego tendrá que reutilizarse varias veces antes de regresar a la atmósfera a través de la evaporación. El mantenimiento satisfactorio de la calidad de esta agua presenta problemas difíciles en los aspectos social, económico y tecnológico.

AGUA RESIDUAL

Las **aguas residuales** son el agua que ha sido empleada por una comunidad para diferentes usos. En América Latina, según la región o el país, se le asignan diferentes nombres: agua residual, agua negra, agua sucia, agua servida, agua sanitaria, agua cloacal, agua municipal, etc. La norma oficial mexicana sobre el tema define a las aguas residuales como las aguas de composición variada provenientes de las descargas de usos municipales, industriales, comerciales, agrícolas, pecuarias, domésticos y similares, así como la mezcla de ellas. De un modo general es posible afirmar que el agua residual está compuesta de:

- Residuos domésticos, incluye excremento humano y aguas de lavado, así como también todo lo que se arroja al alcantarillado.
 - Residuos industriales, formados por ácidos, grasas, materia vegetal y animal descargados por las fábricas.
 - Aguas subterráneas, superficiales y atmosféricas que entran al sistema de alcantarillado.
- La mayor parte de las aguas residuales (cerca de 90%) provienen del uso doméstico e industrial. El entendimiento de la naturaleza de las aguas residuales ayuda grandemente al diseño y la operación de plantas de tratamiento. Con este fin en esta parte se estudian las características físicas, químicas y biológicas del agua residual. Resulta oportuno remarcar que muchos de los parámetros se relacionan entre sí; por ejemplo: la temperatura, una propiedad física, afecta la actividad biológica, como los procesos de **osmorregulación** de los peces.
- Características físicas de las aguas residuales. La característica más importante de las aguas residuales es el contenido de sólidos totales, el cual se compone de materia flotante, materia sedimentable y materia en solución. Otras características físicas incluyen olor, temperatura, densidad, color y **turbidez**.
 - Características químicas de las aguas residuales. Las características químicas de las aguas residuales se concentran en los siguientes componentes: *i*) materia orgánica, *ii*) medición

del contenido orgánico, *iii*) materia inorgánica, y *iv*) gases. La medición del contenido orgánico es de suma importancia tanto en el diseño como en la operación de plantas de tratamiento de aguas residuales, así como en el manejo de la calidad del agua.

- Características biológicas de las aguas residuales. Es muy importante conocer las características biológicas del agua residual. Se requiere conocer: i) los principales grupos de microorganismos encontrados en las aguas superficiales y las aguas residuales, así como los que efectúan el tratamiento biológico, ii) los organismos patógenos encontrados en el agua residual, iii) los organismos usados como indicadores de contaminación y su importancia, iv) los métodos usados para contar los organismos indicadores, y v) los métodos usados para evaluar la toxicidad de las aguas residuales tratadas.

La composición del agua residual se refiere a la cantidad real de los constituyentes físicos, químicos y biológicos presentes en ésta. En ella, se encuentran materiales suspendidos, disueltos y flotantes. Las descargas domésticas contienen grandes cantidades de sólidos que en su mayoría son de naturaleza orgánica. Asimismo, durante la recolección general de las aguas residuales, se arrastran sólidos inorgánicos, como arcillas y arenas. Una gran variedad de

materiales orgánicos son solubles en agua. La mayoría de los compuestos orgánicos provienen de la descomposición de los sólidos orgánicos, mientras que las sustancias orgánicas sintéticas son resultado de las descargas de aguas residuales industriales. Los compuestos orgánicos disueltos en agua se dividen en dos categorías generales: i) **biodegradables** y ii) no biodegradables.

La materia orgánica biodegradable consiste en compuestos orgánicos que pueden ser utilizados como alimento por los microorganismos, dentro de un tiempo razonable. En forma disuelta son el producto de la descomposición microbiana de tejidos vegetales y animales, o pueden resultar de las descargas de aguas residuales. La cantidad de oxígeno consumida por los microorganismos al utilizar la materia orgánica es una medida de la cantidad de materia orgánica en las aguas residuales susceptibles de ser degradada por medios biológicos. Esta medida representa la **demanda bioquímica de oxígeno (DBO)**.

Algunos materiales orgánicos son resistentes a la degradación biológica (sustancias refractarias). En el caso de la degradación de material celular, por ejemplo, siempre queda un remanente formado por ácidos nucleicos y la membrana celular. Una forma más rápida de obtener un valor del contenido de materia orgánica consiste en la prueba de la **demanda química de oxígeno (DQO)**.

Mediante ésta es posible obtener la cantidad de materia orgánica biodegradable y no biodegradable que se oxida en un medio ácido utilizando un agente oxidante fuerte. La alcalinidad de las aguas residuales es una medida de su capacidad para neutralizar un ácido. Los bicarbonatos, carbonatos e hidróxidos representan las principales formas de alcalinidad. Asimismo, otras sales que incrementan la alcalinidad de las aguas, como los fosfatos, podrían estar presentes en los detergentes de las aguas residuales descargadas. De acuerdo con la concentración de estos constituyentes, el agua residual se puede clasificar como *fuerte*, *media*, o *débil*. Tanto los constituyentes

como las concentraciones reales varían con la hora del día, el día de la semana y otras condiciones locales. Las variaciones más grandes se encuentran en las comunidades que no regulan la recolección y el manejo o disposición de las aguas residuales. Los parámetros más comunes para la evaluación del grado de contaminación del agua residual doméstica sin tratar (tabla 1), incluyen los siguientes: sólidos totales, sólidos suspendidos, sólidos sedimentables, demanda bioquímica de oxígeno, demanda química de oxígeno, nitrógeno, fósforo, cloruros, sulfatos, alcalinidad, grasas y aceites, **coliformes** totales, compuestos orgánicos volátiles, etc.

Tabla 1. Parámetros más comunes para determinar el grado de contaminación del agua residual doméstica sin tratar.

Contaminantes	Concentración		
	Débil (mg/L)	Media (mg/L)	Fuerte (mg/L)
Sólidos totales	350	720	1200
Sólidos suspendidos	100	220	350
Sólidos sedimentables	5 ml/L	10 ml/L	20 ml/L
Demanda bioquímica de oxígeno	110	220	400
Demanda química de oxígeno	250	500	1000
Nitrógeno	20	40	85
Fósforo	4	8	15
Cloruros	30	50	100
Sulfatos	20	30	50
Alcalinidad	50	100	200
Grasas y aceites	50	100	150
Coliformes totales	106-107	107-108	107-109

TRATAMIENTO DE LAS AGUAS RESIDUALES

El tratamiento de las aguas residuales es la acción de eliminar las propiedades físicas, químicas y biológicas adquiridas por el agua en estado limpio como resultado de los diferentes usos que se le da en una comunidad. En otros términos, el objetivo principal del tratamiento de las aguas residuales es reducir al mínimo los efectos negativos ocasionados a las aguas naturales por la introducción de residuos, producto de las actividades humanas. Para alcanzar este objetivo, se aplican principios y procesos físicos, químicos y biológicos.

Los primeros estudios cuyo propósito fue la creación de técnicas de tratamiento de residuos, se dirigieron principalmente al control de las condiciones contaminantes en ríos y manantiales. A finales del siglo XIX, debido a que los ríos eran más pequeños en Inglaterra, el tratamiento de residuos recibió más atención ahí que en Estados Unidos. El tratamiento químico con sedimentación posterior se usó hasta cierto grado, antes de la aparición de los métodos basados en el conocimiento de la oxidación biológica de la materia orgánica, cuya ventaja principal es que no requieren grandes extensiones de terreno.

A finales del siglo XIX y principios del XX surgieron tres conceptos fundamentales basados en las investigaciones de científicos estadounidenses, ingleses y de otras nacionalidades.

- La conversión biológica aerobia de la materia orgánica disuelta de naturaleza inestable en materia estable.
- La descomposición biológica anaerobia de sólidos inorgánicos en humus relativamente inerte.
- Desinfección por cloración.

Todos los avances posteriores en la depuración de las aguas residuales se basan en los tres principios anteriores.

Resumiendo, el objetivo de estos tratamientos es, reducir la carga de contaminantes de las aguas descargadas y volverlas inocuas para el medioambiente. Para cumplir estos fines se usan distintos tipos de tratamiento dependiendo de los contaminantes que arrastre el agua y de otros factores más generales, como localización de la planta depuradora, clima, ecosistemas afectados, etc.

Tipos de tratamiento

Existen distintos tipos de tratamiento de las aguas residuales para retirar contaminantes. Es posible usar desde sencillos procesos físicos, como la sedimentación, en la que se deja que los contaminantes se depositen en el fondo por gravedad, hasta complicados procesos químicos, biológicos o térmicos. Entre ellos, los más usuales son:

a) Físicos

- Sedimentación
- Flotación. Natural o inducida.

- Filtración. Con arena, carbón, etc.
- Evaporación.
- Adsorción. Con carbón activado.
- Desorción (*stripping*). Se transfiere el contaminante al aire (ej.: amoníaco).
- Extracción. Con líquido disolvente que no se mezcla con el agua.

b) *Químicos*

- Coagulación-floculación. Agregación de partículas usando sales de Fe, Al, polielectrolitos, etc.
- Precipitación química. Eliminación de metales pesados haciéndolos insolubles con la adición de lechada de cal, hidróxido sódico u otros que aumentan el pH.
- Oxidación-reducción. Con oxidantes como el ozono, peróxido de hidrógeno, cloro, permanganato potásico, o reductores como el sulfito sódico.
- Reducción electrolítica. Hace que se deposite el contaminante en el electrodo. Se usa para recuperar elementos valiosos.
- Intercambio iónico. Con resinas que intercambian iones. Se usa para quitar dureza al agua.
- Osmosis inversa. Se hace pasar al agua a través de membranas semipermeables que retienen los contaminantes disueltos.

c) *Biológicos*. Usan microorganismos que se nutren con diversos compuestos de los que contaminan las aguas. Los **flócu-**

los que se forman por agregación de microorganismos son separados en forma de lodos.

- Lodos activados. Se añade agua que lleva microorganismos a las aguas residuales en condiciones aerobias (burbujeo de aire, o agitación de las aguas).
- Filtros bacterianos. Los microorganismos están fijos en un soporte sobre el que fluyen las aguas a depurar. Se introduce oxígeno para asegurar que el proceso sea aerobio.
- Biodiscos. Intermedio entre los dos anteriores. Grandes discos dentro de una mezcla de agua residual con microorganismos facilitan la fijación y la labor de los microorganismos.
- Lagunas aereadas. Se realiza el proceso biológico en lagunas de grandes extensiones.
- Degradación anaerobia. Utiliza microorganismos que no necesitan oxígeno para su metabolismo.

Niveles de tratamiento

Las aguas residuales se pueden someter a diferentes niveles de tratamiento, según el grado de purificación requerido. Es tradicional hablar de tratamiento primario, secundario, etc., aunque muchas veces la separación entre ellos no es totalmente clara. De este modo, se distinguen los siguientes:

- Tratamiento preliminar. Consiste en la eliminación mediante rejillas y cribas de residuos voluminosos, como madera, plásticos, telas, etc.; en algunos casos incluye un proceso de **aeración** previa.
- Tratamiento primario. Éste tipo de tratamiento hace sedimentar los materiales sólidos suspendidos usando tratamientos físicos o físicoquímicos. En algunos casos dejando simplemente en reposo las aguas residuales por un tiempo en grandes tanques, o en el caso de los tratamientos primarios mejorados, añadiendo al agua contenida en estos tanques sustancias químicas **quelantes** que hacen más rápida y eficiente la sedimentación. El tratamiento primario también incluye la neutralización del pH y la eliminación de contaminantes volátiles, como el amoníaco (**desorción**). Resumiendo, las operaciones que incluye son desaceitado, desengrase, sedimentación primaria, filtración, neutralización y desorción.
- Tratamiento secundario. El objetivo de éste tipo de tratamiento es eliminar las partículas coloidales y similares. Puede incluir procesos biológicos y químicos. El proceso secundario más habitual es un proceso biológico en el que se facilita que las bacterias **aerobias** digieran la materia orgánica que llevan las aguas. Este proceso se suele hacer conduciendo el efluente que sale del tratamiento primario a tanques donde se mezcla con agua cargada de **lodos activados** (microorganismos). Estos tanques tienen sistemas de burbujeo o agitación que crean condiciones aerobias para el crecimiento de los microorganismos. Posteriormente se conduce este líquido a tanques cilíndricos con fondo cónico, el agua ingresa por la parte superior, los sólidos sedimentables van a dar al fondo cónico, de donde son extraídos por gravedad o bombeo, y el líquido sobrenadante se extrae por la parte superior mediante una canaleta colectora y un vertedor. Separados los lodos, el agua que sale contiene menos impurezas.
- Tratamiento terciario o avanzado. Consiste en procesos físicos y químicos con los que se consigue limpiar las aguas de contaminantes como: fósforo, nitrógeno, minerales, metales pesados, bacterias, virus, parásitos, compuestos orgánicos, etc. Éste tratamiento es más caro que los anteriores y se usa en casos especiales, como la purificación de residuos de algunas industrias, en particular en los países más industrializados, o en las zonas donde la escasez de agua obliga a purificarla para volver a usarla como potable, en las zonas declaradas sensibles (**eutroficación**) en las que las descargas deben ser bajas en nitrógeno y fósforo, etc.

Tratamiento biológico de las aguas residuales

Por su importancia en este apartado se describe con mayor detalle el tratamiento biológico de las aguas residuales, así como los principales métodos. Una planta de tratamiento biológico de aguas residuales es un ecosistema artificial especializado. Se trata del intento humano de reducir en cuanto a espacio y tiempo los procesos de degradación de modo que no ocupen grandes extensiones de tierra, y se ha logrado combinando técnicas de ingeniería y métodos biológicos.

Lo anterior se basa en que los procesos biológicos (así como sus equivalentes: los procesos físicos y químicos) participantes en el tratamiento de las aguas residuales, ocurren casi en cualquier parte de la naturaleza, de un modo particular en las aguas naturales de la Tierra. Antes de que el ser humano introdujera desechos en estas aguas, todos los grupos de organismos que intervienen en la degradación de residuos ya estaban presentes. Los organismos utilizados en los sistemas artificiales de tratamiento biológico de aguas residuales son prácticamente los mismos que degradan a los residuos que llegan a las aguas naturales.

La hidrólisis, oxidación y reducción son procesos de degradación de los cuales depende el tratamiento biológico de las aguas residuales —y de hecho la vida misma; asimismo, en este tratamiento

interviene la síntesis de protoplasma nuevo. Como más adelante se explica, participan organismos de diferentes tipos. Por medio de las actividades individuales y en conjunto de estos organismos, los residuos orgánicos se convierten en bióxido de carbono, minerales, agua, calor, protoplasma nuevo y materiales orgánicos estables. La síntesis de protoplasma nuevo es esencial en la operación de los sistemas de tratamiento de aguas residuales, pero es necesario operarlos de tal manera que no se produzca protoplasma nuevo más de lo necesario, porque de otro modo el sistema requeriría demasiado trabajo para la disposición final.

La hidrólisis es el proceso mediante el cual los compuestos orgánicos e inorgánicos se descomponen por la adición de agua. Con frecuencia es un primer paso necesario en la degradación biológica de estos compuestos usualmente muy grandes para pasar a través de las membranas celulares. En los animales que participan en este proceso, incluidos los protozoarios que engloban el alimento antes de iniciar la digestión, la hidrólisis es interna. Las bacterias secretan a su medio externo enzimas hidrolíticas que dividen los nutrientes en fragmentos que pueden ser absorbidos.

La oxidación y la reducción son importantes en las reacciones químicas y bioquímicas implicadas en la degradación de materia orgánica. Anteriormente,

a la oxidación se le consideraba como la adición de oxígeno o la remoción de hidrógeno de una sustancia. A la reducción se le consideraba como el proceso inverso de lo anterior. Muchas reacciones que ahora son vistas como oxidaciones y reducciones no incluyen ni oxígeno ni hidrógeno, así que el concepto anterior se ha ampliado para incluir cualquier cambio en el número de electrones de una sustancia. Una sustancia que pierde uno o más electrones se dice que se oxida, y cuando los gana se reduce. En cualquier reacción en la cual una sustancia se oxida, otra se reduce.

Los procesos de óxido-reducción se llevan a cabo en presencia de oxígeno libre (condiciones aerobias) o en ausencia de éste (condiciones anaerobias). A los organismos adaptados a vivir sólo en presencia de oxígeno libre se les llama organismos **aerobios** y a los que están adaptados a vivir únicamente en ausencia de oxígeno libre se les llama organismos **anaerobios**. Los organismos **facultativos** son capaces de mantenerse en cualquiera de las dos condiciones. En los sistemas de tratamiento de aguas residuales aerobios, los organismos aerobios realizan la hidrólisis, oxidación y reducción de las sustancia de desecho.

Lagunas

Las lagunas de tratamiento a menudo se describen como un proceso sencillo y fácil de operar. El proceso podría descri-

birse como “simple” si no se mira lo que hay por debajo de la superficie del agua. Desde el punto de vista de los principios físicos, químicos y biológicos que se llevan a cabo, el proceso es altamente complicado.

Debido a las variaciones en la intensidad de la luz solar, las concentraciones de oxígeno disuelto (OD) varían considerablemente en las lagunas. Cuando el contenido de la laguna se sobresatura de oxígeno, éste escapa a la atmósfera con lo que ya no queda disponible para satisfacer la demanda de los residuos y las algas. Durante las horas en que se cuenta con luz de día, el pH del contenido de la laguna podría aumentar de 8 a 10. Con el incremento del pH, la alcalinidad disminuye a causa principalmente de la precipitación de carbonatos, bicarbonatos y sulfatos.

La caída del pH en la oscuridad es el resultado de la respiración de las algas y bacterias por la producción resultante de bióxido de carbono. Los efectos físicos en el funcionamiento de las lagunas son el resultado de las condiciones climatológicas como: viento, temperatura, capa de hielo y capa de nieve.

Entre los principales efectos causados por el viento en las lagunas se hallan: i) la mezcla del contenido de la laguna, interrumpiendo el proceso de tratamiento; ii) arrastra los sólidos depositados en el fondo; y iii) dispersa los gases y vapores olorosos.

Las temperaturas bajas disminuyen la actividad biológica en la laguna debido a que ésta experimenta el “efecto de congelación”, el cual reduce la eficiencia del tratamiento de las aguas residuales, además provocan la formación de una capa de hielo, lo cual inhibe la transferencia de oxígeno a partir de la atmósfera y reduce la penetración de la luz, lo cual da como resultado el crecimiento de algas.

Las altas temperaturas del verano también causan problemas en las lagunas. Provocan un crecimiento excesivo de algas, con la luz del día se sobresaturan de oxígeno disuelto, y durante la noche, se vuelven **anóxicas**, es decir con poco o sin oxígeno libre. De igual manera, en estas condiciones se generan olores desagradables, el crecimiento excesivo de las algas también dificulta cumplir con los valores de la DBO y los sólidos sedimentables. Algunos de los problemas en cuanto a operación de las lagunas son: crecimiento de maleza, erosión de los bancos (orillas) debido a la acción del oleaje y el arrastre por la lluvia, materia flotante (grasas y aceites, crecimientos de algas que forman capas gruesas), exfiltración, olores desagradables, y presencia de mosquitos y roedores.

Reactores por lotes en secuencia

Es un sistema de tratamiento de aguas residuales a base de lodos activados donde no entra ni sale material durante

la reacción, en su lugar, al inicio del proceso se introducen los materiales, se dejan reaccionar por un tiempo establecido y luego se descargan los productos. Los procesos unitarios empleados en los reactores por lotes secuenciales y en los sistemas convencionales de lodos activados son idénticos. En ambos sistemas se emplean procesos de aereación y de sedimentación-clarificación, pero existe una diferencia, en las plantas ordinarias los procesos se llevan a cabo simultáneamente en tanques separados, en tanto que en los reactores por lotes los procesos se llevan a cabo en el mismo tanque. Tal como se usan actualmente, todos los sistemas de reactores tienen cinco etapas en común, que se efectúan en secuencia de la manera siguiente:

- Llenado
- Reacción (aereación)
- Sedimentación (sedimentación-clarificación)
- Vaciado (decantado)
- Espera

El desecho de lodos es un paso importante que afecta en gran medida el desempeño del reactor, pero no se le incluye como una de las cinco etapas básicas porque no hay un periodo establecido dentro del ciclo dedicado para tal fin. La cantidad y frecuencia de la remoción de lodos las determinan los requerimientos del funcionamiento. En la ope-

ración de los reactores, la eliminación de lodos usualmente se realiza durante la etapa de sedimentación o en la de espera. Esta situación se complica cuando se tienen flujos máximos sostenidos que hacen que el tiempo de espera desaparezca. Otro problema muy común en la operación de los reactores también relacionado con los flujos máximos es que para cumplir con las cinco etapas del proceso, éstas se reducen en tiempo, lo cual resulta en un tiempo de aereación y un tiempo de sedimentación insuficiente, con el resultado final de un tratamiento ineficiente.

Filtro de goteo

El concepto de filtro de goteo se originó a partir del uso de filtros de contacto, los cuales eran tanques impermeables rellenos de roca quebrada. Durante la operación, el lecho de contacto se llenaba con agua residual desde la parte superior y se dejaba que el agua residual hiciera contacto con el medio por un tiempo corto. Después, el lecho se drenaba y se dejaba reposar antes de repetir el ciclo. Un ciclo típico requería 12 horas: 6 de operación y 6 de descanso. Las limitaciones del filtro de contacto eran: i) obstrucciones frecuentes, ii) periodo de descanso muy largo, y iii) carga tratada relativamente baja.

El filtro de goteo moderno consta de un lecho altamente permeable al cual se adhieren los microorganismos y a tra-

vés del cual el agua residual se hace gotear. El medio filtrante consiste usualmente en fragmentos de roca, o una variedad de materiales plásticos compactados. Los filtros llevan un sistema de drenes subterráneos para coleccionar el agua residual tratada y los sólidos desprendidos del medio filtrante. Este sistema de drenaje subterráneo es importante como unidad colectora y como estructura porosa a través de la cual circula aire. El líquido coleccionado se pasa a un tanque de sedimentación donde se separan los sólidos. En la práctica, parte del líquido coleccionado en el sistema de drenaje subterráneo se recicla, para diluir el agua residual de entrada y para mantener el limo biológico en condiciones húmedas.

El material orgánico que contiene el agua residual es degradado por una población de microorganismos adheridos al medio filtrante. Primero, los residuos orgánicos del líquido son absorbidos por la película biológica. Al crecer los microorganismos, el espesor de la capa de limo aumenta y el oxígeno disuelto se consume antes de alcanzar los estratos más profundos de la capa de limo. La comunidad biológica presente en el filtro incluye bacterias aerobias, anaerobias y facultativas, hongos, algas y protozoarios. Asimismo, están presentes lombrices, larvas de insectos, caracoles, etc.

Las bacterias facultativas son los microorganismos predominantes en el filtro de goteo, junto con las aerobias y

anaerobias, su función es descomponer el material orgánico contenido en el agua residual. Los hongos presentes son los organismos que estabilizan el agua residual pero su contribución es usualmente importante en condiciones de pH bajo o en ciertos residuos industriales. Las algas únicamente crecen en la parte superior del filtro donde llega la luz solar. Estos vegetales por lo general no intervienen de manera directa en la degradación de residuos, pero durante las horas de luz de día aportan oxígeno al agua residual en filtración. Desde el punto de vista operacional las algas son causa de problemas porque hacen que la superficie del filtro se tape produciendo malos olores.

Contactores biológicos rotatorios

El reactor biológico rotatorio de contacto (del inglés *Rotating Biological Contactor*), llamado también “contactor biológico rotativo” (CBR), es un sistema de tratamiento de aguas residuales que consiste en baterías de discos de diversos materiales plásticos —poliestireno o cloruro de polivinilo— colocados en paralelo que se sumergen secuencial y parcialmente (40%) en un depósito por donde circula el agua a tratar. Los biodiscos giran a baja velocidad (menos de 5 rpm) sobre un eje perpendicular.

Cuando los biodiscos se sumergen en el agua a depurar y se ponen en funcionamiento, la biomasa formada por

los microorganismos y otros sistemas biológicos se va fijando a la superficie del soporte (lo hace en más de 95%) y se va exponiendo al aire a medida que el disco gira, después se sumerge de nuevo en el agua para tomar contacto con la materia orgánica. Se suceden nuevos periodos de exposición al aire (oxigenación) e inmersión en el agua (alimentación). Así se va formando la **biopelícula** a expensas de la materia orgánica del agua que se está tratando. La concentración de esta película puede llegar a 30 000 mg/L. Esta alta concentración es el factor más importante de la alta eficacia de depuración en tiempos hidráulicos cortos del sistema. Además de contribuir a la transferencia de oxígeno y mantener la biomasa en condiciones aerobias, la rotación también es el mecanismo para remover el exceso de sólidos de los discos al ponerlos en suspensión para que puedan ser acarreados de la unidad a un clarificador.

Los contactores biológicos rotatorios usualmente se diseñan basándose en los factores de carga calculados con los resultados obtenidos en plantas piloto y a escala real, aunque su desempeño es comparable al de los filtros de goteo, así como los problemas que presenta.

Lodos activados

El proceso de lodos activados se inventó en Inglaterra en 1914 y se le nombró de esa manera porque entraña la produc-

ción de una masa activada de microorganismos capaces de estabilizar un residuo en forma aerobia. Los residuos orgánicos se introducen en un tanque donde se mantiene un cultivo bacteriano aerobio en suspensión. En estas condiciones, al contenido del tanque se le llama licor mezclado. El medioambiente aerobio en el tanque se logra mediante el uso de aereación difusa o mecánica, lo cual también sirve para mantener el licor en un estado de mezcla completa. La mezcla vigorosa de residuos, lodos y aire asegura que haya nutrientes y oxígeno para los microorganismos. En este punto, la comunidad biológica junto con los materiales adsorbidos forman la masa que experimenta **floculación**, conocida como lodos activados. En este proceso se mantiene siempre un flujo continuo de residuos a través de los tanques de aereación.

Después de un periodo específico, la mezcla de células nuevas y viejas se pasa a un tanque de sedimentación, donde las células se separan del agua residual tratada. Una parte de las células sedimentadas se recicla para mantener la concentración deseada de organismos en el tanque y la otra parte se desecha. El reciclado de los lodos activados es esencial para el proceso porque cualquier volumen de agua residual puede producir sólo alrededor de 5% de los lodos requeridos para el tratamiento de ésta. La parte que se desecha corres-

ponde al nuevo crecimiento celular. El valor al cual se debe mantener la masa biológica en el tanque depende de la eficiencia de tratamiento deseada y otras consideraciones relacionadas con la cinética de crecimiento. En el proceso de lodos activados, las bacterias son los microorganismos más importantes porque efectúan la descomposición del material orgánico proveniente de los **influentes**. Aunque las bacterias son los microorganismos que degradan los residuos orgánicos que aporta el influente, las actividades metabólicas de otros microorganismos también son importantes en el sistema de lodos activados. Por ejemplo, los protozoarios y los rotíferos actúan como pulidores del efluente. Los protozoarios consumen bacterias dispersas que no han experimentado floculación y los rotíferos consumen pequeñas partículas de flóculos biológicos que no han sedimentado.

Por otra parte, aunque es importante que las bacterias descompongan los residuos orgánicos lo más rápido posible, también es importante que formen un flóculo, lo cual representa un requisito para la separación eficiente de los sólidos biológicos en la unidad de sedimentación. Después de la unidad de sedimentación, a la cual también se le conoce como clarificador, el agua residual que ha sido tratada se envía a desinfección y posteriormente a la disposición final, o reutilización.

Los lodos de los tanques de sedimentación requieren disposición final o manejo, lo cual es un problema muy difícil debido a su gran volumen y propensión a descomponerse. La mayor parte del volumen consiste en agua, la cual constituye entre 94 y 99% del peso total. La remoción es un paso necesario en la disposición final de los lodos.

DISPOSICIÓN FINAL Y REUTILIZACIÓN DE LAS AGUAS TRATADAS

Aunque el tratamiento secundario es suficiente para la mayoría de las aplicaciones, en muchas localidades se requiere tratamiento avanzado. El riego fue probablemente el primer método de disposición del agua residual, aunque la dilución fue el método inicial adoptado por la mayoría de los municipios. Con el desarrollo industrial y urbano, la disposición o manejo de los efluentes y sus efectos en el medio ahora requieren una consideración especial. La descarga en aguas superficiales sigue siendo el método más común de disposición final del agua residual. No obstante, para proteger el medio acuático se han establecido estándares para las aguas descargadas en manantiales, ríos, costas, etc., muchos gobiernos han adoptado normas muy estrictas. En muchos lugares, se han diseñado plantas de tratamiento cuya ubicación hace posible utilizar una parte del efluente tratado para su aplicación en suelos, en el enfriamiento en la industria,

y para recarga de aguas subterráneas. Se espera que esta tendencia continúe aumentando en el futuro, en particular en las regiones áridas, semiáridas, y en localidades donde hay escasez de agua.

Por años, la disposición o manejo de efluentes en las aguas receptoras se efectuó a través de tubería abierta. La mezcla se llevaba a cabo de manera variable, dependiendo de las características naturales del agua receptora. Un aspecto importante de la disposición del efluente era que la capacidad de asimilación de las aguas receptoras, frecuentemente representaba la cantidad de materia orgánica que era posible descargar, ahora se le está poniendo más atención a los efectos ambientales de otros constituyentes, como sólidos suspendidos, nutrientes, compuestos tóxicos, así como a la forma en que pueden ser asimilados de manera segura en el medio acuático.

La disposición o manejo de efluentes se enfoca sobre el transporte de los contaminantes en el medioambiente y los procesos de transformación que ocurren. A fin de garantizar que la disposición de efluentes se lleve a cabo conforme a los requerimientos ambientales, en muchos casos se debe realizar un análisis riguroso. Para ello se emplean técnicas de modelado matemático, las cuales incluyen la aplicación de balances de materia para efectuar análisis de transporte y expresiones de cinética para describir la respuesta del sistema físico. Al construir

el modelo del sistema de un río, es posible evaluar la capacidad de asimilación de estos sistemas y así predecir los impactos de la descarga propuesta. Algunos de los parámetros afectados son: oxidación, conversiones bacterianas, descomposición natural, fotosíntesis y respiración.

COMENTARIOS

En muchas localidades donde el suministro de agua disponible se ha vuelto inadecuado para satisfacer las necesidades de los habitantes, está claro que el agua residual no debe ser vista como un residuo, sino como un recurso. Es de esperarse que este concepto se adopte de un modo más amplio en áreas donde existen problemas con el suministro de agua. Al presente se está analizando el impacto de la recolección, la conducción, el tratamiento y el reuso del agua residual tratada, ya que se espera que ésta

se vuelva más importante en el futuro. Después del tratamiento, el agua se puede reusar o manejar para su disposición final en el ambiente. El medio más común de disposición de aguas residuales es la descarga y dilución en manantiales, ríos, lagos, o el mar. Si se quiere evitar un impacto ambiental adverso, la calidad del efluente tratado debe concordar con los objetivos locales de calidad del agua. Los académicos del Laboratorio de Mutagénesis y Química Ambiental del CIGyA, cuentan con la experiencia suficiente para apoyar a comunidades e instituciones a resolver algunos de los problemas relacionados con las aguas residuales, a través de propuestas adecuadas para cada una de las condiciones existentes. Se debe además difundir la idea de que si todos somos parte del problema también debemos ser parte de las soluciones.

BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

Ciencias de la Tierra y del medio ambiente. Libro electrónico. Tema 1.1 "Contaminación del agua. Depuración de los vertidos". [En línea]. Disponible en: <http://www.tecnun.es/Asignaturas/ecologia/Hipertexto/11CAgu/180Depur.htm> [agosto de 2008].

Dague, R. 2000. Notes on Environmental Biotechnology Processes. Professor of Environmental Engineering. Department of Civil and Construction Engineering. Iowa State University. Ames, Iowa.

Keith, D. T. 2000. The Water Encyclopedia. Water Information Center, Inc.

Mitchell, R. 2000. *Introduction to Environmental Microbiology*. Div. of Engineering and Applied Physics. Harvard Univ. Prentice-Hall

Moran, J. M, M. D. Morgan, J. H. Wiersma. 1999. An introduction to Environmental Sciences. University of Wisconsin, Green Bay. Little, Brown and Company.

Stryer, L. 2001. *Biochemistry*. W. H. Freeman

- and Company.
- Tchobanoglous, G. and F. Burton. 2004. Wastewater Engineering. Treatment and Reu-se. 4th edition. Metcalf & Eddy.
- Warren, C. 1999. Biology and Water Pollution Control. W. B. Saunders Company. Print. No 9.
- Water Pollution Control Federation. 2004. Biological Hazards at Wastewater Treatment Facilities. Alexandria, Virginia.
- Water Pollution Control Federation. 2004. Activated Sludge. Alexandria, Virginia.
- William, T. K. 1996. Elements of Biological Science. W.W. Norton & Company

CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA: CAUSAS Y EFECTOS

Emma Socorro Soto Mora

Laboratorio de Fertilidad de Suelos

INTRODUCCIÓN

La atmósfera es la envoltura gaseosa que rodea a la Tierra y es el resultado de los cambios geológicos sucedidos en la evolución de ésta como parte del sistema solar, así como también de la acción continua de los seres vivos. A pesar de su composición, es más o menos estable y está siempre en equilibrio dinámico gracias a la actividad de los organismos autótrofos y heterótrofos, al igual que a la de los diversos fenómenos geoquímicos.

El aire útil para la vida se encuentra en una capa muy delgada llamada **troposfera**, la cual se define como la región de la atmósfera que se halla en contacto directo con la superficie terrestre y se extiende desde el nivel del suelo hasta unos 15 km de altitud. Es en esta capa donde ocurren todos los fenómenos meteorológicos que determinan el tiempo atmosférico y el clima. Asimismo, es el principal suministro de oxígeno del agua al establecerse un intercambio gaseoso continuo entre la troposfera y el agua. Los fenómenos meteorológicos, citados líneas atrás, son de suma importancia para el comportamiento de la troposfera, ya que al originar variaciones entre los componentes de ésta, modifican el comportamiento de las sustancias que se

hallan en el aire ambiente. El **aire ambiente** es la porción de la atmósfera externa a las construcciones en la cual no influyen directamente fuentes específicas de emisión de contaminantes y es representativa de una comunidad. Según las normas oficiales mexicanas expedidas por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, aire ambiente es la atmósfera en espacio abierto.

Por **contaminación atmosférica** se entiende la alteración de la atmósfera mediante la adición de gases o partículas sólidas y líquidas en suspensión, las cuales tienen efectos perjudiciales sobre la salud de los seres vivos y los elementos materiales, forma parte de las sociedades modernas y es una consecuencia de las actividades de transporte, la producción de bienes, la industria, los servicios y la recreación.

Desde hace ya mucho tiempo se habla del uso de combustibles fósiles en la industria, los automóviles y el hogar como causa de la contaminación atmosférica, de los primeros intentos de medición de ésta y de los graves efectos sobre los seres humanos, las plantas y los animales producidos por los contaminantes, como el bióxido y el monóxido de

carbono, los óxidos de nitrógeno y azufre, los compuestos orgánicos volátiles, los hidrocarburos, las partículas, etc.

Durante las últimas décadas, la calidad del aire en las principales ciudades del mundo, como Río de Janeiro, Sao Paulo, Delhi, Shanghai, Tokio, Londres, y ciudades de México, como la Ciudad de México, Monterrey, Guadalajara y Puebla, con sus zonas conurbadas, muestra una clara tendencia al deterioro. Lo anterior pone en riesgo la salud de la población, la capacidad de renovación y recuperación del ambiente y los recursos naturales a causa de la presencia de contaminantes en el aire-ambiente que se modifican en relación directa con la temperatura, la velocidad del aire y la cantidad de precipitación.

En estas páginas se aborda el problema de la contaminación atmosférica, sin perder de vista que la Naturaleza constituye un sistema donde todo es interdependiente y existen relaciones múltiples entre el aire, el agua y el suelo, elementos que constituyen el medio físico donde se desarrolla normalmente la vida, y junto con los seres vivos que en él se desarrollan constituye la **biosfera**. Si se considera el aire como un bien común limitado e indispensable para la vida, su calidad debe estar sujeta a normas que eviten su deterioro y preserven su pureza, a fin de garantizar el desarrollo normal de los seres vivos en la Tierra así como la conservación del patrimonio

natural y artístico de la humanidad.

COMPOSICIÓN DEL AIRE

El “aire puro” no existe puesto que hay un intercambio constante de materia entre los seres vivos, la **hidrosfera**, la atmósfera y la **litosfera**. El aire es una mezcla de gases, su composición en las partes más inferiores de la **troposfera** es: nitrógeno 78%; oxígeno 21%; el 1% restante está constituido por argón (0.94%), bióxido de carbono (0.04%), neón, helio, ozono y otros gases, así como por polvo procedente de la Tierra y vapor de agua, en cantidades variables de acuerdo con el lugar y las condiciones de éste.

Los componentes naturales del aire son esenciales para mantener los procesos biológicos, físicos y químicos necesarios para la vida en el planeta. El oxígeno es el gas más importante desde el punto de vista biológico pues es utilizado por los seres vivos en la **respiración**, mediante la cual obtienen la energía necesaria para realizar todas sus funciones; asimismo, en forma de ozono, interviene en la absorción de las radiaciones ultravioleta provenientes del Sol, que de llegar a la Tierra en toda su magnitud destruirían la vida animal y vegetal.

CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS

Como se señala en párrafos anteriores, se desconoce la composición del aire no contaminado. En teoría, el aire siempre

ha tenido cierto grado de contaminación debido a fenómenos naturales (erupción de volcanes, tormentas de viento, descomposición de plantas y animales, etc.). Sin embargo, cuando se habla de la contaminación del aire, los contaminantes son aquellos generados por la actividad del hombre (**antropógenos**).

Un **contaminante atmosférico** es toda materia o energía en cualquiera de sus estados físicos y formas que al incorporarse o actuar en la atmósfera altera o modifica la composición y la condición natural de ésta, y es capaz de perjudicar tanto la salud como el bienestar de las personas.

Fuentes de contaminación del aire

Los contaminantes encontrados en la atmósfera proceden de dos **fuentes** emisoras: las **naturales** y las **antropógenas**. En el primer caso, los contaminantes se deben a causas naturales; mientras que en el segundo, provienen de las actividades humanas.

Los contaminantes de origen natural provienen de los volcanes, los incendios forestales y la descomposición de la materia orgánica en el suelo y en los océanos (*véase la tabla 1*).

Tabla 1. Contaminantes naturales del aire.

Fuente	Contaminantes
Volcanes	Óxidos de azufre, partículas
Fuegos forestales	Monóxido y bióxido de carbono, óxidos de nitrógeno, partículas
Vendavales	Polvo
Plantas (vivas)	Hidrocarburos, polen
Plantas (en descomposición)	Metano, sulfuro de hidrógeno
Suelo	Virus, polvo
Mar	Partículas de sal

Por otra parte, todas las formas de contaminación antropógena son producto de fuentes muy variadas, como las chimeneas de instalaciones de combustión para generación de calor y electricidad, los vehículos automotores y los procesos industriales. Estas fuentes es posible clasificarlas en móviles y estacionarias (*véase la tabla 2*).

Tabla 2. Fuentes de emisión de contaminantes atmosféricos.

Estacionarias	Hornos, chimeneas, estufas de madera y carbón, quemadores de gas
	Producción de coque, carbón, fraccionamiento catalítico del petróleo, producción de asfalto, fundición de aluminio, industria de ferroaleaciones
	Centrales eléctricas de combustible y carbón, madera y turba, calderas industriales y comerciales
	Incineradores municipales e industriales, incineración de basura, incendios forestales y agrícolas
Móviles	Automóviles de gasolina y diésel, uso de llantas de hule, aviones y barcos

En la tabla 3 se muestra la proporción en porcentaje entre las emisiones naturales y las antropógenas para los distintos contaminantes.

Tabla 3. Proporción entre las emisiones primarias naturales y antropógenas para los distintos contaminantes.

Contaminante	Antropógenos %	Naturales %
Aerosoles	11.3	88.7
SO _x	42.9	57.1
CO	9.4	90.6
NO	11.3	88.7
HC	15.5	84.5

Las cifras anteriores muestran la mayor magnitud —en cuanto a emisiones globales— de las fuentes naturales de emisión de contaminantes en relación con las antropógenas, excepto en el caso de las emisiones de bióxido de azufre en que casi se igualan.

Atendiendo a la distribución espacial de estas emisiones se observa que en las regiones más industrializadas de Europa y Norteamérica las emisiones antropógenas de SO₂ alcanzan proporciones muy superiores a las naturales. De este modo, en el norte de Europa las emisiones antropógenas originan alrededor de 90% del azufre que circula en la atmósfera.

Otra circunstancia a considerar es que las fuentes de emisión antropógenas están concentradas, por lo general, en áreas urbanas e industriales. Este conjunto de circunstancias hace que la contribución de todas las emisiones antro-

pógenas al problema de la contaminación atmosférica a escala regional sea preponderante.

Las propiedades morfológicas, termodinámicas, químicas y físicas de los contaminantes —las cuales determinan el efecto sobre los organismos y el ambiente— dependen del origen, las condiciones de emisión, los mecanismos de formación, la composición atmosférica y las variables climatológicas.

CLASIFICACIÓN DE LOS CONTAMINANTES

En términos generales, las sustancias contaminantes pueden ser de naturaleza física, biológica, o química y pueden aparecer en todos los estados físicos (sólido, líquido, o gaseoso).

Contaminantes físicos

Los contaminantes físicos se caracterizan por un intercambio de energía entre los seres vivos y el ambiente en una magnitud, o velocidad, o ambas, tan altas que el organismo no es capaz de soportarlo. Los contaminantes físicos son formas de energía y entre ellos se distinguen: i) energía mecánica: ruido, vibraciones; ii) energía térmica: calor, frío; iii) radiaciones: ionizantes, no ionizantes.

Contaminantes biológicos

Son todos los agentes representados por organismos vivos (la mayoría suelen ser microorganismos, como bacterias, virus, hongos, etc.).

Contaminantes químicos

Los agentes químicos representan seguramente el grupo de contaminantes más importante debido a su gran número y a la omnipresencia en todos los campos laborales y en el medioambiente. Los agentes químicos aparecen en todos los estados físicos.

Por su origen, los contaminantes pueden clasificarse en i) primarios y ii) secundarios.

Contaminantes primarios

Los contaminantes primarios son aquellos que se emiten directamente a la atmósfera, las cuales provienen de fuentes diversas y originan la contaminación común y corriente. La lista de estos contaminantes es larga, pero los principales son los siguientes:

Monóxido de carbono (CO)

El monóxido de carbono es el contaminante del aire más abundante en la capa inferior de la atmósfera, se produce generalmente como resultado de alguno de los siguientes procesos químicos:

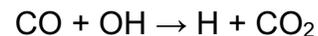
- Combustión incompleta del carbono.
- Reacción a elevada temperatura entre el CO₂ y algunos materiales que contienen carbono.
- Disociación del bióxido de carbono a altas temperaturas.
- Oxidación atmosférica del metano

(CH₄) procedente de la fermentación anaerobia (sin aire) de la materia orgánica.

- Proceso de producción y degradación de la clorofila en las plantas.

Los principales problemas de contaminación atmosférica por monóxido de carbono se deben a la combustión incompleta de combustibles fósiles en los automóviles, sobre todo cuando están mal afinados o durante los embotellamientos de tráfico. El CO se acumula en el aire de las zonas urbanas, cerca de las vías rápidas y las calles con gran movimiento vehicular, y su concentración varía en proporción al tráfico.

Se elimina del aire mediante la siguiente reacción:



Los radicales hidroxilo (OH[·]) se forman por la descomposición del agua con la luz ultravioleta.

Causa graves intoxicaciones por el uso inadecuado de estufas, braseros y calderas. La absorción se lleva a cabo por la nariz y la orofaringe, de donde pasa al torrente sanguíneo y se une a la hemoglobina para formar carboxihemoglobina, la cual interfiere con el transporte de oxígeno en la sangre, causando hipoxia aguda y la muerte. En la hipoxia aguda grave hay daño cerebral, renal, cardiovascular y plaquetario.

Bióxido de carbono (CO₂)

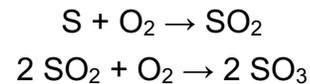
Se forma en la combustión de cualquier sustancia que contenga carbono. En zonas urbanas lo más frecuente es que se origine como resultado de la combustión de hidrocarburos. El bióxido de carbono antropógeno se incorpora al ciclo natural del carbono y causa el desequilibrio de éste. El CO₂ es el principal de los denominados gases de efecto invernadero — vapor de agua, metano, óxidos de nitrógeno, ozono y clorofluorocarbonados—, los cuales causan un paulatino incremento de la temperatura terrestre, el llamado cambio climático o calentamiento global.

Óxidos de azufre (SO_x)

El óxido de azufre que se emite a la atmósfera en mayores cantidades es el bióxido de azufre o anhídrido sulfuroso (SO₂), y en menor proporción, que no rebasa 1 o 2 por ciento del anterior, el trióxido de azufre o anhídrido sulfúrico (SO₃). El SO₂ es un gas incoloro, de olor picante e irritante, en concentraciones superiores a 3 ppm es 2.2 veces más pesado que el aire, a pesar de lo cual se desplaza rápidamente en la atmósfera, siendo un gas bastante estable. El SO₃ es un gas incoloro y muy reactivo que se condensa fácilmente; en condiciones normales, no se encuentra en la atmósfera, ya que reacciona rápidamente con el agua atmosférica, formando ácido sulfúrico (H₂SO₄). La combustión de cualquier sustancia que contenga azufre pro-

duce emisiones de SO₂ y SO₃; la cantidad de SO₃ producida depende de las condiciones de la reacción, en particular de la temperatura, y oscila entre 1 y 10 por ciento de los SO_x producidos.

Un mecanismo de formación de SO_x podría ser:



La segunda reacción se produce en pequeña escala y se efectúa muy lentamente a la temperatura de la atmósfera. El efecto neto de lo anterior es que la emisión de los SO_x se realiza fundamentalmente en forma de SO₂.

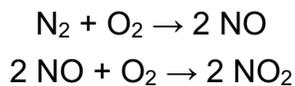
Por sus características físicoquímicas, todo el bióxido de azufre que se encuentra como contaminante del aire es irrespirable y su absorción a través de la mucosa respiratoria es directamente proporcional a su concentración en la atmósfera. Cuando se deposita en los tejidos de los seres humanos, junto con partículas higroscópicas se transforma en ácido sulfúrico y sulfatos que ocasionan el daño, lo cual depende también de la actividad física, la temperatura del aire (a menor temperatura el daño es mayor) y la integridad del aparato respiratorio.

Óxidos de nitrógeno (NO_x)

Óxidos de nitrógeno es el nombre que se aplica a varios compuestos químicos gaseosos formados por la combinación de

oxígeno y nitrógeno. En función de la valencia atómica que utilice el nitrógeno reciben distintos nombres y tienen distintas formulaciones.

El oxígeno y el nitrógeno del aire reaccionan para formar NO, éste posteriormente se oxida a NO₂.



El monóxido de nitrógeno y el bióxido de nitrógeno constituyen dos de los óxidos de nitrógeno más importantes desde el punto de vista toxicológico; ninguno de los dos es inflamable. La mayor parte de los NO_x emitidos a la atmósfera lo son en la forma NO.

Los óxidos de nitrógeno se liberan al aire desde el escape de vehículos motorizados (sobre todo diésel y con mezcla deficiente), de la combustión del carbón, petróleo o gas natural, y durante procesos como la soldadura de arco, galvanoplastia, grabado de metales y detonación de dinamita. También son producidos comercialmente al hacer reaccionar el ácido nítrico con metales o con celulosa.

Los óxidos de nitrógeno, una vez liberados al aire por las combustiones forman, a través de reacciones fotoquímicas, contaminantes secundarios; por ejemplo, nitrato de peroxiacetilo, el cual forma parte del smog fotoquímico, característico de las zonas con gran concentración de vehículos.

Los NO_x son altamente tóxicos, afectan los pulmones mediante mecanismos irritantes, y se ha comprobado que en los seres humanos disminuyen la resistencia a las infecciones de las vías respiratorias y aumentan la susceptibilidad a las sustancias broncoconstrictoras, siendo más susceptibles los individuos asmáticos.

Partículas (aerosoles)

El término aerosol o partícula se utiliza a veces indistintamente, ya que los aerosoles atmosféricos se definen como dispersiones de sustancias sólidas o líquidas en el aire.

Las propiedades de los aerosoles que más afectan a los proceso de contaminación atmosférica son el tamaño de las partículas, la forma y la composición química. El tamaño de las partículas oscila entre 1 y 1 000 micrómetros, aunque existen algunas fuera de estos límites. En la atmósfera, las partículas de tamaño inferior a 1 micrómetro se mueven al azar, produciéndose choques entre ellas que originan agregados de mayor tamaño en un proceso denominado **coagulación**. Las partículas de tamaños comprendidos entre 1 y 10 micrómetros tienden a formar suspensiones mecánicamente estables en el aire, por lo que reciben el nombre de **materia en suspensión**, que son trasladadas a grandes distancias por la acción de los vientos. Las partículas mayores de 10 micrómetros

permanecen en suspensión en el aire durante períodos relativamente cortos. El tamaño de las partículas es un factor muy importante en la determinación tanto de los efectos que producen como de las áreas afectadas, ya que establece el tiempo de permanencia en la atmósfera y la facilidad con que se introducen en las vías respiratorias bajas o inferiores.

La composición química varía mucho de unas partículas a otras, lo que depende fundamentalmente del origen. Las partículas de polvo procedentes del suelo están formadas principalmente por compuestos de calcio, aluminio y silicio, mientras que el humo procedente de la combustión del carbón, petróleo, madera y residuos domésticos contiene muchos compuestos orgánicos. En la combustión del carbón y las gasolinas se liberan metales pesados que pasan a formar parte de la atmósfera, generalmente en forma de óxidos metálicos.

Cuando es elevada la cantidad de partículas en el aire se altera el equilibrio de la radiación y se puede enfriar o calentar la atmósfera según su composición. Los principales precursores del aerosol urbano son los productos de los procesos de oxidación del bióxido de azufre, los óxidos de nitrógeno y el amoníaco, de este modo, las partículas finas (menores de 2.5 micrómetros) están constituidas principalmente por sulfatos, nitratos, iones de amonio, ácidos, cloruros, agua, metales, carbón elemental y

orgánico. Las partículas gruesas (entre 2.5 y 10 micrómetros) están constituidas por Si, Al, Ti, Mg, Fe, CaCO₃, NaCl, polen, esporas hongos, fragmentos de plantas y animales.

Hidrocarburos (HC)

Son sustancias que contienen hidrógeno y carbono. El estado físico de los hidrocarburos, de los que se conocen decenas de millares, depende de la estructura molecular y en particular del número de átomos de carbono que forman su molécula. Los hidrocarburos que contienen de uno a cuatro átomos de carbono son gases a la temperatura ordinaria, siendo estos los más importantes desde el punto de vista de la contaminación atmosférica, ya que favorecen la formación de las reacciones fotoquímicas.

Contaminantes secundarios

Los contaminantes secundarios no se vierten directamente a la atmósfera desde las fuentes de emisión, sino que se forman en ésta como consecuencia de las transformaciones y reacciones químicas y fotoquímicas que experimentan los contaminantes primarios en el seno de la atmósfera.

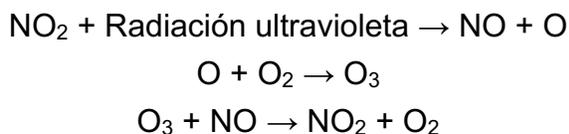
Contaminación fotoquímica

La contaminación fotoquímica se produce como consecuencia de la aparición en la atmósfera de compuestos oxidantes, originados al reaccionar entre sí los óxi-

dos de nitrógeno, los hidrocarburos y el oxígeno en presencia de la radiación ultravioleta de la radiación solar. La formación de los oxidantes es favorecida por situaciones estacionarias de altas presiones (anticiclones) relacionadas con una fuerte insolación y vientos débiles que dificultan la dispersión de los contaminantes primarios.

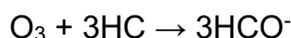
El mecanismo de formación de los oxidantes fotoquímicos es complejo, realizándose por etapas a través de una serie de reacciones químicas. El proceso completo se resume en las tres etapas siguientes:

- Formación de oxidantes mediante el ciclo fotolítico del NO_2



- Formación de radicales libres activos

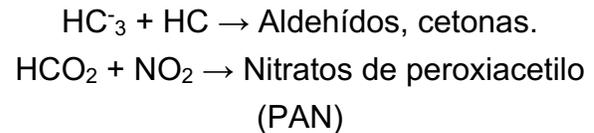
La presencia en el aire de hidrocarburos hace que el ciclo fotolítico se desequilibre debido a la reacción de éstos con el oxígeno atómico y el ozono generado, produciéndose radicales libres muy reactivos.



- Formación de productos finales

Los radicales libres formados reaccio-

nan con otros radicales, los contaminantes primarios y los constituyentes normales del aire, originando los contaminantes fotoquímicos según las reacciones:



La mezcla resultante de todas estas sustancias da origen a la denominada contaminación fotoquímica. Este tipo de contaminación se presenta cada vez con más frecuencia en las grandes ciudades de los países industrializados. A este respecto, resulta interesante el estudio de la variación durante el día de la concentración de los contaminantes que intervienen en el mecanismo de formación de los oxidantes fotoquímicos. En las primeras horas de la mañana, al comenzar la actividad humana en las grandes ciudades (encendido de las calefacciones y tráfico intenso) se produce una intensa emisión de hidrocarburos (HC) y óxido nítrico o monóxido de nitrógeno (NO). El NO se oxida a óxido nitroso o bióxido de nitrógeno (NO_2), con lo cual aumenta la concentración de este último en la atmósfera. Las concentraciones superiores de NO_2 , unido a que la radiación solar se va haciendo más intensa, ponen en marcha el ciclo fotolítico del NO_2 ; el cual genera oxígeno atómico que al transformarse en ozono resulta en un aumento de la concentración de este

elemento y de radicales libres de hidrocarburos. Estos, al combinarse con cantidades apreciables de NO, producen una disminución de este compuesto en la atmósfera. Este descenso en la concentración de NO impide que se complete el ciclo fotolítico, con lo cual aumenta rápidamente la concentración de ozono (O₃). El ozono es el oxidante que constituye materia de preocupación debido a su biorreactividad y concentración inherentes. Induce diversos efectos en los seres humanos y los animales de experimentación a las concentraciones halladas en muchas áreas urbanas. Estos efectos incluyen alteraciones morfológicas, funcionales, inmunitarias y bioquímicas. Debido a su poca hidrosolubilidad, una porción del ozono inhalado penetra profundamente en los pulmones, pero su reactividad es tal que 17 y 40% queda retenido en la nasofaringe de ratas y seres humanos en reposo, respectivamente. Puesto que la penetración del ozono aumenta con el incremento del volumen de la ventilación pulmonar y de la tasa de flujo, el ejercicio incrementa la dosis que alcanza el área blanco.

Contaminantes criterio

Los contaminantes más abundantes y perjudiciales para la salud y el bienestar de los seres humanos reciben el nombre de **contaminantes criterio** y sirven como referencia para medir la calidad del

aire, además de que sus efectos en humanos, plantas o materiales se hallan bien documentados. Se les llamó así porque fueron objeto de evaluaciones publicadas en documentos de calidad del aire en Estados Unidos, con el propósito de establecer concentraciones permisibles que protegieran la salud, el ambiente y el bienestar de la población.

Actualmente en muchos países ha sido adoptado el término “contaminantes criterio”, y son los siguientes:

- Monóxido de carbono (CO)
- Bióxido de azufre (SO₂)
- Bióxido de nitrógeno (NO₂)
- Ozono(O₃)
- Material particulado
- Plomo (Pb)

Con el fin de controlar la emisión de éstos contaminantes criterio se han establecido guías y normas. Las guías son recomendaciones que determinan los niveles de exposición a contaminantes atmosféricos, a fin de reducir los riesgos o proteger de los efectos nocivos. Las normas establecen las concentraciones máximas de los contaminantes atmosféricos que se permiten durante un período definido, estos valores límite son diseñados con un margen de protección ante los riesgos y tienen la finalidad de proteger la salud humana y el medioambiente (véase *la tabla 4*).

Tabla 4. Valores normados para los contaminantes del aire en México.

Contaminante	Valores límite			Normas Oficiales Mexicanas
	Exposición aguda		Exposición crónica	
	Concentración y tiempo promedio	Frecuencia máxima aceptable	Protección de la salud (población susceptible)	
Ozono (O ₃)	0.11 ppm (1 h) (216 µg/m ³)	1 vez cada 3 años		NOM-020-SSA1-1993
Monóxido de carbono (CO)	11 ppm (8 h) (12 595 µg/m ³)	Una vez al año		NOM-021-SSA1-1993
Bióxido de azufre (SO ₂)	0.13 ppm (24 h) (341 µg/m ³)	Una vez al año	0.03 ppm (media aritmética anual)	NOM-022-SSA1-1993
Bióxido de nitrógeno (NO ₂)	0.21 ppm (1 h) (395 µg/m ³)	Una vez al año		NOM-023-SSA1-1993
Partículas Suspensas Totales (PST)	260 µg/m ³ (24 h)	Una vez al año	75 µg/m ³ (media aritmética anual)	NOM-024-SSA1-1993
Partículas con diámetro menor a 10 µm (PM10)	150 µg/m ³ (24 h)	Una vez al año	50 µg/m ³ (media aritmética anual)	NOM-025-SSA1-1993
Plomo (Pb)			1.5 µg/m ³ (media aritmética en tres meses)	NOM-026-SSA1-1993

Fuente: Diario Oficial de la Federación, diciembre de 1994.

EFFECTOS DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

La contaminación atmosférica influye directamente sobre la salud de los seres humanos y provoca el deterioro de los recursos naturales, por lo que se requiere aplicar las medidas necesarias para disminuir los efectos. Las plantas resultan dañadas por los contaminantes, en particular el bióxido de azufre (SO₂), el cual blanquea las hojas y afecta el rendimiento de las cosechas. El aire contaminado corroe los metales, las telas se debilitan y destiñen, el cuero se hace más débil y más brillante, la pintura se decolora, las piezas de mármol y otras rocas se ennegrecen y hacen más frágiles. Existen pruebas de que la contami-

nación del aire se relaciona con enfermedades de tipo respiratorio, incluyendo bronquitis crónica y asma.

Para que haya un efecto en la salud de un individuo, éste debe estar expuesto al contaminante, es decir, entrar en contacto físico con él. El patrón de exposición de una persona a un contaminante depende de tres factores:

- El tiempo que la persona pasa en diferentes microambientes (escuela, casa, oficina, automóvil, autobús, o alguna calle congestionada).
- La concentración del contaminante en cada uno de estos microambientes.
- La **tasa ventilatoria** de la persona, determinada por el tipo de actividad

que realiza (dormir, caminar, hacer ejercicio intenso).

Aunque no hay un umbral identificado para observar los efectos en la salud causados por los contaminantes atmosféricos, los límites establecidos de concentración de contaminantes tienen márgenes adecuados de seguridad que dependen tanto de los efectos potenciales, como del tamaño de la población expuesta y de lo que ocurre en un nivel dado de contaminación.

Algunos autores consideran que la contaminación del aire es una de las causas principales de cáncer pulmonar en el ser humano, y que es importante tanto la fase gaseosa como la particulada. Esta última se considera como la de mayor riesgo para la salud humana, por lo que su estudio reviste un gran interés.

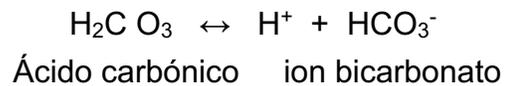
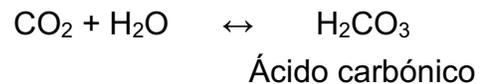
Las partículas suspendidas totales (PST) han sido señaladas como uno de los mejores indicadores de contaminación, al ser uno de los agentes más tóxicos de la mezcla de los diferentes contaminantes atmosféricos que contribuyen en mayor proporción a la morbilidad y la mortalidad humanas; en cuanto a estas variables, el riesgo aumenta conforme disminuye el tamaño de la partícula respirable.

Lluvia ácida

La lluvia ácida es uno de los problemas ambientales más graves que afecta a muchas regiones del mundo, abarca

también la niebla y nieve ácidas, consiste en la precipitación atmosférica de ácido. Sus consecuencias son ecológicas y de efectos directos sobre la salud humana.

La lluvia ácida natural tiene un pH de 5.6, debido a la presencia de CO₂, el cual forma ácido carbónico, que se ioniza parcialmente para liberar un ion hidrógeno, con la consecuente reducción en el pH del sistema, es decir lluvia con pH menor a 5.



Los ácidos predominantes son el ácido sulfúrico y el ácido nítrico que se forman como a continuación se describe: el óxido nítrico no es particularmente soluble en agua y el ácido sulfuroso producido por el dióxido de azufre, una vez disuelto, es un ácido débil. Los contaminantes primarios se convierten en un período de horas o días en contaminantes secundarios: ácido sulfúrico y ácido nítrico.

Consecuencias de la lluvia ácida

La lluvia ácida genera graves daños ambientales y de ahí su importancia desde el punto de vista ecológico. Sin lugar a dudas, existen diferencias entre algunos ecosistemas que los hacen más suscep-

tibles que otros. Las características biológicas de los suelos más afectados son: los formados por partículas gruesas principalmente sobre granito, de poca profundidad y no calcáreos, presentan poca capacidad de procesar la materia orgánica lo cual genera que toda sustancia que ingresa al ecosistema sea eliminada de forma lenta. Es necesario pensar que además del daño producido por medio del suelo existe un daño directo sobre los vegetales producido por los tóxicos presentes en la lluvia ácida.

Uno de los ecosistemas más afectados por la lluvia ácida son los acuáticos y en especial aquellos de agua dulce. Esto es así porque cuando se depositan los tóxicos presentes en la lluvia ácida generan una disminución del pH del agua y los seres vivos que habitan dentro (peces, crustáceos y plantas acuáticas) no soportan niveles de acidez mayores a un pH de 5. Esto provoca irremediablemente la muerte de ellos e incluso algunos lagos del norte de Europa se ha descrito que han quedado totalmente estériles (sin presencia de organismos vivos) luego de la contaminación por lluvia ácida. Otras consecuencias de la lluvia ácida son:

- Reducción en la capacidad de crecimiento de algunas plantas, incluso aquellas que crecen en agua dulce.
- Disminución del carbono orgánico di-

suelto en el agua superficial, por lo tanto hay más penetración de la luz UV en las capas más profundas de los lagos.

- Deterioro del suelo por la lixiviación de nutrientes de las plantas principalmente cationes, como el potasio, calcio y magnesio.
- Aumento en la concentración de Al_3^+ en lagos acidificados, con la consecuente disminución de peces.
- Estrés en los árboles por la lluvia ácida, el ozono troposférico y los oxidantes presentes en el aire.

COMENTARIOS

La contaminación del aire puede percibirse con facilidad, en particular en los grandes conglomerados urbanos. Sin embargo, más allá de la percepción de que el aire se vea sucio, es necesario evaluar de manera cuantitativa su calidad, mediante la medición de las concentraciones en que se presentan, desde los puntos de vista espacial y temporal, los contaminantes nocivos para la salud. Al comparar estas mediciones con las normas nacionales e internacionales, resulta posible determinar si la calidad del aire es satisfactoria o no, y en este último caso, establecer programas de control para la defensa del ambiente y la protección a la salud de la población, en particular la más susceptible, es decir niños y ancianos.

BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

- Albert, L. A. 1998. *Curso Básico de Toxicología Ambiental*. UTEHA-Noriega Eds., Méx.
- Albert, L. A. 2004. *Toxicología Ambiental*. Univ. Aut. de Ciudad Juárez, México.
- Amador-Muñoz, O. 1996. Determinación de hidrocarburos aromáticos policíclicos en la fracción orgánica asociada a las aeropartículas de la ciudad de México. Tesis de Licenciatura. UATx.
- Baird, C. 2001. *Química Ambiental*. 2ª ed. Editorial Reverté, S.A., Barcelona.
- Caselli, M. 1992. *La contaminación atmosférica. Causas y fuentes. Efectos sobre el clima, la vegetación y los animales*. Siglo Veintiuno Editores, México.
- Duffus, J. H. 1983. *Toxicología Ambiental*. Ediciones Omega, Barcelona.
- Finlayson-Pitts, J. B. y N. J. Pitts, Jr. 1986. *Atmospheric Chemistry: Fundamental and experimental techniques*. John Wiley and Sons, New York.
- INE 2007. Contaminantes criterio. (En línea). Disponible en: http://www.ine.gob.mx/dgicur/calair/cont_criterio.html. (11 de abril, 2008).
- Juárez-Rosete, M. E. 2005. Determinación de la materia orgánica extraíble (MOE) asociada a la masa de partículas suspendidas totales (PST) en el aire de Tlaxcala durante el 2003. Tesis de Licenciatura. UATx.
- Klaassen, C. D. y J. B. Watkins III. 2001. *Casarett and Doull's Manual de Toxicología: la ciencia básica de los tóxicos*. 5a Ed. McGraw-Hill Interamericana. Méx. D. F.
- Marcano, J. E. 2007. Educación ambiental en la República Dominicana. Los recursos naturales. La contaminación atmosférica. (En línea). Disponible en: <http://www.jmarcano.com/recursos/contamin/catmosf.html>. (10 de abril, 2008).

TOXICOLOGÍA AMBIENTAL

Edelmira García Nieto

Laboratorio de Toxicología Ambiental

Elvia Ortiz Ortiz

Doctorado en Ciencias Ambientales, UAGro.

INTRODUCCIÓN

Día a día en nuestro mundo se hace evidente la necesidad de crear una conciencia de cuidado del ambiente. Las actividades industriales indispensables para la vida moderna han generado una serie de riesgos a causa de la liberación al ambiente de sustancias químicas, los cuales es probable se acentúen en los países en desarrollo a causa de la carencia de recursos económicos, tecnológicos, científicos y humanos para enfrentarlos. Los diversos escenarios de exposición a las sustancias químicas incluyen las zonas agrícolas donde se utilizan plaguicidas, las áreas industriales en las que la exposición ocupacional o la accidental son importantes, así como también los ambientes naturales. Los efectos dañinos producidos por dichas sustancias en los ecosistemas, han creado una preocupación social que va más allá de la mera inquietud por las consecuencias perjudiciales para la salud humana. Los seres humanos están conscientes de las consecuencias derivadas de las alteraciones ambientales, ya que son sabedores de que por fuerza están relacionados

con todos los elementos del ambiente.

Una de las disciplinas que se encarga de abordar el problema de los riesgos generados por la presencia de sustancias tóxicas en el ambiente es la **toxicología ambiental**, la cual se define como la ciencia que estudia los efectos de los contaminantes químicos ambientales sobre los organismos vivos y de qué manera afectan al ecosistema. En cierta forma, esta ciencia nace en la Primera Guerra Mundial (1914-1918) cuando las tropas alemanas en la guerra de trincheras (forma de hacer la guerra en la cual los ejércitos combatientes mantienen líneas estáticas de fortificaciones cavadas en el suelo) utilizaron el gas cloro como arma de combate. Con este suceso surge también la guerra química, la cual consiste en la utilización de las propiedades tóxicas de sustancias químicas para matar, herir o incapacitar al enemigo. Inicialmente se utilizaron agentes incapacitantes como el gas mostaza y agentes letales como el fosgeno (el gas a partir del cual se producen los plaguicidas

organofosforados). Como consecuencia de lo anterior, surge la necesidad de reconocer, identificar y cuantificar el riesgo derivado de la exposición ocupacional, accidental, o natural a los compuestos químicos presentes en el agua, suelo, aire y alimento mediante el uso de **biomarcadores**; todo ello con el fin de evaluar los efectos en la salud pública.

Tradicionalmente, los toxicólogos han estado ligados de un modo inseparable al descubrimiento y el desarrollo de nuevos compuestos químicos, pero también participan en la elaboración de estándares y guías cuyo objetivo es proteger la salud humana y el ambiente de los efectos adversos ocasionados por algunos **xenobióticos**, al tiempo que extienden sus estudios a la flora y la fauna. La complejidad de los problemas ambientales hace obligada la multidisciplinariedad para evaluar el riesgo en la salud humana y el riesgo ecotoxicológico en sitios potencialmente peligrosos. Lo anterior supone entender el comportamiento de los compuestos tóxicos en el ambiente y su interacción con los organismos vivos, conocer los mecanismos de toxicidad mediante los cuales modulan el crecimiento y la diferenciación celular, y finalmente, buscar alternativas de remediación, prevención, o ambas, que permitan eliminar o disminuir la exposición a esos xenobióticos. Algunas de las disciplinas en que la toxicología ambiental se

apoya para lograr lo anterior son química, biología, medicina, geología, ecología, y muchas otras más.

Hacia 1955, Arnold Lehman, pionero de la toxicología estadounidense, hizo hincapié en lo complicado de esta área con su frase: "Tú puedes ser toxicólogo en dos sencillas lecciones, cada una de diez años". Esta frase debe llevar a reconocer que el trabajo no es fácil, pero también que cada resultado acerca un poco más al objetivo que la investigación persigue: "el mejoramiento de la calidad de vida".

LA TOXICOLOGÍA FRENTE A LA PROBLEMÁTICA AMBIENTAL

Aspectos históricos

Aunque la toxicología, como una disciplina científica reconocida formalmente, es relativamente nueva, la ciencia en sí es tan antigua como la humanidad misma. Es de suponer que los cazadores y recolectores de la prehistoria ya tenían conocimiento de las propiedades tóxicas de algunas sustancias minerales, animales y vegetales. La experiencia ha enseñado a los seres humanos qué sustancias resultan perjudiciales y cuáles no lo son tanto. Las primeras observaciones cuidadosas de las plantas y los animales con propiedades tóxicas se utilizaron no sólo para evitarlos sino para elaborar armas. En el Paleolítico, el ser humano impregnaba las puntas de sus flechas con los extractos de plantas tóxicas para

de esta manera aumentar el daño a sus presas de caza o sus semejantes. De ahí el origen del vocablo tóxico, del griego toxon, punta de flecha, y por extensión, veneno que se aplica en la punta de la flecha.

Uno de los tratados médicos más antiguos que más información contienen sobre venenos es el papiro de Ebers, escrito en el antiguo Egipto cerca del año 1500 a. de C. En este documento se hace referencia a venenos que aún hoy se reconocen por su potente toxicidad, tales como la aconita y el opio; metales, como el plomo, cobre y antimonio; y algunos alcaloides, como la digitalina y la belladona.

Hipócrates, cerca del año 400 a. de C., al escribir sobre los principios de la toxicología clínica cita la biodisponibilidad de xenobióticos en terapias y sobredosis. Teofrasto (372–287 a. de C.), en su libro *Historia Plantarum* (Historia de las plantas), hace bastantes referencias a los venenos de origen vegetal. Cuenta la leyenda de Mitrídates VI, rey del Ponto (132-63 a. de C.), en lo que actualmente es el noreste de Turquía, que éste poseía una gran resistencia a los venenos. Con el propósito de encontrar un antídoto que lo protegiera de posibles envenenamientos, acostumbraba experimentar los efectos de venenos de reptiles y sustancias tóxicas con delincuentes convictos y consigo mismo, dicho antídoto era el mitridato, una mezcla de sustancias

vegetales y animales atribuida a su invención, que le permitió inmunizarse. Cuando fue derrotado por los romanos, Mitrídates VI intentó suicidarse ingiriendo veneno para evitar su captura, pero al estar inmunizado debió recurrir a uno de sus oficiales para que le provocase la muerte a golpe de espada. Fue Dioscórides (40-90 d. de C.), durante la época del emperador romano Nerón, quién realizó la primera clasificación de venenos según su origen: animal, vegetal y mineral, la cual perduró 16 siglos después. Su obra *De Materia Médica* tuvo una amplia difusión y se convirtió en el principal manual de **farmacopea** durante toda la Edad Media y el Renacimiento.

El médico, filósofo y matemático judío Maimónides (1135-1204) escribió varios tratados, como el *Tratado sobre los venenos y sus antídotos*, el cual fue utilizado como texto de toxicología en toda la Edad Media y contiene recomendaciones para las picaduras de insectos y las mordeduras de serpientes y perros. Ya desde entonces describe como la leche, la mantequilla y la crema de vaca disminuyen la absorción intestinal de algunos compuestos, actualmente se conoce el mecanismo por el cual el calcio, presente en la leche, retrasa la absorción intestinal del plomo.

“Todas las sustancias son tóxicas sólo la dosis hace la diferencia entre un veneno y un remedio” es la frase célebre de Philippus Aureolus Theophrastus

Bombastus von Hohenheim, el alquimista, médico y astrólogo suizo quien fuera conocido como Paracelso, (1493-1541). Sin duda una de las figuras más importante de la Edad Media en cuanto a ciencia y medicina se refiere, a Paracelso se le conoce como el padre de la toxicología. Los peligros para los trabajadores mineros de la exposición ocupacional al mercurio y el plomo quedaron plasmados en su libro “*Sobre el mal de las minas y otras enfermedades de los mineros*”. Bernardino Ramazzini (1633-1714), conocido como el padre de la toxicología ocupacional, continuó el trabajo de Paracelso con su obra clásica publicada en 1700 y titulada “*Tratado sobre las enfermedades de los trabajadores*”. Considerada como la piedra angular de la medicina del trabajo, examina la exposición a sustancias tóxicas no sólo de mineros sino también de pintores, alfareros y tejedores. Por otra parte, el médico inglés Percival Pott (1714-1788) en 1775 encuentra una relación entre la exposición al hollín y la alta frecuencia de cáncer escrotal entre los limpiadores de chimeneas. Este fue el primer ejemplo descrito de carcinogenicidad por **hidrocarburos aromáticos policíclicos** (HAPs). En la actualidad hay pruebas de que en el hollín se acumulan compuestos orgánicos, como HAPs, dioxinas y furanos, generados durante la combustión de la madera, y se sabe de la gran **carcinogenicidad** de éstos.

Al médico y químico español Mateo Orfila (1787-1853) se le conoce como el padre de la toxicología forense, fue el primero que utilizó los resultados de las autopsias y el análisis químico para el esclarecimiento de hechos criminales. Durante el siglo XIX ocurre un crecimiento exponencial en el área de la toxicología, derivado de la producción de compuestos orgánicos, fosgeno y gas mostaza para utilizarlos como armas químicas en la Segunda Guerra Mundial, se dice que para 1880 se habían sintetizado 10000 compuestos orgánicos. Fue durante esta época que se sintetizó el DDT y los compuestos fenoxi con la finalidad de incrementar la producción alimentaria. Más adelante, en la década de 1940, el DDT se utilizó para el control de enfermedades transmitidas por mosquitos.

Los efectos ambientales de algunas sustancias tóxicas se empezaron a conocer gracias al libro *Primavera silenciosa*, escrito por Rachel Carson en 1962, en el que se advierte a la sociedad del peligro que representan estas sustancias. En dicho libro se explica por qué el águila calva, símbolo de Estados Unidos, estuvo en peligro de extinción por la exposición al DDT. Este compuesto **organoclorado** interfiere en la formación de los cascarones durante el periodo reproductivo, afortunadamente en 1972 en Estados Unidos se prohíbe su uso y con esto las poblaciones del águila retornaron a sus números normales. Sin em-

bargo en México se erradica su uso hasta 1998. También en este libro se menciona el caso de la **talidomida**, un fármaco comercializado entre los años 1958 y 1963 como sedante y como calmante de las náuseas durante los tres primeros meses de embarazo (hiperemesis gravídica). Este medicamento provocó miles de nacimientos de bebés afectados de **focomelia**, anomalía congénita caracterizada por la carencia o excesiva cortedad de las extremidades. Cuando se comprobaron los efectos **teratógenos** (que provocan malformaciones congénitas) del medicamento, éste fue retirado en los países donde había sido comercializado.

El descubrimiento y la síntesis del agente naranja (la mezcla de dos herbicidas, el 2,4 D o ácido 2,4,-diclorofenoxiacético y el 2,4,5-T o ácido 2,4,5-triclorofenoxiacético, combinada con combustible diesel o keroseno), un herbicida utilizado durante la guerra de Vietnam, tuvieron como consecuencia la identificación de un compuesto organoclorado contaminante en el proceso de la preparación industrial del herbicida, tetraclorodibenzo-p-dioxina (TCDD). Este compuesto organoclorado, junto con nueve plaguicidas más, incluido el DDT, pertenece al grupo de los COPs (contaminantes organoclorados persistentes) conocidos, cuya persistencia y **bioacumulación** les confieren una toxicidad elevada. Ésto ha hecho que países de

todo el mundo se reúnan (Convenio de Estocolmo) y busquen soluciones para disminuir o eliminar la producción, la generación accidental y uso de los COPs, mediante la verificación de estrategias comunes y específicas para cada país.

Fuentes de contaminación

Al hablar de contaminación ambiental es imposible separarla de las actividades humanas; sin embargo, las fuentes de contaminación son muy diversas. De manera general, se clasifican en i) naturales y ii) **antropógenas**; las primeras están relacionadas con la composición de los suelos, las aguas y las emanaciones volcánicas, y representan un bajo porcentaje de los problemas de salud pública, excepto aquellos sitios específicos de contaminación. Un ejemplo de esto último es el caso del flúor, que en entidades como San Luis Potosí se encuentra en concentraciones de 1.6 a 4.6 mg/L; en Aguascalientes, de 1.5 a 9.0 mg/L; y en Durango, de 1.4 a 42.0 mg/L (la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 establece como límite máximo permisible para el flúor, 1.5 mg/L). En estos lugares se han registrado desde problemas dentales hasta esqueléticos.

Las fuentes antropógenas de contaminación son las causas más importantes de problemas de salud pública. La ineficiencia de los procesos industriales, el manejo inadecuado de desechos sólidos industriales y domésticos, el uso ex-

cesivo de fertilizantes y productos químicos, la tala, los incendios, la eliminación inadecuada de la basura, el monóxido de carbono de los vehículos, el desagüe de aguas negras o contaminadas al mar o los ríos resulta en fuentes de contaminación muy diversas que pueden clasificarse en: i) industriales, ii) mineras, iii) agropecuarias, iv) municipales y v) artesanales. Es fundamental recalcar que cada país, estado, o ciudad tiene su propio escenario de contaminación, y que si bien es posible copiar medidas correctivas o de prevención de otros lugares, cada sitio se debe evaluar de forma particular según su situación específica. Un ejemplo de esto son las zonas agrícolas, donde de acuerdo con el tipo de cultivo son los plaguicidas aplicados; por tanto, el riesgo en la salud pública depende de la toxicidad de los ingredientes de cada plaguicida, así como de las condiciones del suelo, el clima, el estado nutricional de la población, etc. Un factor que complica la evaluación del riesgo, es que en una misma zona a menudo hay más de una fuente de contaminación; esto podría resultar en una mezcla de compuestos cuyo riesgo sea mayor que el que tendría cada compuesto por separado. El análisis de los efectos sobre la salud humana ocasionados por la exposición a agentes tóxicos ambientales, necesariamente se debe iniciar con el bosquejo y la descripción de un escenario.

Exposición humana

El desarrollo industrial, los asentamientos humanos y el creciente uso de plaguicidas en las áreas agrícolas van acompañados del aumento de la contaminación ambiental. Asimismo, la meta de mantener la salud y mejorar el ambiente y la calidad de vida de los individuos entra en conflicto con el crecimiento inevitable de la población y la economía. Para que la urbe pueda vivir y desarrollarse en un ambiente sano, es necesario prevenir los riesgos y reparar los daños.

La exposición humana a agentes tóxicos podría ocurrir en cualquier lugar, durante el transporte de éstos, en los sitios de producción, en las instalaciones de almacenamiento, o en los lugares de depósito de residuos para su tratamiento. Ante la carencia de los mecanismos adecuados para evitarlo, los compuestos tóxicos se incineran en hornos alfareros y ladrilleros, y se depositan sin control alguno en basureros municipales, barrancas, minas abandonadas, terrenos baldíos, ríos, lagos, etc. En México, la actividad de la alfarería se practica en 20 estados y existen aproximadamente 5 millones de alfareros ubicados en 113 comunidades. Los combustibles más frecuentemente utilizados en el proceso de cocción durante la producción de objetos vidriados son leña, carbón, llantas, plásticos, residuos combustibles, estiércol, bagazo, celulosa y combustibles fósiles. La industria ladrillera es otra fuente

importante de contaminación ambiental que utiliza prácticamente los mismos combustibles que la alfarería, además de hornos con sistemas tecnológicos obsoletos. Únicamente en el área metropolitana de la Ciudad de México funcionan más de 1 000 hornos, las emisiones de esta industria ocasionan complicaciones graves de la salud, no sólo en quienes trabajan en ella (más de veinte mil personas), sino también en los residentes aledaños.

A fin de precisar los riesgos para la salud, se requiere ante todo conocer las fuentes potenciales de compuestos tóxicos ambientales y la localización de los sitios afectados. Algunos de los contaminantes que es posible se encuentren relacionados con sitios peligrosos son: plaguicidas (endosulfán; lindano; DDT; paratión; metilparatión; metamidofos; permetrina; paraquat; 2,4,D; compuestos organometálicos; pentaclorofenol), metales (plomo, arsénico, cadmio, mercurio, cromo, níquel, flúor), disolventes (benzeno, tolueno, tricloroetileno, tetracloroetileno, disulfuro de carbono, éteres de glicol, hexano, formaldehído, tetracloruro de carbono, cloruro de vinilo, xileno), otros (bifenilos policlorados o BPC, dioxinas, ftalatos, contaminantes biológicos). En materia de exposición ocupacional, el objetivo primordial es la prevención de los efectos nocivos a la salud de los trabajadores expuestos a agentes químicos en su ambiente laboral. La sa-

lud ocupacional es la aplicación en los centros de trabajo de políticas, normas, conocimientos, técnicas y prácticas, con objeto de preservar, proteger y promover la salud de los trabajadores. Uno de los medios más importantes para conseguirlo es establecer límites permisibles del agente químico en el aire del ambiente de trabajo. En esta tarea participan, entre otras, instituciones como la OMS (Organización Mundial de la Salud), la EPA (siglas de Environmental Protection Agency o Agencia de Protección Ambiental de EE. UU.) y la ATSDR (siglas de Agency for Toxic Substances and Disease Registry o Agencia de Sustancias Tóxicas y Registro de Enfermedades de EE. UU.), las cuales, basándose en los resultados de numerosos estudios realizados por investigadores de todo el mundo, establecen normas o guías tendientes a eliminar o disminuir la exposición a agentes tóxicos.

En la actualidad, se conocen muchos de los problemas causados por la exposición ambiental a los xenobióticos relacionados con el desarrollo industrial y social, pero poca o ninguna medida es posible tomar debido a la escasez de información y datos precisos sobre la exposición humana. Por otra parte, los conflictos ambientales se discuten en el seno de la sociedad, desafortunadamente a menudo se difunden en los medios de comunicación masiva en forma distorsionada, lo que desacredita las preocu-

paciones y los esfuerzos legítimos de la comunidad. Es necesario que los actores sociales, incluidas las autoridades, dispongan de medios científicos para proceder en forma responsable al tratar con esta problemática. Es en esta área donde los profesionales de la toxicología y otras disciplinas deben unir esfuerzos con las autoridades correspondientes para evitar o remediar el detrimento del ambiente. Lo anterior con el propósito de eliminar o disminuir la exposición, mediante la elaboración de políticas ambientales y el establecimiento de programas preventivos de salud.

Las características del contacto entre el agente tóxico y los individuos las determina la vía de exposición, así como también la frecuencia, duración y magnitud de la misma. El factor que más afecta la toxicidad de un compuesto es justamente la vía de exposición, ya que depende de ésta que el xenobiótico sea o no **biotransformado**, con lo que cambia la magnitud e índole de la toxicidad. Aunque las vías más comunes de exposición a los tóxicos ambientales son la inhalación, la ingestión y el contacto cutáneo, tienen un interés particular la vía transplacentaria así como la de la leche materna.

Toxicocinética

Cuando el tóxico llega al organismo, según la vía de exposición de que se trate, entra en contacto con las superficies epi-

teliales del tracto digestivo, del aparato respiratorio, o de la piel. Al cruzar esas membranas y alcanzar el torrente sanguíneo, es transportado a los distintos órganos y podría llegar a causar daño en uno o varios de ellos. Asimismo, la cantidad de tóxico absorbida por el organismo puede ser muy diferente de la dosis inhalada o ingerida, debido a que la **biodisponibilidad** —la asimilación del contaminante por los organismos, y en consecuencia la posibilidad de causar algún efecto, negativo o positivo— de la sustancia no siempre es de 100%; por ejemplo, el arsénico ingerido con el agua se absorbe casi totalmente, pero sólo se absorbe 11% si se encuentra en residuos mineros.

La **toxicocinética** estudia el transporte y las transformaciones que experimenta una sustancia tóxica, desde la superficie epitelial de contacto hasta los órganos en que se almacena, causa lesiones, o ambas cosas, mediante el análisis de los procesos ADME (**A**bsorción, **D**istribución, **M**etabolismo o biotransformación y **E**xcreción) de los tóxicos. La descripción de estos pasos tiene como objetivo entender las causas de la gran variabilidad que existe en la respuesta de los diferentes individuos y especies a la agresión química.

La **absorción** es el proceso por medio del cual el xenobiótico atraviesa membranas y capas de células para llegar al torrente sanguíneo. Los agentes

tóxicos utilizan los mismos mecanismos y vías de las sustancias propias del organismo, como difusión pasiva, filtración, transporte especial (transporte activo y difusión facilitada), ingestión de células (pinocitosis y fagocitosis). Por ejemplo, el plomo, al ser un catión divalente y tener un radio atómico parecido al del calcio, utiliza el mismo mecanismo de absorción que éste.

Las principales vías de absorción son: i) la respiratoria, ii) la oral o bucal y iii) la dérmica. La primera cobra la mayor importancia en el caso de la contaminación atmosférica y en el del área ocupacional. Esto se debe a que cuando el tóxico entra en contacto con el tracto respiratorio (con una superficie de 70 m², aproximadamente), es posible que produzca daño local; se biotransforme, como algunos HAPs; o se absorba y entre a la corriente sanguínea, donde se metaboliza, distribuye a otros órganos, o ambas cosas, y ejerce su efecto tóxico. Los materiales inhalados son gases, partículas, humos, vapores, aerosoles, neblinas, polvos. Según sus características fisicoquímicas los agentes tóxicos se absorben en la nariz o los pulmones. Las partículas con diámetros entre 5 y 30 µm quedan atrapadas en el tracto respiratorio superior y son expelidas por el estornudo y la tos; las que tienen un diámetro entre 2 y 5 µm llegan a las vías respiratorias medias, donde son deglutidas; en tanto que aquellas menores de 2 µm,

llegan al tracto respiratorio inferior (alvéolos), sitio donde son fagocitadas por los macrófagos y eliminadas por el sistema linfático, o bien pasan al torrente sanguíneo para su distribución.

La vía oral es la ruta más frecuente en las intoxicaciones accidentales y es utilizada por los tóxicos que han ingresado en la **cadena alimentaria**. Esta ruta posee zonas con características histológicas, físicoquímicas y bioquímicas particulares. En el tracto gastrointestinal, la mayor cantidad del tóxico se absorbe en el estómago y los intestinos, aunque también puede haber absorción sublingual y rectal. Para que alcance la circulación sanguínea, el agente tóxico debe ser capaz de resistir la acción de las enzimas digestivas, el pH del estómago y el intestino, y la biodegradación por la flora intestinal.

La permeabilidad de la piel a las sustancias tóxicas (vía dérmica) es muy baja debido a que ésta se halla formada por i) la epidermis (estratos córneo y granuloso), una capa externa protectora carente de irrigación sanguínea; ii) la dermis, una capa interna de tejido vivo, y iii) el tejido subcutáneo. Para que una sustancia se absorba por la piel, debe difundirse a través del estrato córneo y las demás capas de la epidermis antes de alcanzar los vasos capilares sanguíneos y linfáticos de la dermis y pasar a la circulación sanguínea. El transporte a través de la piel es por difusión simple ya

que este órgano no cuenta con mecanismos de **transporte activo**. Algunos tóxicos que pueden atravesar el estrato córneo son las anilinas, los compuestos organofosforados, los bencenos y las sales de talio. La absorción de éstos en los folículos y las glándulas se considera insignificante.

Se entiende por distribución de una sustancia tóxica la localización y concentración de ésta en los diferentes tejidos. Una vez que el compuesto tóxico llega al torrente sanguíneo, se transporta a sus sitios de acción (riñón para el cadmio, cerebro para el plomo), se almacena o deposita (tejido adiposo para dioxinas, tejido óseo para plomo), o bien se biotransforma (hígado en la mayoría de los compuestos). La distribución depende del flujo sanguíneo, el coeficiente de partición, la permeabilidad de la membrana y la afinidad del compuesto por el tejido. Los seres humanos poseen barreras selectivas que protegen de compuestos tóxicos a algunos órganos, una de ellas y quizá la más importante es la barrera hematoencefálica, formada por células del endotelio capilar. Esta barrera posee células llamadas **astrocitos** que rodean a los capilares para evitar la entrada de compuestos polares, y presenta una baja concentración de proteínas en el fluido intersticial, lo cual limita la entrada a sustancias liposolubles. A pesar de ello, algunos compuestos, como el plomo y el mercurio, son capaces de atravesar-

la, esto tiene una importancia particular en los niños, ya que en ellos la barrera madura hasta los 12 años, y son por lo tanto, más susceptibles a los efectos dañinos de estos tóxicos.

La **biotransformación** es la modificación que experimenta todo xenobiótico a su paso por las rutas metabólicas del organismo con el objeto de transformarlo en metabolitos inactivos más polares, y por ende más hidrosolubles, que puedan ser excretados. En ocasiones el organismo genera un metabolito más tóxico que el original, lo que se conoce como **bioactivación**. Uno de esos casos es el del DDT, el cual se biotransforma en DDE, un compuesto mucho más tóxico; otro ejemplo de bioactivación es el de los HAPs, donde el benzo(a)pireno forma un compuesto epoxidol, altamente electrófilo capaz de formar **aductos** con el ADN. La biotransformación se realiza principalmente en el hígado, riñón, pulmón, intestino y estómago.

El estudio de las reacciones que constituyen la biotransformación permite entender los mecanismos por medio de los cuales los tejidos se defienden de los tóxicos que logran penetrar, y también por qué en algunas ocasiones sucede lo contrario y se incrementa la toxicidad en el interior del cuerpo. Estas reacciones se agrupan en dos categorías a las cuales se les denomina: i) biotransformación fase I y ii) biotransformación fase II. La primera, metaboliza los xenobióticos

convirtiéndolos en sustratos para las enzimas de la fase II, al mismo tiempo que los hace más hidrófilos. Las reacciones que se llevan a cabo son de oxidación, reducción e hidrólisis. Los complejos enzimáticos más importantes en la oxidación de xenobióticos son las monoamino-oxidasas y el sistema citocromo P₄₅₀ (CYP₄₅₀), una superfamilia de hemoproteínas microsómicas encontrada sobre todo en las células hepáticas y la mucosa del intestino delgado, la cual se subdivide en familias y subfamilias. Alrededor de 70% del sistema citocromo 450 hepático pertenece a las familias que metabolizan fármacos. Algunos ejemplos de estas familias son la CYP1A1, que biotransforma a los HAPs, y la CYP1A2, que metaboliza al acetaminofén, el paracetamol y la cafeína —ambas enzimas son inducidas por dioxinas y el humo del cigarrillo—; la CYP2E1 metaboliza al benceno, cloroformo y cloruro de polivinilo (CPV), mientras que la CYP3A4 se encarga de transformar al aldrín y la ciclofosfamida. La biotransformación fase II consiste en reacciones de conjugación, en las que un metabolito con enlaces de alta energía cede un grupo funcional polar al xenobiótico, o al producto de transformación de la fase I. El resultado neto de estas reacciones es un gran incremento de la solubilidad en agua del xenobiótico. Las conjugaciones se llevan a cabo con ácido glucurónico, sulfato, grupos metilo, acetilo, glutatión y aminoáci-

dos, y los mecanismos a continuación se describen.

Glucuronidación

Una reacción que consiste en agregar un grupo glucuronil a un grupo hidroxilo, amino, o sulfhidrilo del tóxico. La enzima que cataliza la reacción es la uridina difosfato glucuronil transferasa (UDPGT) y el donador del grupo polar es el ácido uridina difosfato glucurónico (UDPGA). La enzima se encuentra en el retículo endoplásmico. Los compuestos glucuronidados son muy solubles en agua y aparecen en la orina y la bilis.

Sulfatación

Consiste en la transferencia de un grupo sulfato de PAPS (3'-fosfoadenosil-5'-fosfosulfato) a un grupo hidroxilo o amino en el xenobiótico. La reacción es catalizada por sulfotransferasas, enzimas solubles localizadas en el citosol. El producto de la reacción es un sulfato orgánico ionizado, muy soluble en agua que se excreta en la orina.

Aminoacidación

La reacción consiste en la formación de una unión peptídica entre el grupo amino de un aminoácido y un grupo carboxilo en el xenobiótico. Estos conjugados se eliminan en la orina debido a que el sistema de transporte del riñón reconoce al aminoácido.

Glutationización

Esta reacción consiste en la adición de **glutación**, mediante su grupo sulfhidrilo (nucleófilo), a un carbón electrófilo del xenobiótico. La reacción es catalizada por la glutación-S-transferasa y el glutación mismo es el cofactor de alta energía. El glutación es un tripéptido formado por ácido glutámico, glicina y cisteína (Glu-Gli-Cys). El compuesto formado se rompe en el riñón produciendo el derivado de cisteína, que se acetila para producir un conjugado del ácido mercaptúrico, el cual se excreta en la orina. Esta reacción es importante en la detoxificación de epóxidos y peróxidos. La glutación-S-transferasa se encuentra en las células de muy diversos tejidos. Si esta reacción disminuye considerablemente la concentración celular de glutación, el organismo podría sufrir daños considerables debido a la peroxidación de lípidos o por otros tipos de agresión química.

Metilación

Las reacciones de metilación son de importancia secundaria en la biotransformación de xenobióticos, excepto en la **detoxificación** del arsénico. Los compuestos inorgánicos de arsénico se transforman en metabolitos monometilados y dimetilados que son menos tóxicos. La reacción consiste en la transferencia de un grupo metilo a un hidroxilo, amino, o sulfhidrilo, es catalizada por las metiltransferasas y el compuesto donador de grupos metilo es la SAM (S-

adenosil-metionina). La metilación es importante en la transformación de compuestos endógenos e interviene en la biosíntesis de varios aminoácidos y esteroides, así como en la metilación del ADN.

La excreción es el descenso de la concentración de un tóxico en el organismo. Las tres principales vías de excreción son la renal, biliar y pulmonar, aunque existen otras, como la leche materna, que cobran importancia en el caso de ciertos xenobióticos.

El riñón elimina la mayoría de los agentes tóxicos por filtración glomerular, y casi siempre la biotransformación es un requisito. Esto se debe a que muchos xenobióticos son liposolubles y se reabsorben en los túbulos renales después de la filtración glomerular, por lo cual tienen que metabolizarse nuevamente para obtener una molécula más polar para que se pueda eliminar completamente del organismo.

La bilis contribuye a la excreción de los metabolitos formados en el hígado. Las sustancias con peso molecular mayor a 350 **dalton** se excretan más fácilmente por esta vía. Algunos iones metálicos, compuestos neutros, ácidos y bases orgánicas son transferidos a la bilis por medio de transporte activo. Una vez formada la bilis pasa al intestino para ser excretada con las heces. La microflora intestinal biotransforma algunos compuestos que lleva la bilis y los metaboli-

tos resultantes son reabsorbidos y llevados de nuevo al hígado. Este fenómeno, se conoce como **ciclo enterohepático** y es la causa de que se prolongue la permanencia del tóxico en el organismo. Por otra parte, es conveniente considerar que cualquier dosis oral que no se absorbe se elimina con las heces ya que la absorción nunca es de 100%.

Para que un xenobiótico se elimine por la vía pulmonar, es necesario que éste sea un gas a la temperatura corporal y de este modo se elimine por exhalación. El cloroformo y el **halotano** son dos ejemplos de xenobióticos que se eliminan por esta vía. La leche materna constituye una vía importante en el caso del transporte de tóxicos de la madre lactante al hijo, y del ganado lechero al hombre. El pH ligeramente menor de la leche, con respecto al plasma, facilita la excreción de algunos compuestos básicos pero también se excretan algunos compuestos liposolubles o iones similares al calcio. Tres ejemplos de compuestos que se eliminan por esta vía a causa de sus características liposolubles son las dioxinas, el DDT y los bifenilos policlorados (BPC) o askareles.

Toxicodinamia

La **toxicodinamia** estudia los efectos bioquímicos y fisiológicos producidos por los tóxicos en el organismo, así como también el mecanismo de toxicidad. De un modo más puntual, es la interacción

de los tóxicos a nivel molecular o iónico con los sitios específicos de la célula (receptores) o de su interior con el resultado último del efecto tóxico. En el estudio de la toxicología ambiental, la variabilidad de las respuestas tóxicas obliga al tratamiento probabilístico de las posibilidades de daño, en lugar de la estimación cuantitativa del mismo. La determinación de los efectos tóxicos es esencial en la evaluación del peligro potencial representado por un xenobiótico. La **toxicidad** es una propiedad intrínseca de la sustancia definida como la interrupción de la **homeostasis** de una célula, lo cual resulta en alteraciones fisiológicas que incluso producen la muerte. El conocimiento de los daños producidos por los agentes tóxicos y de los blancos celulares potenciales de dichos agentes, permite valorar los efectos adversos potenciales y sugerir acciones terapéuticas y antagónicas para bloquear o remediar los efectos dañinos. Algunos objetivos o blancos moleculares podrían ser moléculas portadoras, enzimas, proteínas estructurales, lípidos, coenzimas y ácidos nucleicos.

La producción de ATP por las mitocondrias requiere oxígeno, de modo que una baja concentración de éste (hipoxia) podría desencadenar problemas graves. El principal agente que priva a la célula de oxígeno es el monóxido de carbono, el cual se une a la hemoglobina para formar carboxihemoglobina con lo que se impide la unión de aquélla con el

oxígeno. La anemia (baja concentración de hemoglobina en la sangre) y la isquemia (bajo flujo arterial o drenaje venoso lento) reducen la capacidad para transportar oxígeno y contribuyen a la deficiencia de este gas en las células.

La inhibición de la enzima acetilcolinesterasa por algunos plaguicidas, como los organosfosforados y los carbamatos, está bien documentada. Esta enzima participa en la hidrólisis de la acetilcolina, la cual es un neurotransmisor que participa en la neurotransmisión colinérgica; al no hidrolizarse la acetilcolina, el impulso nervioso se mantiene constante. Los efectos por intoxicación a estos plaguicidas consisten en visión borrosa, cefalea, calambres, taquicardia, etc. La inhibición por organosfosforados es irreversible mientras que por carbamatos es reversible.

La membrana plasmática permite a la célula mantener los gradientes iónicos que, a su vez, regulan el volumen celular. Está formada por lípidos, proteínas y carbohidratos en proporciones aproximadas de 40%, 50% y 10%, respectivamente. Los lípidos forman una doble capa y las proteínas de la membrana están incrustadas en forma individual o en grupos dentro de la estructura lipídica, formando los canales por los cuales entran a las células en forma selectiva todo tipo de moléculas. Las proteínas de la membrana no sólo hacen que el transporte a través de ésta sea

selectivo, sino que también son capaces de llevar a cabo transporte activo; por ejemplo, la bomba de sodio potasio (Na-K) expulsa 3 iones de Na^+ e introduce 2 iones de K^+ . Si se daña esta bomba, la célula introduce iones de sodio y calcio y salen iones de potasio. El agua y los cloruros se redistribuyen según el gradiente electroquímico y hay incremento intracelular del agua que podría resultar en la **crenación** de las células. Este encogimiento puede presentarse por la exposición a compuestos que generan radicales libres al dañar a los lípidos y las proteínas de las membranas plasmáticas. Las **especies reactivas** por lo general son moléculas muy pequeñas altamente reactivas debido a que en el último orbital tienen un electrón no apareado (**radical libre**), lo cual les confiere inestabilidad física. Causan daño a las membranas celulares por peroxidación de lípidos, inactivación de enzimas —en este caso son más vulnerables las que presentan grupos aromáticos o sulfhidrilos—, e incluso dañan al ADN al causar alteraciones en la codificación y **transcripción** del material genético. El daño a las enzimas reparadoras, como la polimerasa del ADN, retrasa el proceso de reparación e incrementa los errores durante la duplicación del ADN, lo que resulta en mutaciones que se acumulan a lo largo de la vida con consecuencias patológicas. El ADN es la **molécula blanco** para los cancerígenos y un solo daño en el

sitio adecuado de ésta y que no sea reparado correctamente tiene consecuencias graves para la célula. Una de las lesiones más importantes en esta macromolécula es la oxidación de las bases púricas y pirimídicas, la oxidación en el C-8 de la deoxiguanosina forma el aducto 8-hidroxideoxiguanosina, (8 Hd-G) lo que produce una **transversión** de bases G-T.

La formación de tumores requiere algo más que el simple hecho de que ocurra una mutación. La carcinogénesis es un proceso que consta de las siguientes fases: i) iniciación del daño genético, ii) promoción o incremento en el número de la célula iniciada (reproducción) y iii) progresión hacia otros caracteres fenotípicos. Cuando se induce un cambio en la molécula de ADN, la célula reacciona tratando de eliminarlo mediante alguno de los mecanismos de reparación con que cuenta. Si no lo logra y el daño en el ADN perdura hasta que la célula se reproduce, se dice entonces que el daño se fija (fenómeno irreversible) y se incorpora al **genoma**. Algunos iniciadores reconocidos son el dimetilbenzoantraceno, uretano y benzopireno. Los **promotores** son de ordinario sustancias que incrementan la proliferación, lo cual hace que la célula iniciada se reproduzca. La promoción es un fenómeno reversible que por lo general requiere exposiciones repetidas al promotor, y una vez que se eliminan los promotores el estímulo se

extingue. Algunos ejemplos de agentes promotores son los **ésteres del alcohol forbol**. La progresión se caracteriza por una proliferación de las células iniciadas acompañada de cambios genómicos mayores, como **translocaciones** y pérdidas de material cromosómico. Los cambios que suceden en esta etapa son irreversibles y las células tumorales se convierten en malignas.

COMENTARIOS

Se estima que 35% de la **carga total de enfermedad**, definida como años restados a la vida sana por incapacidad o muerte prematuras, tiene su origen en factores ambientales y 15% en exposiciones ocupacionales. Esto representa un gran problema en el ámbito nacional, y a su vez un reto para las autoridades sanitarias federales, estatales y jurisdiccionales. Recientemente se publicó el primer Diagnóstico Nacional de Salud Ambiental y Ocupacional, por la Dirección General de Salud de la Secretaría de Salud, lo cual representa un gran avance que proporciona un panorama general de la situación en México, además pretende convertirse por una parte en un instrumento de consulta para investigadores del área ambiental y por otra de apoyo en la toma de decisiones de las autoridades correspondientes.

En lo que se refiere a los profesionales del área ambiental, la tarea consiste en identificar sitios potencialmente

peligrosos y evaluar los efectos adversos en los organismos y el ambiente. Éste es un trabajo arduo y necesariamente **multidisciplinario**, e implica la **estandarización** de las técnicas adecuadas para evaluar la contaminación ambiental, la exposición de los organismos y los efectos dañinos. Para lograr lo anterior se requiere infraestructura adecuada y personal calificado, pero sin duda el verdadero reto es reunir todas las pruebas relacionadas con el riesgo para la salud en el sitio evaluado, así como también proponer soluciones que ayuden a disminuir o eliminar la exposición, a fin de mejorar la calidad de vida de los individuos y preservar su ambiente.

La metodología de evaluación de riesgo creada por la Organización Panamericana de la Salud y la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP) es un instrumento utilizado en años recientes para efectuar lo anterior. El primer paso de estos métodos consiste en la identificación de las fuentes potencialmente peligrosas, seguida de una evaluación ambiental y biológica cuyo propósito es buscar mecanismos de remediación o restauración que eliminen, o en su defecto, disminuyan los efectos perjudiciales derivados de la exposición a agentes nocivos.

El laboratorio de Toxicología Ambiental del CIGyA se crea con el objetivo de complementar las investigaciones que se venían realizando en este Centro e

incursionar en los problemas ambientales que aquejan al estado de Tlaxcala. La estandarización de metodologías, como el ensayo inmunoenzimático (ELISA) para cuantificar las dioxinas en el suelo y la leche materna humana, es una de las metas a corto plazo de este laboratorio. Aunque por el momento se carece de equipo especializado, como cromatógrafo de gases o espectrofotómetro de absorción atómica, se tiene el apoyo del Centro Colaborador de la OMS en Evaluación del Riesgo en Salud y Salud Ambiental Infantil del Departamento de Toxicología Ambiental de la Facultad de Medicina de la UASLP para cuantificar metales y algunos COPs en suelo y muestras biológicas. En cuanto a la evaluación de efectos, se cuenta con el ensayo de electroforesis en gel de células individuales, mejor conocido como "ensayo cometa", con algunas modificaciones, para evaluar no únicamente la fragmentación del ADN, sino también la reparación y el daño oxidativo en poblaciones que están expuestas a contaminantes ambientales.

De esta manera, se están reuniendo las herramientas necesarias para llevar a cabo evaluaciones de riesgo para la salud en sitios identificados como potencialmente peligrosos. Falta mucho por hacer, pero se está consciente de la importancia de cada resultado obtenido y sobre todo del compromiso

que se tiene no sólo con la Universidad,

sino con la sociedad.

BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

Albert, L. A. 1997. *Introducción a la Toxicología Ambiental*. Centro Panamericano de Ecología Humana y Salud, OPS/OMS, Gobierno del estado de México. México.

------. 2004. *Toxicología Ambiental*. Universidad Autónoma de Ciudad Juárez. Cd. Juárez, Chihuahua, México.

ATSDR (Agency for Toxic Substances and Disease Registry). 2004. *Toxicological Profile for Lead*. U.S. Department of Health and Human Services. Atlanta, GA.

------. 2004. *Toxicological Profile for arsenic*. U.S. Department of Health and Human Services. Atlanta, GA.

------. 2004. *Toxicological Profile For Chlorinated Dibenzo-p-Dioxins*. U.S. Department of Health and Human Services. Atlanta, GA.

Bejarano, G. F. 2004. *Guía ciudadana para la aplicación del convenio de Estocolmo*. Red de Acción sobre Plaguicidas y Alternativas en México (RAPAM). Tex., Méx.

Carrizales, L. 2006. Exposure to arsenic and lead of children living near a cooper smelter in San Luis Potosi, Mexico: Importance of soil contamination for exposure of children. *Environ Res* 101(1):1-10.

Curtis, D. K. 1996. *Casarett & Doull's Toxicology: The Basic Science of Poisons*. 5th ed. McGraw-Hill, Nueva York.

Díaz-Barriga, F. 1999. *Metodología de identificación y evaluación de riesgo para la salud en sitios contaminados*. Publicación 99. 34. Organización Panamericana de la Salud/Centro Panamericano de Ingeniería

Sanitaria y Ciencias del Ambiente, Lima, Perú.

Díaz-Barriga, F. y G. Corey. 1999. *Evaluación del riesgo por la exposición a plomo*. Unidad de Toxicología Ambiental, Facultad de Medicina, U.A.S.L.P., México; Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente/Organización Panamericana de la Salud. Perú.

Environmental Protection Agency (EPA). 2000. *Exposure and Human Health Reassessment of 2,3,7,8-Tetrachlorodibenzo-p-Dioxin (TCDD) and Related Compounds*. Borrador final. (En línea). Disponible en: www.epa.gov/ncea (marzo, 2008).

Fernicola, Nilda A. G. G., de.1992. "Evaluación biológica de la exposición humana". En: Reyes, Felix G. R. y Waldemar F. de Almeida. *Toxicología Prospectiva y Seguridad Química*. Centro Panamericano de Ecología Humana y Salud, Programa de Salud Ambiental, Organización Panamericana de la Salud.

Frenk M. J., Enriquez R. E., Santos Burgoa Z. C, Zedillo B. L., Torres M. V. M. y Barraza V. A. 2002. *Primer diagnóstico nacional de salud ambiental y ocupacional*. Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios. Dirección General de Salud Ambiental.

Hassoun, E. A. 2000. The relative abilities of TCDD and its congeners to induce oxidative stress in the hepatic and brain tissues of rats after subchronic exposure. *Toxicology* 145(2-3):103-13.

- Ortiz-Pérez, M. D., L. Yáñez, F. Díaz-Barriga. Comportamiento Ambiental del DDT y de la Deltametrina. Informe Técnico Apoyado por la Comisión de Cooperación Ambiental de América del Norte. (En línea). Disponible en: <http://ambiental.uaslp.mx/docs/FDBDDTAmbiental.pdf>. (Mar, 2008).
- Ortiz-Pérez, M. D. *et al.* 2003. Fluoride induced disruption of reproductive hormones in men. *Environ Res* 93(1):20-30.
- Paivi, T. 2001. Cytochrome P450 Isoform Specific *In Vitro* Methods to Predict Drug Metabolism and Interactions. Department of Pharmacology and Toxicology, University of Oulu. (En línea). Disponible en: <http://herkules oulu.fi/isbn9514259009/isbn9514259009.pdf>
- Pendino, P.C. Agüero, I. Kriunis. 2005. Talidomida y análogos de talidomida. *Arch. Aler. Inmuno. Clín.* 36(2):41-51.
- Peña, C. E. 2001. *Toxicología ambiental. Evaluación de Riesgos y Restauración Ambiental.* (En línea). Disponible en: <http://superfund.pharmacy.arizona.edu/toxamb/>. (Marzo, 2008).
- Perez-Maldonado, I. N. 2005. DDT induced oxidative damage in human blood mononuclear cells. *Environ Res* 98(2):177-84.
- Ruiz Carbajal, A. I. 2001. *Los contaminantes orgánicos persistentes (COPs) en México.* (En línea). Disponible en: <http://www.greenpeace.org.mx>. (Marzo, 2008).
- Yang, J. L. y L. Wang. 1999. Singlet oxygen is the major species participating in the induction of DNA strand breakage and 8-hydroxydeoxyguanosine adduct by lead acetate *Environ Mol Mutagen* 33:194-201.
- Yáñez, L. y E. García. 2003. DNA damage in blood cells from children exposed to arsenic and lead in a mining area. *Environ Res* 93:231-240.

VICIA FABA: UN SISTEMA BIOLÓGICO DE PRUEBA PARA EL MONITOREO DE CONTAMINANTES AMBIENTALES

Libertad Juárez Santacruz

Laboratorio de Toxicología Ambiental

Rosalba Ortiz Ortiz

Área de Educación Ambiental

INTRODUCCIÓN

La humanidad con su trabajo ha transformado la naturaleza y también ha utilizado los recursos de ésta para obtener productos que no siempre son benéficos. Por otra parte, los sistemas de distribución masiva con que cuenta ahora hacen que casi cualquier accidente afecte a una gran cantidad de individuos en un área muy extensa.

En la actualidad, el ser humano elabora diferentes sustancias que no se encuentran en la naturaleza y las utiliza en fábricas, actividades agrícolas, medicina y una inusitada variedad de aplicaciones hogareñas. A este respecto, la Agencia de Protección al Ambiente de Estados Unidos (USEPA, siglas de United States Environmental Agency) y la Organización Mundial de la Salud (OMS) han calculado que existen aproximadamente 63 000 sustancias sintetizadas artificialmente de uso cotidiano. De estas, 4 000 corresponden a fármacos, 5 000 a aditivos de alimentos, 10 000 se utilizan en productos cosméticos, 10 000 se destinan a uso doméstico, 5 000 son

de uso textil, 1 500 se emplean en la elaboración de plaguicidas y 9 000 en otros menesteres. En años recientes se le ha dado gran importancia a los efectos de los contaminantes en los ecosistemas y la salud de los seres humanos, de hecho, el tema se ha convertido en un problema vital para la humanidad.

Durante más de 60 años han estado en uso diferentes **sistemas biológicos de prueba** para estudiar, inicialmente los efectos mutágenos de las radiaciones ionizantes y no ionizantes, y más tarde, los de los agentes mutágenos ambientales. Desde la década de 1970 los **bioensayos** con plantas superiores se reconocen como excelentes indicadores de los efectos citogenéticos y **mutágenos** producidos por los compuestos químicos ambientales, por lo que son aplicables para la detección de mutágenos ambientales.

A fin de estudiar el efecto de los contaminantes ambientales se utiliza una gran variedad de sistemas vegetales, como *Allium cepa* (cebolla), *Vicia faba*

(haba) y *Tradescantia paludosa* (hierba del pollo). La sencillez de tales bioensayos, el costo relativamente bajo, la versatilidad y los requerimientos mínimos de equipo para efectuarlos los hacen sistemas particularmente apropiados para el **monitoreo ambiental**, mediante el análisis de diferentes alteraciones genéticas y cromosómicas. Dichos ensayos, tienen un gran número de aplicaciones en el ambiente, entre otras la detección de materiales de desecho con potencial mutágeno descargados por plantas manufactureras en arroyos y ríos, así como también la detección de contaminantes del aire en medios rurales y urbanos. Muchos de ellos no sólo son capaces de detectar la **mutagenicidad** de los compuestos originales, sino también la de los metabolitos de estos, algunos de los cuales son similares a los encontrados en todos los sistemas animales. Otra de las ventajas de los sistemas que emplean plantas superiores es que no están restringidos al laboratorio y pueden ser usados en el campo. Otras especies vegetales frecuentemente utilizadas, además de las ya mencionadas, son: *Arabidopsis thaliana* (berro común), *Crepis capillaris* (velosilla), *Glycine max* (soya), *Hordeum vulgare* (cebada), *Lycopersicum esculentum* (jitomate), *Nicotiana tabacum* (tabaco), *Pisum sativum* (chícharo) y *Zea mays* (maíz).

Quizá la contribución más notable de los ensayos de **genotoxicidad** con

plantas superiores sea su uso continuo para el monitoreo y la evaluación **in situ** del aire, el suelo y los ambientes acuáticos en una escala mundial. Los datos aportados por estos sistemas son una contribución importante ya que es posible utilizarlos como centinelas para proteger al público de sustancias causantes de mutaciones y cáncer.

EL MODELO BIOLÓGICO DE PRUEBA

VICIA FABA

Uno de los sistemas vegetales para evaluar el daño citogenético más eficientes es el de los **meristemos** de la raíz de haba (*Vicia faba*), ya que las células meristemáticas son fáciles de manejar, su mantenimiento es relativamente económico y tienen pocos cromosomas. Los cromosomas del haba tienen el tamaño apropiado para realizar un estudio citológico, se distinguen con claridad a un aumento de 40× en el análisis al microscopio. Asimismo, en los meristemos apicales hay una gran cantidad de células en distintas etapas de la mitosis, adecuadas para el estudio de las aberraciones cromosómicas en células somáticas. Todo lo anterior, favorece los estudios de **citotoxicidad**. Por otra parte, es posible exponer las células de la punta de la raíz directamente a la sustancia de que se trate, y de este modo estudiar los efectos de concentraciones conocidas. De igual manera, este material biológico combina la ventaja de que está disponible todo el

año y es de bajo costo.

El cariotipo del haba ($2n = 12$) está constituido por 6 pares de cromosomas designados según la posición del **centrómero** o **constricción primaria**. Un par se designa como cromosomas **metacéntricos** ya que tienen el centrómero situado en la parte media; poseen un gran satélite y tienen una longitud de casi el doble que la de los otros cinco pares denominados **subacrocentricos** (S-cromosomas, por tener el centrómero en posición **subterminal**).

El **ciclo celular** de *V. faba* es corto, 19.3 h a 19 °C. En el transcurso de éste el período presintético (G_1) tiene una duración de 4.9 h; la síntesis de ADN (S), 7.5 h; el período postsintético (G_2), 4.9 h; y la mitosis, 2 h.

Esta leguminosa se ha utilizado ampliamente para detectar el daño cromosómico producido tanto por las radiaciones, como por una amplia variedad de mutágenos químicos.

En contraste con otros sistemas, como animales y células de plantas en cultivo *in vitro*, las células de la punta de la raíz tienen una frecuencia muy baja de aberraciones espontáneas y un número de cromosomas estable.

Ciclo celular

Los organismos multicelulares se desarrollan mediante la división de una célula diploide inicial, el **cigoto**. Cada célula tiene un ciclo de vida o **ciclo celular**

compuesto de un periodo en el que no hay división (**interfase**) y un periodo de división (**mitosis** o **fase M**). La mitosis produce dos células hijas idénticas a partir del cigoto. El tiempo que transcurre entre una mitosis y otra se denomina interfase, el cual comprende las siguientes fases: G_1 (del inglés **Gap 1**) o presintética, S o de síntesis del ADN, y G_2 (del inglés **Gap 2**) o postsintética. En la G_1 la célula se prepara para la síntesis del ADN. Las enzimas y proteínas que se requieren para iniciar y efectuar la duplicación del ADN se sintetizan al final de la fase G_1 y al inicio de la S. La fase S es el período de síntesis de ADN durante el cual se genera una segunda copia del genoma entero. En la fase G_2 la célula se prepara para la división, sintetizando moléculas que se requieren para la mitosis. Las células que no se están dividiendo no forman parte del ciclo celular, sino que están en una fase conocida como G_0 , la cual se describe como un estado de reposo de las células. En esta etapa disminuye el metabolismo principal, incluidos muchos de los procesos usualmente activos, como la **transcripción** y la síntesis de proteínas.

El orden de los eventos en el ciclo celular se asegura por la dependencia que existe entre cada uno de ellos, es decir, los eventos finales no se llevan a cabo sino hasta que los iniciales se han completado. Por ejemplo, el inicio de la mitosis o la meiosis se debe retrasar

hasta que se haya finalizado la duplicación del ADN; un error en la espera puede producir células menguadas en un cromosoma, alteraciones capaces de provocar la muerte celular (**apoptosis**), o cáncer.

Regulación del ciclo celular

Las células se multiplican aumentando su tamaño, el número de componentes intracelulares (proteínas y **organelos**) y duplicando y segregando sus cromosomas, para finalmente dividirse en dos células hijas genéticamente iguales.

En todos los organismos es esencial que las diferentes fases del ciclo celular estén bien coordinadas, es decir, las fases deben seguir un orden estricto y cada una debe completarse antes de que se inicie la siguiente. La regulación incorrecta del ciclo celular resulta en alteraciones cromosómicas; como, la pérdida de cromosomas completos o parte de ellos, o la distribución inadecuada del material genético en las dos células hijas.

El control del **ciclo celular** está a cargo de un gran número de proteínas, cuyas acciones podrían resumirse en diversas series de activaciones e inhibiciones de otras proteínas. Los principales efectores de esta regulación son los siguientes.

- Cinasa dependiente de las ciclinas (CDK, del inglés Cyclins-dependent protein kinase). Es una enzima cuya función consiste en activar determinadas proteínas mediante la adición de fosfato a éstas (**fosforilación**). Hace que las células pasen de la fase G_1 a la fase S, o de la G_2 a la M.
- Ciclinas (se llaman así porque aparecen y desaparecen a lo largo del ciclo) son proteínas que regulan la transición entre las distintas fases del ciclo celular. Para ello se asocian con las cinasas dependientes de las ciclinas formando complejos que sólo son activos si están constituidos por una subunidad ciclina y una subunidad catalítica cinasa, ya que las ciclinas son las proteínas que determinan qué proteínas serán fosforiladas. Existen dos tipos principales de ciclinas: i) las ciclinas G_1 , las cuales se unen a las CDK durante la G_1 e inducen el paso de la fase G_1 a la S, y ii) las ciclinas mitóticas, las cuales se unen a las CDK durante la G_2 y forman el factor promotor de la fase M (FPM), el cual induce a la célula a entrar en mitosis.
- Factor promotor de la fase M (FPM). También conocido como factor promotor de la maduración, actúa como inductor de la mitosis y en el mantenimiento y la iniciación de la profase. Corresponde al punto de control G_2 del ciclo celular. El FPM consta de dos subunidades: i) una subunidad catalítica llamada CDK (p34 en los mamíferos y cdc en las levaduras), que lleva a cabo la transferencia de grupos fos-

fatos del ATP a residuos específicos de serina y treonina, y ii) otra subunidad reguladora (ciclina), llamada p45, necesaria para el funcionamiento de la cinasa con los sustratos apropiados. Los nombres específicos de estas subunidades varían de una especie a otra.

- Proteína p53. Esta proteína regula la muerte celular cuando se produce un daño en el ADN. Las células humanas están programadas para autodestruirse si resultan dañadas o bien cuando han culminado su ciclo vital. Este proceso, conocido con el nombre de **apoptosis** o muerte celular programada, falla en las células cancerosas, lo cual explica la rápida expansión de los tumores. La proteína p53 vigila que no se produzcan daños en el ADN de las células. Si esto ocurre, la proteína obliga a las células afectadas a que se autodestruyan. Se piensa que la mitad de los cánceres se producen por mutaciones en el gen p53, encargado de la producción de la proteína del mismo nombre. Como consecuencia de esta mutación genética la proteína p53 no realiza su tarea de destrucción de células dañadas. Un caso extremo de esto es el **síndrome de Li Fraumeni**, dónde un defecto genético en la p53 resultan en una alta frecuencia de cáncer en los individuos afectados.
- Proteína p27. Es una proteína que

pertenece a la familia de los inhibidores de las cinasas dependientes de las ciclinas. Regula la progresión del ciclo celular desde la fase G₁ a la fase S uniéndose e inhibiendo uno de los complejos CDK de ciclinas. Una concentración baja de proteína p27 interfiere con la detención del ciclo celular de las células cancerosas y resulta en la acumulación de nuevas alteraciones genéticas y mayor crecimiento de células malignas.

El control del ciclo celular es muy complicado en las células de mamíferos en cultivo, ya que se han identificado por lo menos siete CDK que intervienen en diferentes etapas de la interfase, y cuando menos diez tipos de ciclinas que conjuntamente con las CDK forman complejos específicos, los cuales se activan o inhiben para controlar las diferentes fases del ciclo. La actividad de proteína cinasa del complejo CDK-ciclina B mitótico (MPF) origina los acontecimientos característicos iniciales de la división celular, entre otros: i) fosforilación de las láminas nucleares, lo cual hace que éstas se disocien de la membrana interna de la cubierta nuclear y desaparezcan, ii) fosforilación de las **histonas**, incluye cambios en la organización de la cromatina y condensación de los cromosomas, y iii) fosforilación de ciertas proteínas del **citoesqueleto**.

El ADN de las células se encuen-

tra sujeto a daño físico o químico. Los cambios incorrectos en las bases del ADN de las células que no están en crecimiento podrían generar proteínas defectuosas en una cantidad inaceptable. Una mutación podría hacer que una célula de apariencia normal no reciba correctamente los mensajes externos y altere su proceso de división. Si bien es cierto que las células tienen sistemas que detectan y corrigen las mutaciones, algunos daños pasan inadvertidos. La acumulación de alteraciones genéticas puede transformar a la célula en **tumorigena**, la cual a diferencia de una célula normal, ya no responde a las señales inhibitoras que controlan su crecimiento, cambia su forma y adquiere la propiedad de multiplicarse sin medida.

Para detectar el daño genético se utilizan tanto sistemas *in vivo* como *in vitro*. Los primeros tienen algunas ventajas, ya que simulan más claramente el efecto de los **agentes genotóxicos** y permiten que éstos sean activados o inactivados metabólicamente. Los sistemas *in vitro* por lo regular tienen **valores basales** de alteración más altos, por lo que el efecto de dosis bajas o de agentes ligeramente genotóxicos podría no manifestarse.

Vicia faba es un excelente sistema de prueba para el monitoreo de contaminantes ambientales, utiliza diferentes marcadores de daño que proporcionan resultados satisfactorios, en particular

con las técnicas de aberraciones cromosómicas (AC), **intercambios de cromátidas hermanas** (ICH), y fragmentación del ADN (ensayo cometa).

ABERRACIONES CROMOSÓMICAS

Las **aberraciones cromosómicas** son alteraciones que experimentan los cromosomas tanto en estructura como en número. Aun cuando estos cambios son un importante mecanismo para la evolución de las especies –por causa de las modificaciones que se producen en el número o en el ordenamiento de los genes–, también producen diversas alteraciones fenotípicas en el organismo o la descendencia; por ejemplo, malformaciones congénitas, infertilidad y cáncer, como se observa en la especie humana. Las aberraciones cromosómicas se clasifican en dos grupos: i) numéricas, cuando la cantidad de cromosomas difiere de la dotación diploide normal, y ii) estructurales, si la forma de uno o más cromosomas se ha alterado. Cuando las alteraciones son numéricas se presenta el fenómeno llamado **poliploidia**, el cual consiste en la aparición de células o individuos con más de tres juegos haploides de cromosomas, esto significa que en vez de poseer $2n$ cromosomas (diploidia) contienen $3n$ (triploidia), $4n$ (tetraploidia), $5n$ (pentaploidias), $6n$ (hexaploidia), etc. Los cambios anteriores pueden ser de dos tipos: i) aquellos que afectan a dotaciones completas de cromosomas (**eu-**

ploidia) y aquellos que afectan sólo a uno o más cromosomas aislados de una dotación cromosómica (**aneuploidia**). En la aneuploidia puede haber ausencia de un cromosoma en el complemento diploide normal (**monosomía**), o presencia de un cromosoma adicional en un determinado par cromosómico (**trisomía**).

En lo que respecta a las aberraciones estructurales, éstas pueden ser de dos tipos según la fase del ciclo celular en que se produce el daño genético.

Si la alteración se origina en la fase G_1 del ciclo celular, es decir cuando los cromosomas aún no se han duplicado las aberraciones se denominan cromosómicas o de tipo cromosoma (el cromosoma resulta afectado), y se manifiestan como i) **deleciones** o fracturas, ii) lesiones acromáticas o *gaps*, y iii) cromosomas en anillo o anulares; si las aberraciones se producen en la fase G_2 del ciclo celular, cuando los cromosomas ya se han duplicado, las aberraciones son cromatídicas o de tipo cromátida (alguna de las cromátidas es afectada).

Puesto que la mayoría de los mutágenos y **carcinógenos** producen aberraciones cromosómicas, y debido a que el ADN es el blanco principal para la acción de estos, las aberraciones se utilizan ampliamente como marcador de **daño genotóxico** de una amplia cantidad de contaminantes ambientales.

El registro de las aberraciones cromosómicas constituye un medio rápi-

do de estimación de daño cromosómico. Las aberraciones se observan en células en anafase o en metafase, aunque se perciben más fácilmente en la anafase. En contraste, el análisis en la metafase proporciona mejor información acerca de a qué tipo pertenecen las aberraciones.

El daño genotóxico puede ser de dos tipos: i) espontáneo y ii) inducido (por factores externos). El primero ocurre en los procesos de transmisión y síntesis del ADN y se expresa como aberraciones, se le denomina S-independiente y las alteraciones provocadas son del tipo cromatídico y cromosómico; mientras que las alteraciones que requieren pasar por una etapa de síntesis para poder expresarse se les denomina S-dependientes, y son alteraciones del tipo sub-cromatídico.

INTERCAMBIO DE CROMÁTIDAS HERMANAS

Los intercambios de cromátidas hermanas (ICH) se emplean para averiguar los efectos citogenéticos de mutágenos y carcinógenos ambientales. Con esta prueba se detecta un tipo de daño que entraña un intercambio simétrico (no existe pérdida de material hereditario) en un **locus** específico entre cromátidas homólogas durante la fase S del ciclo celular, el cual no altera la estructura del cromosoma.

La existencia de los ICH fue vislumbrada por vez primera por Barbara McClintock en 1938, al estudiar el com-

portamiento de las aberraciones mitóticas en los anillos cromosómicos de maíz. En 1957 Taylor y sus colaboradores observaron por primera vez los ICH en *Vicia faba*, en un estudio de autorradiografía encontraron que los cromosomas de las células expuestas a timidina marcada con tritio (^3H -Thd) —en la primera de dos divisiones subsecuentes— mostraban una cromátida marcada y la otra sin marcar acompañadas de intercambios de segmentos entre cromátidas. Esta fue la primera vez que se realizó un estudio de este tipo con timidina tritiada como precursor del ADN, y también fue la primera demostración de la segregación semiconservativa del ADN en los cromosomas **eucariontes**.

El análisis de los ICH se logró después de la creación de un método de tinción diferencial, que permite detectarlos incluso cuando el segmento que intervenga sea muy pequeño. Este método se basa en incorporar un **análogo** de la base timina —el nucleósido halógenado 5-bromo-2'-desoxiuridina (BrdU)— en sustitución de la timina normal al ADN. Esta técnica sigue dos vías:

- La primera consiste en la incorporación del BrdU durante el primero de dos ciclos de división sucesivos, la diferenciación se consigue cuando una cromátida está unifilarmente sustituida con BrdU —por lo que su constitución es timina-BrdU (TB)— y la otra no está
- La segunda vía ocurre cuando se incorpora BrdU durante dos ciclos de duplicación, lo que resulta en una cromátida unifilarmente sustituida, con lo que posee una constitución timina-BrdU (TB), y en la otra cromátida bifilarmente sustituida cuya constitución es BrdU-BrdU (BB).

Las plantas, aunque parecen ser un buen sistema de prueba, también presentan desventajas, como la baja capacidad de incorporación de BrdU, una pared celular resistente y un alto contenido de ARN que tiñe excesivamente el citoplasma. No obstante, la baja incorporación de BrdU se incrementa con la incorporación de 5-fluorodesoxiuridina (FdU), aunque ésta reduce la incorporación de timidina al ADN por inhibición de la **síntesis de novo** de la Thd mediante la interacción con la enzima timidil sintetasa. Para evitar algún efecto adverso de la FdU (el cual es un análogo de la uridina) en la síntesis de ARN, se incorpora uridina (U), la pared celular se suaviza usando enzimas y ácidos que ablandan el tejido, y se añade ARNasa para reducir la tinción del citoplasma.

Tempelaar y sus colaboradores crearon en 1982 el procedimiento de tinción con el reactivo de Feulgen para detectar los ICH en cromosomas de plantas. En este método, después de la fija-

ción, las raíces se hidrolizan con ácido clorhídrico (HCl) para obtener la tinción diferencial. La inducción de ICH se considera como un indicador de mutagenicidad de diferentes agentes químicos. La facilidad con la cual es posible observar y contar los ICH ha hecho de ésta una técnica imprescindible.

Importancia biológica de los ICH

Desde el punto de vista molecular los ICH consisten en un intercambio de doble banda entre las moléculas de ADN de las cromátidas hermanas. Para explicar cómo ocurre el fenómeno, se ha propuesto diversos modelos basados fundamentalmente en los modelos de recombinación bacteriana. Un aspecto interesante en relación con los ICH, es que se observan en las células de todos los organismos estudiados.

En general, las pruebas señalan que las lesiones en el ADN son la causa de la inducción de los ICH, aunque no se sabe cuál es el mecanismo, ni qué tipo de daño interviene en el proceso. Sin embargo, hay pruebas de que ni los rompimientos simples ni los dobles en la cadena de ADN ocasionan la aparición de los ICH. El proceso de aparición de los ICH se lleva a cabo en la etapa de síntesis del ADN, y se ha propuesto que ocurre en el sitio donde se bifurca la cadena doble del ADN durante el proceso de duplicación. Por lo anterior, es factible que las lesiones que no se reparan antes

de la síntesis del ADN sean las causantes de los ICH.

Como se menciona líneas atrás, se han propuesto varios modelos para explicar la formación de los ICH, la mayoría de los cuales no concuerdan con las observaciones experimentales. Con todo, el más aceptado es el que Painter propuso en 1982, ya que es el más congruente con las bases teóricas (estructura y duplicación del ADN) y experimentales. Este modelo se basa en la idea de que los rompimientos de doble hebra (hebra progenitora), ocurren frecuentemente en las confluencias de grupos de duplicones adyacentes durante la duplicación. Es decir, los ICH se originan en el punto entre un duplicón completamente duplicado y otro parcialmente duplicado. La hipótesis considera que existe una reducción en la velocidad de desplazamiento de la horquilla de duplicación del ADN, lo cual genera cuatro extremos libres (dos nacientes y dos progenitores de un grupo de duplicones completamente duplicados y opuestos a los extremos libres progenitores) en el duplicón adyacente duplicado de un modo parcial. Esto resulta en la conexión entre los grupos de duplicones, en los cuales un segmento duplicado se encuentra al lado de un segmento no duplicado (como es normal durante el periodo S en las uniones de la eucromatina y la heterocromatina). Lo anterior sugiere que los rompimientos de la molécula de ADN de doble banda en

estas conexiones se forman y reúnen de manera espontánea y es probable que el sellado sea catalizado por una topoisomerasa II, la cual se ha localizado en diferentes eucariontes. Ocasionalmente, en lugar de que se efectúe una reunión normal, el rompimiento se sella por la unión de las hebras hijas de una molécula duplicada con la molécula no duplicada. Una vez que esto ocurre, el ICH se inicia cuando las hebras hijas nacientes de un grupo se combinan con las hebras progenitoras de un grupo parcialmente duplicado, y sólo cuando estos grupos terminan de duplicarse se genera totalmente el ICH. Este intercambio requiere un solo evento, lo cual concuerda con los datos que señalan que los ICH se generan en función lineal con respecto a la dosis del agente genotóxico.

A pesar de ser éste el mejor modelo propuesto para la formación de los ICH, tampoco existen pruebas directas de su existencia. No obstante, es de gran valor, y considerando a dichos eventos desde el punto de vista molecular, el modelo tiene buenas expectativas.

En un principio se pensó que los ICH podrían ser el resultado de un proceso de reparación de lesiones en el ADN. Sin embargo, la observación de que algunos agentes son capaces de inducir un incremento en la frecuencia de ICH, efecto que se prolonga mucho tiempo después de ser administrados, sugiere que las lesiones no son repara-

das, aunque no se descarta la posibilidad de que la frecuencia se mantenga alta a causa de lesiones secundarias que se expresan posteriormente como ICH.

Los sistemas que emplean el análisis de ICH pueden considerarse como ensayos para determinar el efecto genotóxico de diversas sustancias. Hay pruebas de que en el caso de muchos agentes, el estudio de los ICH constituye el índice más sensible para detectar el daño genético.

ENSAYO COMETA

El **ensayo cometa** o electroforesis en gel de células individuales es un método sencillo, sensible, rápido y relativamente de bajo costo para la determinación del daño al ADN de células individuales. Puede realizarse en condiciones de pH neutro, con lo que se detecta rupturas o rompimientos de doble cadena del ADN; o en condiciones alcalinas, con lo que se detecta rupturas de cadena simple y sitios lábiles a los álcalis; asimismo, es aplicable a varios tipos de células.

La versión en condiciones de lisis y electroforesis alcalina (pH > 13) permite analizar el desplazamiento o migración del ADN por causa de rompimientos en una sola hebra del ADN y sitios alcalilábiles. De igual manera, el ensayo cometa se utiliza ampliamente para detectar el daño *in vitro* o *in vivo* causado al ADN por agentes genotóxicos, ya sean químicos o físicos.

Por otra parte, con algunas modificaciones, esta técnica hace posible evaluar la inducción de enlaces cruzados y los mecanismos de reparación celular y la apoptosis. En esta técnica, las células se embeben en un gel de agarosa sobre un portaobjetos, se someten a lisis alcalina o neutra, y luego a electroforesis durante un corto tiempo en condiciones alcalinas (pH > 13) o neutras (pH = 8.4). El daño es representado por un aumento de los fragmentos de ADN que se mueven al exterior de las células desde el núcleo adoptando una forma característica similar a la cola de un cometa; estos fragmentos son generados por rompimientos del ADN. Asimismo, el ensayo cometa en condiciones alcalinas es útil para detectar de manera rápida entrecruzamientos del ADN y sitios de **reparación del ADN por escisión** en células *in vivo* e *in vitro* en muestras celulares muy pequeñas.

Algunas ventajas de esta técnica son: i) los datos se colectan a partir de células individuales, con lo que proporcionan información sobre la distribución intercelular del daño y la reparación de éste; ii) se requiere un número pequeño de células; iii) se utiliza cualquier tipo de células eucariontes, y iv) es aplicable a diferentes estudios de biomonitorio.

BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

Callen, J.C. 2000. *Biología celular, de las moléculas a los organismos*. Ed. CECOSA, México.

COMENTARIOS

El bioensayo de *Vicia faba* para el monitoreo de contaminantes ambientales, tanto *in vivo* como *in vitro*, permite el empleo de diferentes marcadores de daño genético; no necesitan espacios amplios, son de bajo costo y proporcionan resultados a corto plazo.

De los marcadores mencionados anteriormente las aberraciones cromosómicas y los intercambios de cromátidas hermanas ya están **estandarizados** en el laboratorio de toxicología ambiental del CIGyA, con ellos se ha evaluado el potencial genotóxico de muestras de suelo, agua y algunos plaguicidas. Actualmente han realizado algunas pruebas tendientes a estandarizar el ensayo de micronúcleos y el de cometa con *Vicia faba* obteniendo resultados favorables. Finalmente éste sistema de prueba junto con otros que utilizan animales como peces y ranas son considerados excelentes **bioindicadores** y **biomonitores** de contaminantes ambientales, y forman parte de una batería de prueba que se está implementando para fortalecer la línea de investigación de ecotoxicología, para así conocer los efectos que producen los contaminantes ambientales tanto en organismos así como en los ecosistemas.

Cantú Martínez, P. C. 2000. *Toxicología. Nociones Generales*. Ed. Diana, México.

- Cavas T, Ergene-Gozukara S. 2003. Micronuclei, nuclear lesions and interphase silver-stained nucleolar organizer regions (Ag-NORs) as cytogenotoxicity indicators in *Oreochromis niloticus* exposed to textile mill effluent. *Mutat Res.* 538: 81-91
- Collins A.R. 2004 The comet assay for DNA damage and repair. Principles, application, and limitations. *Mol. Biotech.* 26: 249-261
- Grant, W. F. 1999. Higher plant assays for the detection of chromosomal aberrations and gene mutations a brief historical background on their use for screening and monitoring environmental chemicals. *Mutat. Res.* 426:107-112.
- Gómez-Arroyo, S. y R. Villalobos-Pietrini. 1995. "Chromosomal aberrations and sister chromatid exchanges in *Vicia faba* as genetic monitors of environmental pollutants". En Butterworth, F. M., L. D. Corkum y J. Guzmán Rincón (Eds.). *Bio-monitors and Biomarkers as Indicators of Environmental Change*, Vol. 1. 95-113.
- Huerta, M. y E. López-Bayghen. 2004. "Ciclo celular". En: Hernández M. E. y A. Ortega (Eds.). *Fisiología celular y molecular: Principios y conceptos*. UVer. 161-176.
- Kihlman, B. A. 1971. "Root tips for studying the effects of chemicals on chromosomes". En: Hollander, A. (Ed.). *Chemical Mutagens: Principles and Methods for their Detection*, Vol. 2. Nueva York. 489-514.
- Kihlman, B. A. y H. C. Andersson. 1982. "Sister chromatid exchanges in plants". En: Wolff, S. (Ed.). *Sister Chromatid Exchanges*. John Wiley and Sons, 243-265.
- McClintock, B. 1938. The production of homozygous deficient tissues with mutant characteristic by means of the aberrant mitotic behavior of ring-shaped chromosomes. *Genetics* 23:315-376.
- Menke, M., A. Meister y I. Schubert. 2000. *N*-Methyl-*N*-nitrosourea-induced DNA damage detected by the comet assay in *Vicia faba* nuclei during all interphase stages is not restricted to chromatid aberration hot spots. *Mutagenesis* 15(6):503-506.
- Macioszek, V. K. y A. Kononowicz. 2004. The evaluation of the genotoxicity of two commonly used food colors: quinoline yellow (E 104) and brilliant black BN (E 151). *Cell. Mol. Biol. Lett.* 9(1):107-122.
- Murria, A. W. 1992. Creative blocks: cell-cycle checkpoints and feedback controls. *Nature* 359:599-603.
- Painter, R. B. 1982. "A replication model for sister chromatid exchanges". En: Sandberg, A. (Ed.). *Progress and Topics in Cytogenetics Sister Chromatid Exchange*, Vol. 2. Alan Liss, Nueva York. 115-121.
- Schwartzman, J. B. 1987. Sister chromatid exchanges in higher plant cells: past and perspectives. *Mutat. Res.* 181:127-145.
- Taylor, J. H., P. S. Woods y W. L. Hughes. 1957. The organization and duplication of chromosomes as revealed by autoradiographic studies using tritium labeled thymidine. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 43:122-128.
- Tempelaar, M. J., de Both M. T. y Versteegh J. E. 1982. Measurement of SCE frequencies in plants: a simple Feulgen-staining pro-

cedure for *Vicia faba*. *Mutat. Res.* 103:321-326.

Valencia-Quintana, P.R., Sánchez-Alarcón, J., Gómez-Olivares, J.L. Juárez-Santacruz, L., García-Gallegos, E., Montiel-González, García-Nieto, E. y Waliszewski, S.

2005. Vydate L-24 un plaguicida carbámico que induce aberraciones cromosómicas en células meristemáticas de *Vicia faba*. *Rev. Int. Contam. Ambient.* 21(Supl. 1):63-70.

GENOTOXICIDAD Y CÁNCER

Raquel Ortíz Marttelo

Laboratorio de Mutagénesis y Química Ambiental

INTRODUCCIÓN

Desde la aparición de los seres humanos sobre la Tierra, estos tuvieron que aprender acerca de las plantas y los animales que se encontraban en su entorno, notaban que algunos animales y vegetales eran venenosos y que de otros podían obtener provecho. En las primeras civilizaciones, conforme el ser humano tomaba conciencia de la existencia de los principios activos medicinales y venenosos de animales y vegetales, buscaba la forma de obtenerlos e investigar sus propiedades con la idea de usarlos para curar enfermedades, como venenos para la caza y la guerra, e incluso para el control de insectos.

Con el desarrollo industrial y después de la Segunda Guerra Mundial, el número de sustancias químicas conocidas aumentó considerablemente. Al igual que en los albores de la civilización, algunas resultaron benéficas y contribuyeron a mejorar la calidad de vida del ser humano. Sin embargo, de muchas de éstas únicamente se sabía que producían el efecto deseado, pero no se conocían las consecuencias secundarias de su presencia en el ambiente. Un ejemplo de lo anterior es el DDT (diclorodifeniltri-

cloroetano), cuyo efecto insecticida remedió una gran cantidad de problemas en lo que a control de plagas se refiere, pero en ese tiempo nadie se imaginó que años después se convertiría en una de las peores pesadillas de la humanidad.

Este capítulo constituye un bosquejo de las actividades científicas del grupo de trabajo de **mutagénesis** y química ambiental, una de las áreas más apasionantes de la genética. Esta área estudia los efectos que sobre el material genético producen los compuestos químicos existentes en el entorno cotidiano de cualquier habitante del planeta, con el propósito de conocer las consecuencias y el **riesgo genotóxico potencial** para las poblaciones humanas que significa el incremento de agentes químicos en el ambiente, producto del desarrollo tecnológico. Esta definición indica que los objetivos que se quiere alcanzar son dos: i) crear técnicas para determinar los efectos y evaluar el riesgo, así como también definir el efecto de los **agentes genotóxicos** que se encuentran en el ambiente y podrían alterar la integridad del **acervo génico** de la población humana (efectos en las células germinales), y ii) buscar

datos para explicar la relación entre la **genotoxicidad** y los procesos de iniciación neoplásica (inducción de tumores, cáncer).

CARCINOGENESIS

El origen de la genética se remonta a los experimentos del monje y botánico austriaco Gregorio Mendel, para muchos el iniciador de esta rama de la biología, quien en 1887 propone su teoría de la herencia, en la actualidad conocida como leyes de Mendel. Por otra parte, fue el inglés William Bateson quien bautizó esta naciente ciencia como genética, él acuñó este término en 1905 en una carta dirigida al geólogo británico Adam Sedgwick a partir de una palabra griega que significa generar, procrear. Un acontecimiento importante de la genética más reciente fue la terminación con éxito en el año 2003 del **Proyecto del genoma humano**, en el cual con una certeza de 99.99% se ha determinado la ubicación exacta (**mapa genético**) de los 30 000 genes y el orden secuencial (**secuenciación**) de los 3 200 000 000 de pares de bases (**nucleótidos**) del genoma de la especie *Homo sapiens*.

La genética es el estudio de las leyes de la herencia, esto es los patrones que dirigen la transmisión de los caracteres que originan el **fenotipo** y el **genotipo** de los individuos. Los genes consisten en segmentos de ADN, la molécula que porta la información genética o ins-

trucciones para que los organismos efectúen todas y cada una de las funciones biológicas. Es decir, el ADN controla la estructura, la función y el comportamiento de las células y hace que éstas hagan copias casi exactas de sí mismas. Los genes contienen la información necesaria para determinar la secuencia de aminoácidos de las proteínas, éstas desempeñan una función importante en la configuración del fenotipo aunque existen otros factores, como los ambientales o los aleatorios; en conjunto la totalidad de los genes da como resultado la apariencia final o fenotipo, independientemente del genotipo del individuo.

Así, es posible referirse al caso de una rana, que desde el punto de vista de su genotipo es macho, pero por presiones ambientales —como parte de un mecanismo de supervivencia— cambia de sexo y se reproduce. Asimismo, en la especie humana existen casos en que el individuo tiene apariencia masculina pero posee órganos sexuales femeninos.

El desarrollo tecnológico busca mejorar la calidad de vida del ser humano, desafortunadamente, las sustancias químicas se utilizan cada vez más en la mayor parte de las actividades cotidianas, lo que aumenta también la frecuencia de diversas enfermedades, como las alergias, el asma y el cáncer.

La palabra cáncer proviene de la palabra griega que significa cangrejo, y se denomina así a los crecimientos abul-

tados característicos de los tumores malignos, debido a que las ramificaciones de estos se parecen a las tenazas de dicho animal. En la terminología médica el sufijo *ma* significa tumor cuando se coloca al final de ciertas palabras cuyo significado primario es otro, por ejemplo: carcinoma, o tumor de estructura epitelial predominante; adenoma, o tumor de estructura glandular; y mioma, tumor formado por tejido muscular.

Un agente **carcinógeno** o **cancerígeno** de naturaleza física, química, o biológica es aquella sustancia que actúa sobre los tejidos vivos de tal forma que produce cáncer. Generalmente, el término se refiere a los compuestos introducidos al ambiente por los seres humanos, pero es posible usarlo para toda sustancia que tiende a causar cáncer. Según el extinto Linus Pauling, premio Nobel de química en 1954 y de la paz en 1962, 85% de los pacientes con algún tipo de cáncer tienen un pH corporal ácido, medido en la orina, por lo que sugirió considerar este signo como una variable más en el diagnóstico de una enfermedad multifactorial como el cáncer.

A menudo, los carcinógenos también son **mutágenos**, esto significa que son capaces de inducir mutaciones en las células germinales y **somáticas**. Se denomina mutágeno a cualquier sustancia capaz de alterar la estructura de un gen para provocar un efecto dañino, aunque no todas las mutaciones causan

un efecto perjudicial en los individuos. La tabla 1 consiste en una lista de los órganos afectados y el nombre de los posibles carcinógenos.

Por otra parte, el efecto nocivo de algunas sustancias, como, el alcohol o la nicotina, sobre el aparato reproductor de ambos sexos se conoce bien, de modo que se advierte a los consumidores del riesgo que representan estas sustancias para la salud. Sin embargo, en el caso de otras, se conoció su efecto demasiado tarde, como el caso de la **talidomida**, la cual cuando se administra a mujeres embarazadas produce graves malformaciones en el feto. En cuanto a otras sustancias, los daños colaterales apenas se están estudiando, como los antidepresivos administrados a mujeres con cáncer de mama.

En la actualidad se sabe que los factores ambientales, como la exposición a los compuestos químicos presentes en los gases emitidos por los motores de combustión interna, los desechos industriales y el humo del cigarrillo, son la causa de 65% de los casos de cáncer en los seres humanos.

Además de la participación de los contaminantes anteriores en la generación de procesos cancerosos, otros agentes **xenobióticos** —compuestos cuya estructura química es poco frecuente o inexistente en la naturaleza debido a que son sintetizados por el ser humano, y que por lo tanto le son extraños, agre-

sivos, o ambas cosas a la vez, a un sistema biológico— pueden inducir problemas **neurodegenerativos**, del desarrollo

e inmunológicos, así como mutaciones germinales, somáticas, o ambas.

Tabla 1. Órganos humanos afectados y posibles carcinógenos.

Órgano	Carcinógeno conocido	Probable carcinógeno
Pulmón	Arsénico Asbesto Benzo(a)pireno Eter bis (clorometílico) Cromo Subsulfuro de níquel Cromato de zinc Consumo de tabaco Gas mostaza Uranio	Acrilonitrilo Berilio Cadmio 1,2-Dibromo-3-cloropropano Hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP)
Riñón	Emisiones de horno de coque Cromato de zinc	Tetracloroetileno
Vejiga	Bencidina Ciclofosfamida 4-Aminodifenilo Consumo de tabaco Clorafazina	Tetracloroetileno
Estómago	Cromato de zinc	Óxido de etileno
Piel	Arsénico Benzo(a)pireno Exposición excesiva al sol	HAP Tetracloroetileno
Hígado	Cloruro de vinilo Aflatoxinas Bebidas alcohólicas	
Boca, faringe, laringe, esófago	Bebidas alcohólicas Consumo de tabaco Tabaco de mascar (boca solamente) Gas mostaza (laringe)	
Próstata	Cadmio	

Además de la participación de los contaminantes anteriores en la generación de procesos cancerosos, otros agentes **xenobióticos** —compuestos cuya estructura química es poco frecuente o inexistente en la naturaleza debido a que son sintetizados por el ser humano, y que por lo tanto le son extraños, agresivos, o ambas cosas a la vez, a un sistema biológico— pueden inducir problemas **neurodegenerativos**, del desarrollo e inmunológicos, además de mutaciones germinales, somáticas, o ambas.

Por último, varios factores podrían ser la causa de efectos específicos en un organismo, lo que depende de:

- La cantidad de la sustancia, es decir, la dosis.
- La exposición: aguda o crónica.
- La vía de entrada: oral, dérmica, o inhalación.
- Otros factores, como edad, sexo, estado nutricional, sensibilidad.

PARTICIPACIÓN DEL METABOLISMO EN LA INDUCCIÓN DE MUTACIONES

Los seres humanos están expuestos a una gran cantidad de riesgos; como:

- Las radiaciones solares y los rayos cósmicos —la exposición a estos aumenta cuando se viaja en avión—.
- Los compuestos metálicos provenientes de un proceso industrial que se respiran o ingieren.

- Las erupciones volcánicas, las cuales emiten una gran cantidad de partículas en el aire.
- Agua o alimentos contaminados con bacterias, u hongos.
- Plantas tóxicas, que ingresan en el organismo de modo accidental.
- Los métodos de procesar algunos alimentos: fermentación, ahumado, rostizado, etc.
- El aire, proveniente de diversas actividades antropógenas.

La inducción del daño genético entraña varios pasos o etapas (véase *la figura 1*). i) La interacción química (casi siempre covalente) con el ADN para formar **aductos**. Los mutágenos se unen directamente al ADN, o sólo después de ser modificados por enzimas (**bioactivación**). De esta manera el metabolismo de los organismos desempeña una función fundamental. ii) Los aductos de ADN pueden ser eliminados mediante mecanismos específicos de reparación. iii) Si el daño genético se repara con errores o permanece sin repararse origina diversos efectos biológicos, como a) toxicidad aguda: letalidad celular o de individuos, b) efectos crónicos: mutagénesis, carcinogénesis, o ambas.

En general, los agentes genotóxicos se estudian teniendo presentes los siguientes criterios:

- Forma de interacción con el ADN.

- Función del metabolismo en la generación de los efectos.
- Resultados biológicos de la interacción con el ADN.

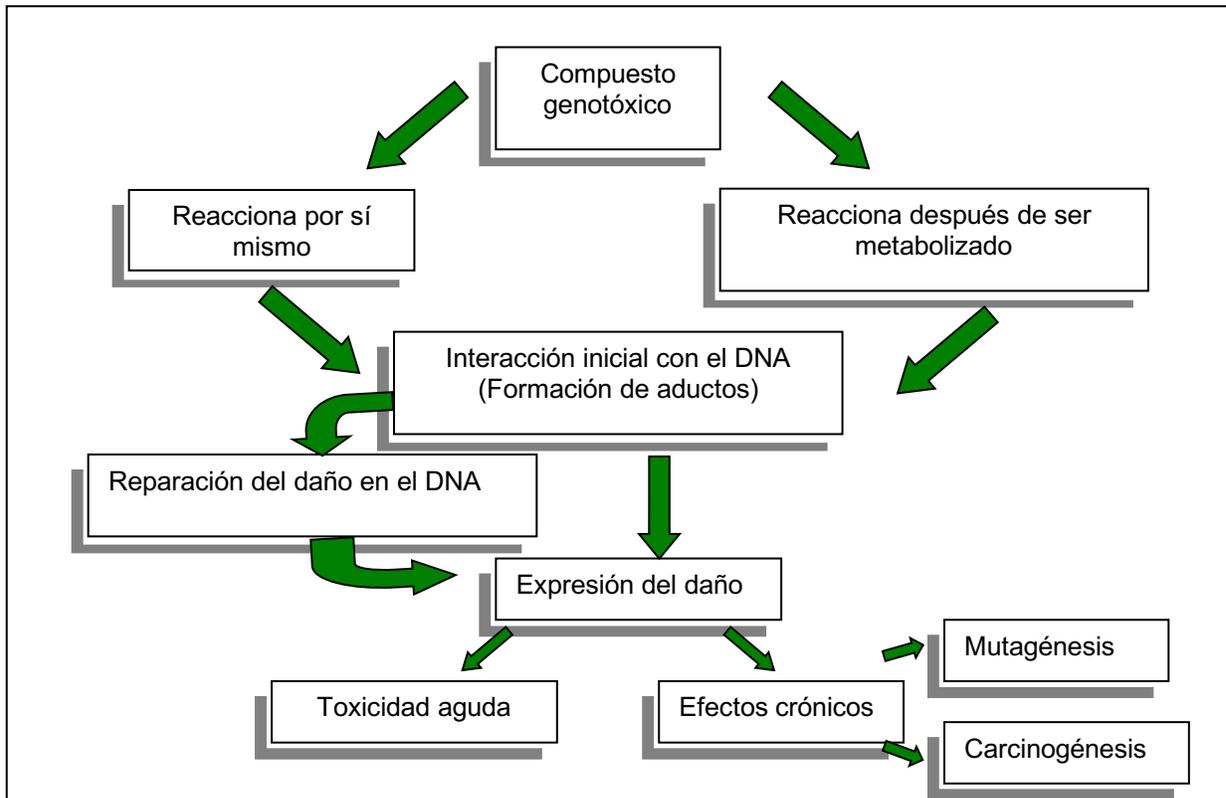


Figura 1. Etapas de la expresión del daño al ADN, desde la exposición hasta la manifestación final.

Los compuestos genotóxicos pueden dividirse en dos clases. i) La primera se conoce como de acción directa, ya que su efecto se debe a la interacción del compuesto con el ADN por sí mismo y no requieren activación metabólica, algunos ejemplos de compuestos químicos de acción directa son metil metanosulfonato (MMS), epóxido (EO), bis(cloroetil)nitrosourea y diepoxibutano. ii) El segundo tipo son el gran número de compuestos que requieren ser metabolizados antes de producir alguna mutación o alteración en el material hereditario, o

convertirse en compuestos tóxicos para la célula; ejemplos de algunos mutágenos indirectos o **promutágenos** son:

- Hidrocarburos aromáticos policíclicos y heterocíclicos: 7,12-dimetilbenzo(a) antraceno y benzo(a)pireno.
- Aminas aromáticas: 2-acetilamino-fluoreno.
- Nitrosaminas: dietilnitrosamina.
- Algunos hidrocarburos clorados: cloruro de vinilo.
- Productos naturales: heliotrina, aflatoxina B1.

Como se observa, los agentes genotóxicos de tipo indirecto comprenden un gran número de sustancias diferentes en cuanto a estructura química y sin ninguna relación entre muchas de ellas, por lo que la susceptibilidad a un grupo de promutágenos no significa necesariamente que exista para otro grupo. De igual manera, se debe tener presente que si en una estructura varía un solo radical (p. ej., un metilo), los efectos biológicos se modifican considerablemente a causa de las diferentes rutas metabólicas en que esa estructura particular puede participar. La mayoría de los promutágenos son de naturaleza **lipófila** al pH fisiológico normal (6.3 a 7.4), por lo que para que sean excretados es necesario que se transformen en moléculas **hidrófilas** mediante reacciones metabólicas. Esta **biotransformación** es un proceso que incluye varias etapas o pasos y resulta en la formación de agentes genotóxicos capaces de formar aductos con el ADN.

Agentes alquilantes

Uno de los grupos de mutágenos mejor estudiados es el de los compuestos alquilantes.

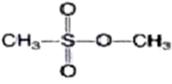
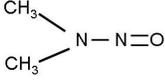
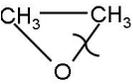
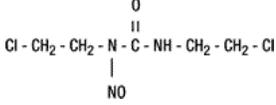
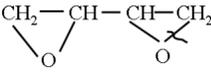
Estos son compuestos capaces de transferir un grupo alquilo a macromoléculas biológicas importantes (ADN, ARN, proteínas). Dos propiedades de importancia para su modo de acción son: i) el

grupo alquilo transferido, el cual puede ser un etilo ($-\text{CH}_2\text{CH}_3$) o un grupo más complejo como un acetilo ($-\text{CH}_2\text{COCH}_3$), y ii) el número de grupos alquilo que cada molécula puede donar. En la tabla 2 se enumeran algunos agentes alquilantes y los grupos que transfieren a las macromoléculas.

El efecto genético causado por los agentes alquilantes podría ser modificado por los diversos procesos que ocurren entre el momento de la exposición de la célula al mutágeno y la expresión del daño. Inicialmente, en la exposición ***in vivo*** influye la distribución del compuesto en el tejido. Posteriormente, es posible que haya alguna modificación enzimática antes de que el **compuesto parental** o su **metabolito** interaccione y lesione al ADN. Este daño podría remediarse mediante la reparación del ADN, o bien afectar la duplicación o la transcripción, lo cual a su vez podría resultar en la pérdida de la integridad del ADN y manifestarse como letalidad celular, o hacer que se exprese la mutación.

Por todo lo anterior, el tipo y la cantidad de mutaciones reparadas depende de las características químicas del compuesto, la capacidad del tejido o la célula que constituyen el blanco para procesar y eliminar el compuesto, los sitios disponibles en el ADN y los procesos enzimáticos vinculados al ADN de la célula.

Tabla 2. Principales clases de agentes alquilantes, grupo alquilo que transfieren y mecanismo de acción.

Monofuncionales		Mecanismo
Metil metanosulfonato, (MMS)		Metilo; directo
Dimetilnitrosamina, (DMN)		Metilo; indirecto
Monofuncional cíclico		
Epóxido, (EO)		Epóxido; directo
Bifuncional		
Bis(cloroetil)nitrourea		Cloroetilo; directo
Bifuncional cíclico		
Diepoxibutano		Diepóxido; directo

Los mutágenos MMS, DMN y EO son monofuncionales porque únicamente pueden transferir un grupo reactivo, mientras que el bis(cloroetil)nitrosourea y el diepoxibutano son bifuncionales debido a que pueden transferir dos grupos. Por otra parte, el grado de funcionamiento de los compuestos no se basa en el número de grupos alquilo presentes en la molécula, sino en la cantidad de grupos que pueden ser transferidos a las macromoléculas; en el caso de los alquil alquenosulfatos, como el MMS, estos donan únicamente uno de los dos grupos metilo. De igual manera, lo anterior se aplica a los dialquil sulfatos (p. ej., dietil

sulfato), los cuales actúan como agentes alquilantes monofuncionales. Existen cinco grandes grupos de agentes alquilantes: mostazas nitrogenadas, etileniminas, alquil sulfonatos, nitrosoureas y triacenos; los cuales se emplean también para el tratamiento de la mayoría de las **neoplasias**.

Hidrocarburos aromáticos policíclicos

Uno de los grupos de hidrocarburos más importantes relacionados con la carcinogénesis es el de los aromáticos policíclicos (HAP). Estos compuestos están ampliamente distribuidos en la atmósfera y se ha demostrado que son capaces de

inducir cáncer en varias especies de animales. Sin embargo, aun cuando un pequeño cambio en la estructura molecular hace que la actividad biológica de este tipo de compuestos varíe de un modo considerable, no todos los HAP a los que están expuestos los seres humanos se han estudiado a fondo. De igual manera, reaccionan con otros contaminantes, como los óxidos de nitrógeno presentes en la combustión incompleta de los derivados del petróleo, propiedad que en algunos casos los hace más peligrosos para los componentes celulares y subcelulares de los organismos. Se calcula que anualmente se descargan a la atmósfera 3 000 000 de toneladas de contaminantes como resultado de las actividades antropógenas, de las cuales aproximadamente 1 000 son HAP, pero en las áreas industriales el volumen puede llegar a ser hasta 10 000 veces más alto que el encontrado en las ciudades.

Estos compuestos se encuentran en el ambiente en estado gaseoso o bien asociados con algunas de las partículas suspendidas en el aire, las cuales según su tamaño (**diámetro aerodinámico**) al ser inhaladas quedan en diferentes partes del tracto respiratorio. Todos estos compuestos que contaminan el ambiente forman mezclas complejas en las cuales se producen reacciones **sinérgicas**, o antagónicas, que influyen en la actividad de la mezcla total. Por ejemplo, los bosques emiten a la atmósfera un hidrocar-

buro del tipo de los terpenos que se sabe tiene un efecto carcinógeno.

El hecho de que los efectos en eucariontes y procariontes sean similares, lleva a considerar nuevamente la forma en que interaccionan los agentes alquilantes con el ADN, ya que la gama de mutaciones depende del tipo de metabolitos que se formen a partir de los HAP; aspecto que se trata con mayor detalle en la siguiente sección, relativa a la participación del metabolismo en la **mutagenicidad** de los compuestos directos e indirectos.

Aminas aromáticas

Este grupo de compuestos ha sido ampliamente estudiado debido a que se encuentra presente en los alimentos, el humo del cigarrillo y los humos generados al cocinar y asar los alimentos con una gran cantidad de grasa. Aunado a lo anterior, las aminas aromáticas han sido identificadas como carcinógenos potentes, tanto en estudios epidemiológicos como en animales de laboratorio.

Las aminas aromáticas, al igual que los HAP y algunos de los agentes alquilantes, deben experimentar transformaciones metabólicas para que sean capaces de producir un efecto mutágeno. Esta inducción de daño en el ADN se realiza mediante dos mecanismos: i) el compuesto parental modificado o su(s) metabolito(s) interaccionan con el ADN y forman aductos —en este caso el efecto

de cada una de las aminas aromáticas depende tanto de su naturaleza química como de algunos otros factores genómicos implicados en los procesos de bio-

transformación—, y ii) la expresión del daño genético, ya sea que éste se repare, o que la reparación sea con errores (figura 2).

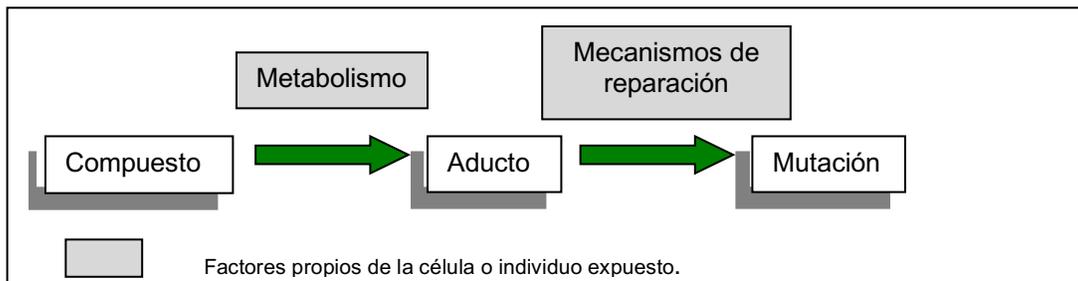


Figura 2. Factores que intervienen en la mutagenicidad de las aminas aromáticas.

El potencial mutágeno de cada compuesto depende de la estructura y la reactividad químicas, así como también de las rutas metabólicas que deba seguir. En general se piensa que los compuestos mutágenos siguen básicamente dos rutas: i) la N-acetilación enzimática y ii) la N-sulfonación enzimática de la molécula; en ambos casos luego de una oxidación del compuesto parental para formar metabolitos N-hidroxilo —que pueden seguir o no las dos rutas anteriores—, en esta oxidación participan enzimas del complejo microsómico P450. Aunque en estos procesos de oxidación intervienen diversas isoenzimas del complejo P450, se ha demostrado que la más eficiente en la activación de las aminas es la isoenzima 1A2.

La oxidación de estos mutágenos puede ocurrir en los anillos aromáticos o en la amina externa. El N-hidroxilo resultante es un precursor del producto final

que se unirá al ADN, pero al parecer la oxidación del anillo es una reacción de desintoxicación; sin embargo, se debe tener en cuenta que el hidroxilo formado resulta en el rearrreglo de un epóxido aromático, potencialmente mutágeno.

En lo que respecta a la afinidad del metabolito final por el ADN, se ha observado que hay varios sitios nucleófilos a los que se puede unir, estos incluyen el C₈, O₆ y N₂ de la guanina.

Una vez formado el aducto, es posible que se lleve a cabo algún proceso de reparación del ADN, al parecer el mecanismo para reparar el daño causado por las aminas aromáticas es la **escisión de nucleótidos**. Este proceso es el que realiza la reparación del daño causado por aquellos compuestos que originan abultamientos al formar aductos con el ADN.

Por otra parte, para evaluar el cambio de pares de bases por aminas

aromáticas en células de mamíferos se han efectuado varios estudios.

Con el propósito de ilustrar la forma en que un mutágeno indirecto es transformado mediante estos procesos enzimáticos, se dan dos ejemplos: i) las rutas metabólicas del benzo (g,h,i) perileno o BP, como un modelo representativo de los HAP, y ii) el proceso de acetilación de las aminas aromáticas.

El primer paso en el metabolismo del BP es catalizado por las monooxigenasas del citocromo P450, y resulta en la formación de óxidos de areno. En el segundo paso del proceso, en la mayoría de los casos, estos óxidos son transformados por una enzima epóxido hidrolasa en 7,8-dihidrodiol. Posteriormente este compuesto es a su vez metabolizado por monooxigenasas, para llegar a la especie final, un epóxido (7,8-diol-9,10-epóxido), el cual es el causante de la **carcinogenicidad** del BP.

En el caso de las aminas aromáticas, los efectos de éstas se producen por la conjugación de metabolitos N-oxidados con grupos acetato o sulfato, formándose N-acetoximetabolitos de arilhidroxilaminas. Estos reaccionan con los ácidos nucleicos, generalmente en la posición C₈ de la guanina, con pérdida del grupo N-acetoxilo. Los metabolitos bioactivados de las aminas aromáticas podrían entonces formarse por la O-acetilación de la hidroxilamina con la acetil coenzima A, la cual actuaría como

donador del acetilo. O bien por otro mecanismo que consiste en que el centro N-acetil de los ácidos arilhidroxámicos (N-hidroxi-N-acetilaminoarenos) es removido enzimáticamente por la N,O-acetiltransferasa y luego transferido al oxígeno de las hidroxilaminas para dar como resultado N-acetoxiarilaminas.

El metabolismo de los compuestos químicos en el organismo puede dividirse en dos fases o tipos de reacción (Fase I y Fase II). La primera implica la oxidación, hidrólisis, o reducción de los agentes xenobióticos y es catalizada predominantemente por los citocromos P450 (CYP) y las flavin monooxigenasas (FMO). Las reacciones de la fase II efectúan la conjugación del compuesto o de los metabolitos generados a partir de éste en la primera fase. Esta conjugación se efectúa con radicales acetilo, glucouronilo, aminoácidos, metilo y grupos sulfato, y da como resultado la formación de sulfatos y glucouronidos por la acción de las enzimas glutatión S-transferasa, uridin difosfato glucouroniltransferasa, sulfotransferasa, N-aciltransferasa y N,O-acetiltransferasa.

Las reacciones anteriores son un proceso de desintoxicación; sin embargo, una gran cantidad de contaminantes podrían llegar a formar especies químicas altamente electrófilas, luego de experimentar alteraciones en una o en las dos fases según su naturaleza química, la cual determina el metabolismo al que

están sujetos. Generada la especie reactiva, esta se puede unir a macromoléculas, como el ADN y las proteínas. Una gran cantidad de datos indica que las diferencias en los procesos metabólicos que experimenta una molécula en las fases I y II, resultan cruciales para determinar las especies químicas y la sensibilidad tisular e individual.

COMENTARIOS

Para evaluar la toxicidad de un agente químico es necesario tener en cuenta aspectos, como las características físicas y químicas; el uso, el **sistema de prueba** a utilizar —vegetales, bacterias, insectos, o mamíferos—, y desde luego, también se necesita escoger un método; *in vitro*, *in vivo*, o un modelo matemático. Lo anterior se asemeja a cuando se prueba un fármaco que va a utilizarse en el ser humano, la sustancia se analiza mediante diferentes sistemas de prueba que hacen uso de organismos vegetales, o animales, desde los muy sencillos hasta los más cercanos a los seres humanos.

De igual manera, no basta con determinar si la sustancia es o no tóxica, también se requiere utilizar una serie de pruebas que hagan patente el tipo de daño. De esta manera, se cuenta con pruebas para conocer el efecto sobre la descendencia, como las de carcinogenicidad, mutagenicidad, o genotoxicidad.

Las pruebas de mutagenicidad uti-

lizan diferentes organismos, en general se escogen las de corto término, como el ensayo de Ames, que se realiza *in vitro* y da rápidamente resultados.

Otro ensayo de corto término pero *in vivo* es la prueba SMART (siglas de **Somatic Mutation and Recombination Test**) de mutación y recombinación en células somáticas de las alas o los ojos del díptero *Drosophila melanogaster*, mejor conocido como la mosca de la fruta. Este pequeño eucarionte es capaz de hacer patente el daño de una sustancia, ya sea mutágena o carcinógena. Los mecanismos que es posible detectar con la prueba SMART son la mutación, la **deleción**, la **no disyunción** y la recombinación somática. En la mayoría de las especies de animales, el órgano encargado de metabolizar las sustancias que ingresan al organismo es el hígado; en el caso de *Drosophila melanogaster*, no cuenta con dicho órgano, pero posee un complejo enzimático que funciona de manera similar a la del hígado de un mamífero. Esta característica permite relacionar los resultados obtenidos mediante este sistema con el posible daño en un organismo superior, como el ser humano.

En el Laboratorio de Mutagénesis y Química Ambiental del CIGyA se trabaja con sustancias químicamente puras, muestras ambientales de agua y aire utilizando tres sistemas biológicos.

BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

- Baird, W. M., L. A. Hooven y B. Mahadevan. 2005. Carcinogenic polycyclic aromatic hydrocarbon DNA adducts and mechanism of action. *Environ. Mol. Mutagen.* 45(2-3):106-114.
- Graf, U., F. E. Wurgler, A. J. Katz, H. Frei, H. Juon, C. B. Hall y P. G. Kale. 1984. Somatic mutation and recombination test in *Drosophila melanogaster*. *Environ. Mutagen.* 6(2):153-188.
- Hamdan, M. H. 2006. *Cancer Biomarkers*. John Wiley & Sons. Nueva York.
- Lybarger, J. A., R. F. Spengler, y C. T. DeRosa (Eds.). 1993. *Priority health conditions: An integrated strategy to evaluate the relationship between illness and exposure to hazardous substances*. Agency for Toxic Substances and Disease Registry, Atlanta, Georgia. p. 61.
- Mc Gregor, B. D., M. J. Rice y S. Venitt (Eds.). 1999. *The use of short and medium term tests for carcinogens and data on genetic effects in carcinogenic hazard evaluation*. International Agency for Research on Cancer (IARC) Scientific Publications, No. 146.
- Saner, C., B. Weibel, E. F. Wurgler y C. Sengstag. 1996. Metabolism of promutagens catalyzed by *Drosophila melanogaster* CYP6A2 enzyme in *Saccharomyces cerevisiae*. *Environmental and Molecular Mutagenesis* 27:46-58.
- Schiefer, B., D. G. Irvine y S. C. Buzik. 1997. *Understanding Toxicology. Chemicals, their benefits and risks*. CRC, Nueva York.

GLOSARIO

En cada capítulo se explican los términos científicos con un lenguaje sencillo fácil de entender. Los términos nuevos se destacan en negritas, se definen la primera vez que se utilizan, y casi todos se incluyen en el glosario.

Aberraciones cromosómicas: Accidente que sucede durante la meiosis de los gametos o en las primeras divisiones del huevo y que provoca una anomalía de número o estructura de los cromosomas. Las aberraciones cromosómicas son cambios estructurales fácilmente observables en la metafase del ciclo celular y son originadas por roturas de las cadenas de ADN no reparadas o mal reparadas.

Abcisión: Separación o caída normal de un órgano, ya sea una rama, una hoja o un fruto, al deshacerse las paredes celulares en la base de dicho órgano.

Absorción: Proceso por medio del cual un compuesto xenobiótico atraviesa membranas y capas de células para llegar al torrente sanguíneo.

Acéntrico: Que no tiene centro. Cromosoma o fragmento de éste que no tiene centrómero.

Acervo génico: (en inglés *gene pool*; también puede usarse *patrimonio génico* o *reserva génica*) El acervo génico de una especie o población es el grupo completo de alelos únicos que se encon-

trarían al inspeccionar el material genético de la totalidad de los individuos existentes en dicha población.

Adaptación: proceso que permite la adecuación fisiológica, individual o de grupo, a un ambiente específico, para lograr una alta tasa de supervivencia, buen crecimiento, reproducción y resistencia a plagas.

Aducto: Complejo que se forma cuando un compuesto químico se une a una macromolécula celular importante, como el ADN o las proteínas. Los aductos de ADN son formas de ADN que resultan de una exposición a compuestos carcinógenos (en el caso de los fumadores, serían los carcinógenos presentes en el humo de tabaco). Un aducto de ADN, una vez formado, puede repararse. Esto significa una vuelta a la estructura original de ADN. También puede ser mal reparado, lo que resulta en una mutación. Los aductos de proteína, a pesar de no tener efectos biológicos adversos, sirven para medir la exposición a sustancias extrañas.

Aereación: Exposición de una sustancia o un medio a la acción del aire u otros gases. También la introducción de aire en cualquiera de estos dos por procesos naturales o artificiales, a menudo se emplea con propósitos de purificación.

Aerobio: En cuanto a un organismo: uno que requiere oxígeno para su existencia.

En cuanto a un proceso: uno que se efectúa en presencia de oxígeno. En las zonas de las plantas de tratamiento de aguas residuales en las que se efectúa este proceso, se mantiene el agua fuertemente agitada para que haya abundante oxígeno en el agua y las bacterias puedan realizar sus procesos metabólicos.

Agroquímicos: Cualquier producto o sustancia química utilizada en la agricultura, la ganadería, o la actividad forestal a fin de incrementar la producción. Incluyen fertilizantes químicos, herbicidas, plaguicidas, hormonas, etc.

Aguas residuales: Agua que ha sido empleada por una comunidad para diferentes usos. En América Latina, según la región o el país, se le asignan diferentes nombres: agua residual, agua negra, agua sucia, agua servida, agua sanitaria, agua cloacal, agua municipal, etc. Según la norma oficial mexicana, las aguas de composición variada provenientes de las descargas de usos municipales, industriales, comerciales, agrícolas, pecuarios, domésticos y similares, así como la mezcla de ellas.

Aguas superficiales: Agua que se halla en la superficie de la Tierra, como lagos, ríos, arroyos, estanques y manantiales.

Ambiente o medioambiente: La suma de todas las condiciones e influencias externas que afectan al desarrollo de un organismo. Todo lo que rodea a un organismo, los componentes bióticos y abióti-

cos. (La expresión *medio ambiente* podría ser considerada como un pleonasma porque los dos elementos de dicha grafía tienen una acepción coincidente con la acepción que tienen cuando van juntos. Por ello, el Diccionario panhispánico de dudas de la Real Academia Española recomienda utilizar la grafía *medioambiente*, cuyo plural es *medioambientes*.)

Anaerobio: En cuanto a un organismo: uno capaz de vivir sólo en ausencia de oxígeno. Los organismos podrían ser anaerobios facultativos (p. ej., las levaduras), o anaerobios obligados (p. ej., las bacterias sulfurosas). En cuanto a un proceso: uno que se efectúa sólo en condiciones libres de oxígeno.

Análogo: Compuesto químico similar a otro en cuanto a estructura pero ligeramente distinto en cuanto a composición (por ejemplo, el reemplazo de un átomo por otro átomo de un elemento diferente, o la presencia de un grupo funcional particular). Derivado estructural de un compuesto parental que a menudo difiere de éste en un solo elemento.

Aneuploidia: Cualquier variación del número de cromosomas que afecta a los cromosomas aislados en vez de a toda la serie. Puede haber un número inferior de cromosomas, como ocurre en el síndrome de Turner, o mayor, como sucede en el síndrome de Down.

Anóxico: Adjetivo que significa con poco o nada de oxígeno libre, se emplea para referirse a un hábitat microbiano.

Antropógeno: De origen humano o derivado de la actividad de los seres humanos.

Apoptosis: Tipo de muerte celular en la que una serie de procesos moleculares en la célula resultan en la muerte de ésta. Este es el proceso normal mediante el cual el cuerpo se deshace de células innecesarias o anormales. El proceso de apoptosis puede estar impedido en las células cancerosas. También se conoce como muerte celular programada.

Árbol: Planta leñosa perenne con un solo tronco principal o, en el caso del monte bajo, con varios tallos, que tiene una copa más o menos definida. Incluye: bambúes, palmeras y otras plantas leñosas que cumplan con los criterios señalados.

Astrocitos: Células abundantes en el cerebro y la médula espinal que forman una barrera aislante en estas estructuras. Su forma (como indica su nombre) recuerda a una estrella por la gran cantidad de prolongaciones llamadas *pies* que irradian del soma hacia células vecinas. Algunas de estas prolongaciones están en contacto con un vaso sanguíneo (capilar) formando podocitos (también llamados procesos pediculares o pies perivasculares), o también pueden rodear las sinapsis nerviosas. La principal tarea de los astrocitos es unir las neuronas a los capilares sanguíneos, y mantener una concentración equilibrada entre el medio extracelular y el intracelu-

lar para prevenir el ingreso de determinadas sustancias posiblemente tóxicas.

Basal, valor: Valor inicial que servirá de base para controlar los resultados de un tratamiento o el desarrollo de una enfermedad.

Bioactivación: Proceso metabólico mediante el cual un producto que no presenta actividad, la adquiere cuando es biotransformado.

Biodegradable: Susceptible de degradación.

Biodegradación: Proceso de descomposición de una sustancia mediante la acción de organismos vivos, normalmente implica la descomposición completa de un compuesto orgánico en sus componentes inorgánicos —es decir, la mineralización—.

Biodisponibilidad: Asimilación de un contaminante por los organismos, y en consecuencia la posibilidad de causar algún efecto, negativo o positivo.

Biodiversidad (diversidad biológica): Se refiere a la variabilidad de la vida; abarca tres niveles de expresión: ecosistemas, especies y genes. Esta diversidad se expresa en los diferentes tipos de ecosistemas, el número de especies, el cambio de riqueza de especies de una región a otra, el número de especies endémicas, las subespecies y variedades o razas de una misma especie (Conabio 1998).

Bioensayo: Prueba en la cual se determina la naturaleza peligrosa de una sus-

tancia por su reacción con un tejido o un organismo vivos.

Bioindicadores: Se puede definir un organismo bioindicador, en su sentido amplio, como aquel cuyas funciones vitales se relacionan con efectos medioambientales, tanto naturales como antropógenos, de tal manera que es posible utilizarlo para señalar la presencia de alguno de estos factores. Otros autores utilizan el término en un sentido más restringido, para referirse a aquellos organismos cuya presencia indica la existencia de contaminantes antropógenos, y de esta manera pueden reemplazar a la utilización de equipos técnicos.

Biomarcador: Carácter físico o bioquímico utilizado para medir o indicar los efectos o el avance de una determinada enfermedad o condición. En otras palabras, cambios medibles de naturaleza bioquímica, fisiológica o morfológica relacionados con la exposición a un tóxico.

Biomasa: Las distintas regiones geográficas que existen en nuestro planeta. Un bioma es una comunidad biótica que se caracteriza por poseer una flora dominante (conjunto de las especies vegetales de una región determinada), así como también una fauna (las especies animales presentes en una determinada región) y un clima (tiempo promedio de una región durante un periodo largo) particulares. El tiempo es el estado de la atmósfera en un entorno específico en un momento determinado. Por ejemplo,

los bosques y las praderas.

Biomasa: Peso total de todos los organismos vivos (productores, consumidores y descomponedores) de un tipo particular presentes en un ecosistema, o en un nivel trófico particular de una cadena alimentaria; por lo general se expresa en peso seco por unidad de área.

Biomonitoreo: La utilización de biomonitores en series definidas de medición con la finalidad de evaluar la calidad del aire en un sitio determinado, para un contaminante específico o un grupo de contaminantes presentes en dicha zona. Cuando los biomonitores que se utilizan son aquellas especies que se encuentran presentes en los ecosistemas a evaluar, entonces se habla de biomonitoreo pasivo. En cambio, cuando los biomonitores son especies que se introducen (transplantes) o se utilizan sistemas de exposición controlada, o ambos, se trata de estudios de biomonitoreo activo. Tal vez la característica más importante del biomonitoreo es que es la única técnica capaz de proporcionar una medida directa de la exposición de individuos y poblaciones humanas. Sin embargo, dado que requiere una gran cantidad de recursos, sólo un número relativamente pequeño de individuos y compuestos puede ser monitoreado. Esto, a su vez, limita la cantidad y la aplicabilidad de los datos analíticos colectados.

Biomonitores: Organismos, partes de organismos o una comunidad de ellos

que permiten “cuantificar” la calidad atmosférica mediante comparación de intervalos o en relación con un nivel considerado como basal. Su comportamiento muestra una relación lineal en términos de dosis-respuesta ya sea con la concentración de un contaminante en el aire, con la combinación de ellos, o con el tiempo de exposición. La respuesta en forma de una reacción específica o la acumulación de ciertos contaminantes, idealmente debe ser fácilmente medible con una metodología de bajo costo y debe diferenciarse de reacciones provocadas por factores naturales.

Biopelícula: Capa delgada de células vivientes, (generalmente microorganismos), que recubre una superficie.

Biopila: Suelo contaminado que se apila sobre un sistema de distribución de aire.

Biorremediación: Alternativa biológica para el tratamiento de suelos contaminados, la cual implica el uso de microorganismos para remover los contaminantes presentes.

Biosfera: Conjunto que forman los seres vivos con el medio físico en que se desarrollan. Este significado de "envoltura viva" de la Tierra, es el de uso más extendido, pero también se habla de biosfera para referirse al espacio dentro del cual se desarrolla la vida.

Biota: Todos los seres vivos, sean plantas, animales, o microorganismos.

Biotopo: Sustrato no vivo del ecosistema, es decir el conjunto de todos los

elementos abióticos (no vivos). Unidad geográfica pequeña de la biosfera o de un hábitat, que puede ser delimitada y caracterizada por su propia biota.

Biotransformación: Alteración química de la estructura molecular de un compuesto orgánico o inorgánico, que resulta en una complejidad diferente o en la pérdida de ciertas características sin pérdida de la complejidad molecular. Como se produce un cambio en la estructura del compuesto, la toxicidad y la movilidad del compuesto original son afectadas.

Cadena alimentaria: También llamada cadena trófica, es una sucesión ordenada de seres vivos en la cual cada ser vivo sirve de sustento alimentario para el otro. En otras palabras, es la corriente de energía y nutrientes que se establece entre las distintas especies de un ecosistema en relación con su alimentación.

Cáncer: Grupo de enfermedades que presentan una característica común: la proliferación de células que escapan a las leyes de la homeostasis tisular y cuyo resultado final es la formación de una masa tumoral.

Carcinogenicidad: Capacidad de inducir la aparición de un cáncer.

Carcinógeno o cancerígeno: Cualquier sustancia capaz de inducir cáncer en un organismo. Se denomina carcinógeno a cualquier agente físico, químico, o biológico capaz de originar un incremento significativo del riesgo de cáncer cuando es administrado a cualquier dosis, por

cualquier vía de administración, durante cualquier tiempo a cualquier especie animal.

Carga de enfermedad: Costo personal de una enfermedad (aguda o crónica). Puede ser económico, social o psicológico, o bien una pérdida personal, familiar o del grupo más cercano. Se refleja en ausentismo laboral, productividad, respuesta al tratamiento, calidad de vida, entre otros. También se le define como años restados a la vida sana por incapacidad o muerte prematuras.

Cariotipo: Ordenamiento de los cromosomas de una célula metafásica de acuerdo con su forma y tamaño. El cariotipo es característico de cada especie; por ejemplo, el ser humano tiene 46 cromosomas, o 23 pares de cromosomas, organizados en 22 pares autosómicos y un par sexual (hombre XY, mujer XX).

Célula somática: Célula que es un componente del cuerpo, en contraste con una célula germinal que es capaz — cuando es fertilizada— de reproducir al organismo.

Centrómero: Región de un cromosoma donde se fijan las fibras del huso acromático durante la división celular. Es la constricción principal y aparece menos teñida que el resto del cromosoma.

Ciclo celular: Secuencia de etapas o fases que atraviesa una célula entre una división y la siguiente. Consta de un periodo en el que no hay división (interfase)

y un periodo de división (mitosis). La interfase tiene una fase sintética, S, en la que el ADN se duplica. Esta fase S es precedida por la fase G_1 y seguida de la G_2 .

Ciclo enterohepático: Ciclo recurrente en el cual las sales biliares y otras sustancias excretadas por el hígado atraviesan la mucosa intestinal, son reabsorbidas por las células hepáticas y luego vuelven a excretar.

Cigoto: La célula producida por la unión de dos células sexuales maduras (gametos) durante la reproducción.

Cinasa: Cualquiera de las varias enzimas que catalizan la transferencia de un grupo fosfato desde un donador, como ADP o ATP, a un aceptor. Una enzima que cataliza la conversión de una proenzima en una enzima activa.

Citotoxicidad: Grado en que un agente posee una acción destructiva específica sobre algunas células, o la posesión de tal acción citotóxica.

Clon: individuos genéticamente multiplicados por propagación vegetativa: injertos, enraizamiento de estacas o acodos aéreos, rizomas, embriones somáticos.

Cólera: Enfermedad infecciosa producida por una bacteria que se transmite a través de aguas contaminadas y origina dolores abdominales, vómitos y diarreas capaces de causar la muerte.

Coliformes, bacterias: Bacterias que se encuentran en el intestino humano o en el de otras especies. La más conocida es

Escherichia coli. Se usan en los análisis de calidad de las aguas pues su presencia indica contaminación con heces. La Organización Mundial de la Salud recomienda una cuenta de 0 colonias por cada 100 ml de agua para beber.

Colinesterasa: Enzima encontrada principalmente en las terminaciones nerviosas, la cual inactiva al neurotransmisor acetilcolina hidrolizándolo para formar ácido acético y colina.

Compostación: Degradación microbiana controlada de desechos orgánicos para obtener como resultado un producto con valor potencial como acondicionador de terrenos.

Coníferas: Todos los árboles incluidos en el grupo taxonómico de las gimnospermas. Se les conoce también como “árboles de madera blanda”. El término hace alusión a la forma cónica de la copa de la mayor parte de los árboles que constituyen este grupo.

Conservación *ex situ*: Mantenimiento de algunos componentes de la biodiversidad fuera de sus hábitats naturales. Este tipo de conservación incluye tanto el almacenamiento de los recursos genéticos en bancos de germoplasma, como el establecimiento de colecciones de campo y el manejo de especies en cautiverio. El objetivo primordial de la conservación *ex situ* es mantener la supervivencia de las especies en su medio natural, por lo que debe ser considerada como un complemento para la conservación de espe-

cies y recursos genéticos *in situ*, sobre todo cuando se trata de especies críticamente amenazadas. Existen dos tipos de conservación *ex situ*: i) bancos de germoplasma, donde se conservan las especies para la alimentación y la agricultura; ii) centros con especies que se dividen en centros de fauna (zoológicos, centros de rescate, museos) y centros de flora (jardines botánicos, viveros).

Conservación *in situ*: Conservación en el propio sitio. Es el proceso de proteger a la diversidad biológica en las áreas en que ésta ocurre naturalmente, procurando mantener la diversidad de los organismos vivos, sus hábitats y las relaciones entre los organismos y su ambiente. El beneficio de la conservación *in situ* es que se mantienen las poblaciones en recuperación en el propio ambiente donde se desarrollan sus características distintivas. Como último recurso, cuando la conservación *in situ* presenta dificultades insalvables o imposibles, se utiliza la conservación *ex situ* en parte o en toda la población.

Constricción primaria: Zona de constricción presente en todos los cromosomas que divide a cada cromátida del cromosoma en dos brazos, quedando entre los dos una porción llamada centrómero.

Contaminante: Toda materia o energía en cualquiera de sus estados físicos y formas, que al incorporarse o actuar en la atmósfera altera o modifica la compo-

sición y la condición naturales de la misma.

Compuestos orgánicos persistentes:

Los productos químicos conocidos como compuestos orgánicos persistentes (COPs) son potentes plaguicidas, o se emplean para varios fines industriales. Algunos COPs también son emitidos como productos no intencionales de la combustión y algunos procesos industriales. En tanto que el nivel de riesgo varía de un COPs a otro, todos estos compuestos tienen las siguientes propiedades: 1) son altamente tóxicos, 2) son persistentes, es decir duran varios años o décadas antes de degradarse a formas menos dañinas, 3) se evaporan y viajan a grandes distancias en el aire y el agua, y 4) se acumulan en los tejidos grasos de los organismos vivos, incluido el ser humano. Los efectos de estos contaminantes en los ecosistemas son variados y nocivos e incluyen defectos congénitos, cáncer, alteraciones del sistema de inmunidad y problemas reproductivos en diferentes especies. En los humanos, las pruebas indican que los efectos son similares a los que se observan en los animales: cáncer, problemas de fertilidad, mayor susceptibilidad a las enfermedades y alteraciones neurológicas. Los contaminantes que integran el grupo de los compuestos orgánicos persistentes son: aldrín, clordano, dieldrina, endrina, heptacloro, hexaclorobenceno, mirex, toxafeno, PCB, DDT, dioxinas y furanos.

Crenación: Contracción de las células —que aparecen con proyecciones citoplasmáticas irregulares y muy abundantes— en una solución hipertónica debido a la pérdida de agua por ósmosis. Este encogimiento provoca el detenimiento de las funciones propias de la célula, lo que da como resultado que la célula no tenga un buen funcionamiento e incluso muera.

Cromátidas hermanas: Las dos cromátidas de un cromosoma, unidas por el centrómero. Las cromátidas *no* hermanas están situadas en cromosomas diferentes aunque homólogos.

Cromosoma: Cada uno de los corpúsculos, generalmente filamentosos, que existen en el núcleo de las células y en los que residen los factores hereditarios; su número es constante para cada especie animal o vegetal.

Cromosomas homólogos: Cromosomas idénticos con respecto a su tamaño, forma y tipo de genes, aunque los genes en un locus pueden diferir. Los organismos diploides tienen pares de genes homólogos.

Cultura ambiental: Proceso de reconocer valores y aclarar conceptos para crear habilidades y actitudes necesarias, tendientes a comprender y apreciar la relación mutua entre el hombre, su cultura y el medio biofísico circundante. También incluye la práctica de tomar decisiones y formular un código de comportamiento respecto a cuestiones que conciernen a la calidad ambiental.

Dalton, unidades: Unidad estándar de masa de los átomos que equivale a la doceava parte de la masa del carbono 12. El carbono 12 tiene una masa de 12.001, de este modo, el dalton equivale a 1.0009 unidades de masa, o 1.66×10^{-24} g. En la práctica, 1 dalton equivale a la masa de un átomo de hidrógeno, ya que un protón tiene una masa de 1.007 unidades dalton y un electrón una masa de 0.0005 dalton. También se le conoce como unidad de masa atómica (amu).

Deforestación: Eliminación de la cubierta de árboles en aras de la agricultura, las actividades mineras, la construcción de represas, la creación y el mantenimiento de la infraestructura, la expansión de las ciudades y otras consecuencias derivadas de un crecimiento rápido de la población. En particular, en el área forestal, una de las definiciones más utilizadas es la acordada por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). Deforestación es “la conversión de bosques a otro uso de la tierra o la reducción a largo plazo de la cubierta forestal por debajo de 10%”. Esta definición implica que la pérdida debe ser permanente y que el sitio ha cambiado a otro tipo de uso (agricultura, pastizales, presas, o áreas urbanas).

Degradación: Los cambios que se llevan a cabo dentro del bosque, afectando negativamente la estructura o función del rodal o sitio, y por lo tanto disminuye la

capacidad de suministrar productos o servicios, o ambos.

Delección: Pérdida de material genético de un cromosoma, que puede ir desde un solo nucleótido (delección puntual) hasta grandes regiones visibles citogenéticamente.

Demanda bioquímica de oxígeno (DBO): También denominada demanda biológica de oxígeno, (DBO) es un parámetro que mide la cantidad de materia susceptible de ser consumida u oxidada por medios biológicos contenida en una muestra líquida, y se utiliza para determinar el estado o la calidad del agua de ríos, lagos, lagunas, o efluentes. Cuanto más cantidad de materia orgánica contiene la muestra, más oxígeno necesitan los microorganismos para oxidarla (degradarla). Como el proceso de descomposición varía según la temperatura, este análisis se realiza en forma estándar durante cinco días a 20 °C; esto se indica como DBO₅. Según las reglamentaciones, se fijan valores de DBO máximos que pueden tener las aguas residuales para poder verterlas a los ríos y otros cursos de agua. De acuerdo con estos valores se establece si es posible arrojarlas directamente, o si deben experimentar un tratamiento previo.

Demanda química de oxígeno (DQO): La demanda química de oxígeno, DQO, es la cantidad de oxígeno en mg/L consumido en la oxidación de las sustancias reductoras que están en un agua. El en-

sayo de la DQO se emplea para medir el contenido de materia orgánica tanto de las aguas naturales como de las residuales. En el ensayo, se emplea un agente químico fuertemente oxidante en medio ácido para la determinación del equivalente de oxígeno de la materia orgánica susceptible de oxidarse.

Depósito atmosférico: Material contaminante que desciende con el agua de lluvia o que se precipita en época seca al suelo; por ejemplo, la lluvia ácida.

Depresión por endogamia: Por lo general se produce como consecuencia de la exposición de alelos deletéreos recesivos a la acción de la selección. Cualquier población natural presenta un cierto lastre genético derivado de la existencia de alelos deletéreos recesivos que aparecen en muy baja frecuencia en la población, pero persisten por procesos de mutación recurrente. Estos alelos se expresan en homocigosis, con lo que reducen la supervivencia y fecundidad. En poblaciones grandes, con cruzamientos al azar, raramente lo hacen pues normalmente se encuentran en heterocigosis. Si la población es sometida a endogamia, la frecuencia de homocigotos recesivos aumenta, por lo que el valor adaptativo promedio de la población se reduce temporalmente. Puesto que estos alelos deletéreos recesivos quedan entonces más expuestos a la acción de la selección natural, tienden a disminuir de frecuencia y finalmente se eliminan de la población.

Así pues, aunque la endogamia por sí sola no altera las frecuencias génicas, ni reduce la variación genética de una población, cuando actúa conjuntamente con la selección natural puede provocar este tipo de cambios.

Desarrollo sustentable: Proceso participativo para mejorar continuamente la calidad de vida de las actuales y futuras generaciones, que implica el respeto a la naturaleza y la distribución equitativa de los beneficios del progreso.

Desnitrificación: Proceso mediante el cual los óxidos de nitrógeno, principalmente nitratos y nitritos, se usan como aceptores terminales de electrones en ausencia de oxígeno, y se reducen para formar nitrógeno durante el metabolismo respiratorio. Es la vía principal por la que el nitrógeno pasa a la atmósfera desde el suelo. En general se opta por una definición más explícita, considerando la desnitrificación como un proceso respiratorio presente en algunos géneros de bacterias (*Micrococcus denitricans*, *Thiobacillus denitricans*, *Pseudomonas* spp. y *Bacillus* spp.). Estas bacterias utilizan para su metabolismo el oxígeno del aire pero pueden usar también nitrato como aceptador de electrones cuando la presencia de oxígeno es limitada.

Desorción: Proceso opuesto a la adsorción; separar una molécula o átomo adherido en una superficie.

Detoxificación: Proceso metabólico mediante el cual el cuerpo disminuye o

elimina las propiedades tóxicas de una sustancia.

Desulfuración: La pérdida de SH₂ a la atmósfera durante la reducción bacteriana de los sulfatos.

Diploide: Individuo con dos series de cromosomas homólogos (2n).

Disposición final: La acción de depositar permanentemente los residuos en sitios y condiciones adecuados para evitar daños al ambiente.

Diversidad genética: La variedad en los diferentes tipos de genes de una especie o población.

Ecotipos: Grupo de animales o plantas de genotipo similar que ocupan un nicho ecológico específico. Población adaptada localmente; raza o grupo infraespecífico que posee caracteres distintivos que son el resultado de las presiones selectivas del ambiente local.

Efluente: Residuos líquidos procedentes de una planta industrial —tratados parcial o totalmente—, por lo general contienen sustancias orgánicas e inorgánicas solubles e insolubles.

Endogamia: Es el apareamiento entre individuos que son parientes.

Escisión de nucleótidos: Mecanismo celular de reparación del ADN que restablece la secuencia de bases de éste al estado original previo a la inducción de lesiones por radiación. Se pone en marcha cuando la lesión radioinducida origina dímeros de pirimidina (T-T, C-T y C-C). Cuando se reconoce el dímero, una

glicosidasa corta la hebra de ADN dañada a ambos lados de la lesión, a continuación una helicasa elimina un fragmento de aproximadamente 12 nucleótidos entre los que se encuentran los que están dañados. Posteriormente, estos nucleótidos son nuevamente sintetizados por una polimerasa que utiliza de molde la hebra complementaria intacta. Finalmente una ligasa sella la unión.

Especie en peligro de extinción: Es un organismo en peligro de desaparecer de la faz de la Tierra si no mejora su situación. Cuando no se ha observado en ambientes naturales a miembros de una especie durante más de cincuenta años, se dice que esa especie está extinta. Aquellas especies que pudieran estar dentro de poco tiempo en peligro se denominan **especies amenazadas**.

Especies arbóreas nativas: Especies arbóreas que han evolucionado en la misma zona, región o biotipo donde actualmente están creciendo en forma de rodal y que se adaptan a las condiciones ecológicas específicas que predominaban al momento del establecimiento del rodal. También se conocen como especies autóctonas.

Especies endémicas: Se dice que una especie es endémica de una zona determinada si su área de distribución está enteramente confinada a esa región geográfica.

Especies introducidas: Especies de árboles que se encuentran fuera de la

zona, área o región natural de crecimiento. Se pueden llamar también árboles no autóctonos. Incluye híbridos.

Especies reactivas: Término que se aplica colectivamente a las moléculas químicas radicales y no radicales que son agentes oxidantes o son fácilmente convertidos en radicales.

Estandarización o normalización: Proceso de elaboración, aplicación y mejora de las normas que se aplican a distintas actividades científicas, industriales, o económicas con el fin de ordenarlas y mejorarlas.

Eucarionte: Adjetivo para referirse a las células con núcleo diferenciado, envuelto por una membrana y con citoplasma organizado, así como también a los organismos constituidos por ellas. También se utiliza mucho como sustantivo masculino.

Euploidia: Variación en el número de cromosomas que corresponde a un múltiplo exacto del número haploide característico.

Eutroficación: Término que hace referencia a una situación que ocurre en los sistemas acuáticos (estanques, lagos y corrientes), donde los nutrientes son tan abundantes que las plantas y las algas crecen en forma descontrolada.

Farmacopea: Libro en que se expresan las sustancias medicinales que se usan más comúnmente, y el modo de prepararlas y combinarlas. Repertorio que publica oficialmente cada Estado como

norma legal para la preparación, experimentación, prescripción, etc., de los medicamentos.

Fecundación: Unión sexual del núcleo masculino, contenido en el polen, con el núcleo femenino del óvulo, lo cual hace que éste produzca un nuevo ser de la especie.

Fenología: Estudio de las fases de desarrollo de las plantas (latencia, foliación, germinación, etc.) y los fenómenos biológicos periódicos con relación a cambios atmosféricos o climáticos (temperatura, horas luz, etc.).

Fenotipo: Características observables de un organismo.

Fitorremediación: Empleo de plantas y la microbiota asociada con éstas para eliminar a los contaminantes presentes en el suelo, con el auxilio de prácticas agronómicas.

Fitosfera: Área en que la planta lleva a cabo su ciclo de vida bajo la influencia de condiciones específicas impuestas por el hábitat.

Floculación: Proceso de agregación de partículas coaguladas y desestabilizadas para formar masas o flóculos, que tienden a depositarse en el fondo de los recipientes. Es un paso del proceso de potabilización de aguas de origen superficial y del tratamiento de aguas residuales, domésticas, industriales y minería.

Focomelia: Anomalía congénita caracterizada por la carencia o excesiva corteza de las extremidades.

Forbol, ésteres de: Derivados de diterpenos tetracíclicos, se encuentran sólo en las familias Euphorbiaceae y Thymelaceae. Estos compuestos se estudian con frecuencia debido a sus actividades promotoras de tumores e inflamatorias.

Fosforilación: Proceso bioquímico que consiste en la adición de fosfato a un compuesto orgánico. Por ejemplo, la adición de fosfato a la glucosa para formar glucosa monofosfato, o la adición de fosfato al ADP (adenosín difosfato) para formar ATP (adenosín trifosfato). La fosforilación se lleva a cabo por la acción de enzimas llamadas fosfotransferasas o cinasas.

Fotoperiodo: Tiempo en que los organismos están sometidos a la acción de la luz entre dos períodos de oscuridad. Hay vegetales de día corto, de día largo, de día neutro.

Fuente: El punto o lugar donde un gas, o contaminante, es emitido, es decir, donde entra en la atmósfera.

Genética toxicológica: Rama de la genética que detecta y analiza la acción de los agentes tóxicos capaces de interactuar con el material genético de los organismos, esto es, su objetivo primordial es detectar y entender las propiedades de los agentes físicos y químicos que producen efectos dañinos en el ADN.

Genoma: Conjunto de los cromosomas (por lo tanto de genes) de una célula, esto es el material genético completo de un organismo: el genoma humano está

formado por 23 pares de cromosomas.

Genotipo: Constitución genética (dotación de genes) de un organismo.

Genotoxicidad: Grado en que una sustancia tóxica tiene efectos dañinos en el ADN.

Genotóxico, agente: Sustancia tóxica (dañina) para el ADN. Los agentes genotóxicos pueden unirse directamente al ADN, o actuar indirectamente mediante la afectación de las enzimas participantes en la duplicación del ADN, y en consecuencia causar mutaciones que pueden o no desembocar en un cáncer. Las sustancias genotóxicas no son necesariamente cancerígenas, pero la mayor parte de los cancerígenos son agentes genotóxicos.

Germoplasma: Conjunto del material hereditario que se transmite a la descendencia a través de los gametos, es decir, las células sexuales primarias que inician la reproducción vegetal. También, cualquier parte de la planta que puede ser usada para originar una nueva planta.

Glutión: Tripéptido cristalino con ácido glutámico, glicina y cisteína presente en la sangre y otros tejidos, tanto animales como vegetales, importante para la activación de enzimas y en los procesos de oxidación-reducción.

Gradiente: Variación gradual o gradualidad en determinado aspecto.

Hábitat: Lugar donde vive un organismo o una comunidad, caracterizado por propiedades físicas o bióticas.

Halotano: Vapor para inhalación usado en la anestesia general. Su nombre sistemático es 2-bromo-2-cloro-1,1,1trifluoroetano. No tiene color y posee un aroma agradable pero es inestable a la luz.

Haploide, número de cromosomas: Condición normal de una célula sexual cuyo núcleo contiene un solo juego de cromosomas (1n).

Heredabilidad: Grado en que un determinado rasgo es controlado por la herencia. Expresa el valor de la variación en la población que es atribuible a diferencias genéticas entre los individuos e indica la proporción en que los progenitores transmiten sus características a su descendencia.

Hidrocarburos aromáticos persistentes (HAPs): Grupo formado por más de 100 compuestos orgánicos diferentes que contienen varios anillos bencénicos. Algunos de ellos son persistentes y cancerígenos. Los HAPs se forman normalmente durante la quema incompleta del carbón, el petróleo, el gas, la basura y otras sustancias orgánicas como el tabaco, o la carne a las brasas. Por lo general, el humo del tabaco es la fuente más importante de exposición para las personas.

Hidrófilo: Dícese de una sustancia que tiene una alta afinidad por el agua.

Hidrosfera: Capa de la Tierra entre la atmósfera y la litosfera formada por toda la superficie del planeta cubierta de

agua: la hidrosfera abarca 70% de la superficie terrestre.

Histona: Tipo de proteína encontrada en los cromosomas. Las histonas se unen al ADN, ayudan a dar forma a los cromosomas y también a controlar la actividad de los genes.

Homeostasis: Conjunto de fenómenos de autorregulación, conducentes al mantenimiento de una constancia relativa en la composición y las propiedades del medio interno de un organismo.

Homocigosis: Condición en la cual existen dos alelos idénticos en un mismo locus de cromosomas homólogos.

Humus: Materia orgánica descompuesta de los suelos. Es de color café oscuro, amorfa y ha perdido todo rastro de la estructura y composición de la materia vegetal y animal de la cual se ha derivado.

In vitro: Del latín, que significa “en vidrio”; procesos biológicos diseñados para que se realicen experimentalmente fuera del organismo, en un tubo de ensayo u otro recipiente.

In vivo: Se refiere a condiciones experimentales que incorporan células u organismos vivos.

Influente: Agua que fluye hacia un punto.

Inmunotóxico, compuesto o agente: Sustancia que resulta tóxica para el sistema de inmunidad.

Interfase: Etapa del ciclo celular en la cual la célula no se divide; etapa metabó-

lica en la que el ADN se duplica; etapa posterior a la telofase de una división y se prolonga al comienzo de la profase de la siguiente división.

Invasivo: Se dice que un procedimiento es invasivo cuando el cuerpo es “invadido” o se le introduce una aguja, un tubo, un dispositivo, o un endoscopio.

Latifoliadas: Todos los árboles clasificados desde el punto de vista botánico como angiospermas. Algunas veces se hace referencia a ellos con el término “árboles de madera dura”. El término hace alusión a las hojas anchas.

Lipófilo: Dícese de una sustancia que tiene afinidad por los lípidos.

Litosfera: Capa más externa de la Tierra formada por la corteza y parte del manto terrestres.

Locus (plural **loci**): Posición fija que ocupa un gen determinado o uno de sus alelos en un cromosoma.

Lodo activado: Los lodos activados contienen microorganismos y aire, que mezclados con aguas residuales no tratadas aceleran el proceso de purificación. Se trata de un método de tratamiento mediante el cual el agua residual y el lodo biológico (microorganismos) se mezclan y airean en un tanque denominado aereador, los *flóculos* biológicos formados en este proceso se sedimentan en un tanque de sedimentación, de donde se hacen circular nuevamente al tanque aereador o de aereación. En el proceso de lodos activados los microorganismos

se mezclan completamente con la materia orgánica que lleva el agua residual, de manera que ésta les sirve de alimento. La mezcla o agitación se efectúa por medios mecánicos (aéreadores superficiales, sopladores, etc.) los cuales tienen una doble función 1) lograr una mezcla completa y 2) agregar oxígeno al medio para que el proceso se efectúe.

Mapa genético: Representación, en términos de distancia genética relativa, del orden y separación de los genes no alélicos dentro de un grupo de ligamiento o de un cromosoma. Estos mapas se pueden construir por análisis de recombinación meiótica o mitótica.

Marcador: Sustancia utilizada para medir o indicar los efectos o el progreso de una condición.

Material parental: Los diferentes materiales rocosos y minerales que darán origen al suelo. Distintos materiales parentales crean distintos suelos, con diferentes propiedades.

Megadiversos, países: Si se considera a la riqueza de especies como un indicador para comparar la diversidad biológica entre diversos países, se encuentra que un grupo reducido de éstos tiene representado hasta 70% de las especies conocidas en el planeta. A estos países se les conoce como países megadiversos y entre ellos está México, junto con Australia, Brasil, China, Colombia, Congo, Ecuador, Estados Unidos, Filipinas, India, Indonesia, Malasia, Madagascar,

Perú, Nueva Guinea, Sudáfrica y Venezuela. Russell Mittermeier fue el primero en proponer el enfoque de "países megadiversos" en 1988, refiriéndose en un principio sólo a cuatro países; más tarde el concepto se amplió a 12 y después a 17. Entre los principales criterios que utilizó para definir a estos países está el grado de endemismo.

Meristemo: En los vegetales superiores, tejido embrionario que se halla en los lugares de crecimiento de la planta y está formado por células que se dividen continuamente para originar otros tejidos.

Metabolito: Una sustancia producida por cambios biológicos sobre un producto químico.

Metacéntrico, cromosoma: Cromosoma cuyo centrómero se encuentra cerca de la parte media y posee dos brazos de aproximadamente la misma longitud.

Meteorización: Desintegración y descomposición de una roca en la superficie terrestre o próxima a ella como consecuencia de su exposición a los agentes atmosféricos, y biológicos.

Micrópilo: Orificio de las membranas del óvulo vegetal por el que penetra el elemento masculino en la oosfera o célula sexual femenina.

Mineralización: Transformación de materiales orgánicos en compuestos inorgánicos o minerales, preferentemente por la acción de microorganismos. La mineralización biológica es la descompo-

sición biótica de compuestos orgánicos y la liberación de los inorgánicos.

Mitigación: Conjunto de medidas que se pueden poner en práctica para contrarrestar o minimizar los impactos ambientales negativos que pudieran tener algunas intervenciones humanas. Estas medidas deben estar consolidadas en un plan de mitigación, el cual debe formar parte del estudio de impacto ambiental.

Mitógeno: Sustancia que induce la división celular o mitosis.

Modelo: En general un modelo representa las características más relevantes de un objeto que se está estudiando. Un modelo matemático representa la realidad por medio del lenguaje de las matemáticas.

Molécula blanco: molécula donde alguna sustancia química va a producir un efecto.

Monosomía: Aberración cromosómica caracterizada por ausencia de un cromosoma en el complemento diploide normal. En el caso de los seres humanos, la célula monosómica contiene 45 cromosomas y se designa $2n-1$, como ocurre en el síndrome de Turner XO.

Morbilidad: Cantidad de personas que enferma en un lugar y un tiempo determinados, en relación con el total de la población.

Multidisciplinario: Que comprende varias disciplinas o materias.

Mutación: Cambio en la estructura o cantidad del material genético de un or-

ganismo. Estos son transmisibles a la descendencia y se manifiestan como alteraciones morfológicas o en la capacidad de dirigir la síntesis de proteínas.

Mutagénesis ambiental: Estudio de cómo algunos agentes físicos y químicos que se encuentran en el ambiente, interfieren con el material genético y los procesos celulares y originan alteraciones que deterioran la salud.

Mutagénesis: Inducción de alteraciones en el material genético (ADN) de un organismo o célula que no se deben al proceso normal de recombinación.

Mutagenicidad: La capacidad de una sustancia química o un agente físico de causar mutaciones.

Mutágeno: Agente ambiental, físico o químico, capaz de inducir mutaciones.

Neurodegenerativo: Perteneciente o relativo a la degeneración del sistema nervioso. Se conoce como enfermedad neurodegenerativa al tipo de enfermedades que agrupa a un género de desórdenes cognitivos (relacionados con el conocimiento), como la enfermedad de Alzheimer, de Parkinson, de Creutzfeldt-Jakob y la esclerosis múltiple. Estos trastornos cognitivos se deben a un aumento en los procesos de muerte celular, lo que reduce el número de neuronas y genera cambios en la conducta.

Nitrificación: Oxidación del amoníaco y el nitrógeno orgánico en nitrito y nitrato por las bacterias de la familia Nitrobacteraceae.

Nucleótido: Unidad componente de los ácidos nucleicos integrado por la combinación de una base nitrogenada (purina o pirimidina), un azúcar (ribosa o desoxirribosa) y un grupo fosfato. Se obtiene como producto de la hidrólisis de ácidos nucleicos por acción de nucleasas.

Organelo: Estructura intracelular especializada en una función determinada, como el núcleo, las mitocondrias, los cloroplastos, los ribosomas, etc.

Osmorregulación: La forma activa de regular la presión osmótica del medio interno del cuerpo para mantener la homeostasis de los líquidos corporales; esto evita que el medio interno llegue a estados demasiado diluidos o concentrados. La presión osmótica es la medida de la tendencia del agua para moverse de una solución a otra por medio de la ósmosis.

Parental, compuesto: El miembro más sencillo de una clase de compuestos, a partir del cual se obtiene los otros mediante un procedimiento que consiste en la sustitución de átomos de hidrógeno por radicales.

Pedosfera: Componente de la biosfera en el que están contenidos el suelo y los organismos terrestres. Es la parte de los suelos donde se desarrolla la vida de los organismos descomponedores.

Peroxidación: Proceso en el que los radicales libres “roban” electrones a los lípidos de las membranas celulares, lo que resulta en daño celular y mayor pro-

ducción de radicales libres.

Plaguicida: Cualquier sustancia o mezcla de sustancias de origen natural o sintético, usada para prevenir, controlar o destruir cualquier plaga vegetal o animal, incluyendo: i) vectores (insectos, roedores) que transmiten enfermedades a humanos y animales, ii) especies vegetales no deseadas que causan perjuicio o interfieren con la producción, el transporte, el almacenamiento, o la comercialización de productos agropecuarios, forestales, etc.

Plantación: Establecimiento artificial de árboles en tierras que anteriormente no estaban cubiertas de bosques.

Polinización: Paso del polen desde el estambre en que se ha producido hasta el pistilo de la misma flor o de otra distinta, donde se produce la fecundación de los óvulos.

Polinización anemógama: Transporte del polen del órgano masculino al órgano receptivo femenino de una planta efectuado por el viento.

Polinización cruzada: Transferencia del polen producido por una planta a las estructuras reproductoras femeninas de otra planta.

Polinización zoogama: Transporte del polen efectuado por insectos, aves y algunos mamíferos del órgano masculino al órgano receptivo femenino de una planta.

Poliploidia: El fenómeno de la poliploidia ocurre cuando una célula o un indivi-

duo presentan tres o más veces el número haploide de cromosomas. Tales cambios pueden ser de dos tipos: i) aquellos que implican dotaciones completas de cromosomas (euploidia) y aquellos cambios que sólo implican a uno o más cromosomas aislados dentro de una dotación cromosómica (aneuploidia).

Procarionte: Adjetivo para referirse a un organismo cuyo ADN no está confinado en el interior de un núcleo, sino extendido en el citoplasma. También se utiliza como nombre o sustantivo.

Procedencia: Origen natural de las semillas o los árboles, sinónimo de origen geográfico; material vegetal que procede de un lugar u origen específico.

Promutágeno: Sustancia tóxica que sólo ejerce su efecto cuando es activada por las enzimas metabólicas de la célula en que ha penetrado —es decir su acción es indirecta—, a diferencia de las sustancias tóxicas que producen una reacción por sí mismas (acción directa).

Protección: La función del bosque y de otras tierras boscosas que consiste en proveer protección al suelo contra la erosión provocada por el agua y el viento, la prevención de la desertificación, la reducción del riesgo de aludes y los deslizamientos de rocas y lodo; y en conservar, proteger y regularizar la cantidad y la calidad del suministro de agua, incluyendo la prevención de las inundaciones, la protección contra la contaminación del aire y acústica.

Protocolo: Plan escrito y detallado de un experimento científico o un ensayo.

Proyecto del genoma humano: Proyecto colaborativo de investigación en escala internacional que pretende establecer el mapa y la secuencia de todos los genes humanos.

Quelante: Sustancias químicas que hacen que partículas pequeñas se unan entre sí para formar una mayor que precipita con más facilidad. También se suelen llamar *floculantes*.

Radical libre: Molécula que contiene por lo menos un electrón sin aparear. Los radicales libres (especies reactivas al oxígeno) son un subproducto del metabolismo normal. Son altamente reactivos y se unen a los electrones de otras moléculas, con lo que potencialmente inician reacciones en cadena a medida que las moléculas sucesivas pierden y ganan electrones. El “robo” de electrones por los radicales libres altera los procesos celulares normales y causa daño celular (estrés oxidativo).

Reforestación: Establecimiento artificial de árboles en tierras que anteriormente estaban cubiertas de bosques.

Remediación: Remoción de contaminantes del suelo para la protección general de la salud humana y del ambiente. El avance de las tecnologías de remediación a nivel mundial se inició en los países industrializados hace poco más de 10 años. Una de las más desarrolladas es la remediación biológica, también co-

nocida como biorremediación.

Repetibilidad: En la metodología científica, cualidad de repetible.

Reproducción: Proceso que puede ser sexual o asexual y es el medio por el cual se genera un número variable de nuevos individuos.

Reproducibilidad: Capacidad de repetir un determinado experimento en cualquier lugar y por cualquier persona. Implica la similitud de respuesta de un sistema en y entre laboratorios, esto se logra solamente con el establecimiento de protocolos estandarizados y entrenando al personal para que adquiera niveles técnicos competentes.

Respiración: Proceso químico en que el oxígeno se usa para producir energía a partir de los carbohidratos (azúcares). También se conoce como metabolismo oxidativo, respiración celular y metabolismo aerobio.

Revertante: Un gen, un individuo, o una cepa mutantes que revierte a su antiguo genotipo (reversión verdadera), o al fenotipo original por lo general mediante una segunda mutación.

Rizosfera: Zona del suelo adyacente a las raíces de las plantas en la cual éstas interactúan con los microorganismos del suelo; representa un compartimiento ecológico especial dentro de la fitosfera.

Rodal: Una porción del bosque definida sobre la base de un conjunto de criterios relacionados con uno o más objetivos de manejo.

Secuenciación: La secuenciación de ADN es el proceso por el cual se establece el orden preciso de bases a lo largo de una cadena de ADN. Esto se hace comúnmente sometiendo los fragmentos de ADN a electroforesis en gel, lo cual lleva a la separación del ADN en fragmentos que difieren en tamaño sólo por una base. Cada fragmento de ADN se detecta debido a la presencia de un marcador radioactivo o fluorescente. Los instrumentos usados más comúnmente para establecer las secuencias del ADN emplean ahora un rayo láser para detectar el ADN marcado fluorescente. A partir del patrón de los fragmentos de ADN resultantes es posible deducir la secuencia subyacente del ADN.

Sensibilidad: Capacidad del sistema para detectar con facilidad y precisión el efecto inducido por el mutágeno.

Síndrome de Li-Fraumeni: Predisposición hereditaria y poco frecuente de contraer múltiples cánceres. La gama de cánceres del síndrome incluye, además del cáncer pulmonar y el sarcoma de los tejidos blandos, tumores del cerebro, osteosarcoma, leucemia y carcinoma suprarrenal. Su causa es una mutación del gen de supresión tumoral p53.

Sinergia: Integración de elementos que da como resultado algo más grande que la simple suma de éstos, es decir, cuando dos o más elementos se unen sinérgicamente crean un resultado que aprovecha y maximiza las cualidades de cada

uno de los elementos.

Sistema genético: Métodos particulares de reproducción y modos de variación y heredabilidad que caracterizan a una especie, o un grupo de especies, incluye el sistema reproductivo, el sistema de apareamiento, los factores cromosómicos y el tamaño de la población.

Sistemas de prueba: Organismos de bioensayo utilizados para evaluar los efectos producidos por los agentes químicos ambientales a los que el ser humano está expuesto. Las características que deben tener los sistemas de prueba son básicamente la sensibilidad y la reproducibilidad.

Sitio forestal: Área caracterizada por presentar factores ambientales uniformes, como suelo, precipitación y otros fenómenos meteorológicos, altitud, latitud, topografía, aspecto, otras plantas y animales, y actividades humanas.

Somática, célula: Cualquiera de las células del cuerpo, excepto las células reproductoras (germinales).

Subterminal: Que está cerca de, pero no precisamente en un extremo.

Suelos hidromorfos: Los suelos hidromorfos están cubiertos de agua de un modo permanente, como ocurre en la orilla de los ríos y lagos. En este tipo de suelos los procesos de descomposición de la materia biológica se hacen de manera anaerobia y la carga orgánica es abundante y ácida. Son suelos asfixiantes poco propicios para la vida y de color

gris verdoso debido a la presencia de hierro ferroso.

Talidomida: Fármaco comercializado entre los años 1958 y 1963 como sedante y calmante de las náuseas durante los tres primeros meses de embarazo (hiperemesis gravídica).

Tasa ventilatoria: Cantidad de aire inhalado en un periodo especificado (por minuto, por hora, por día, etc.). También conocida como tasa de inhalación.

Teratógeno: Que provoca malformaciones congénitas. Un agente teratógeno es aquella sustancia o preparado que puede producir alteraciones en el feto durante su desarrollo intrauterino.

Termófilo: Organismo que necesita temperaturas elevadas para su desarrollo normal. Microorganismo cuya temperatura óptima está por encima de los 45°C: bacterias termófilas.

Toxicidad: Término relativo generalmente usado para comparar el efecto dañino de una sustancia química en algún sistema biológico con el efecto de otra sustancia. En general, la capacidad o la propiedad de una sustancia de causar efectos adversos sobre la salud.

Toxicodinamia: Estudia los efectos bioquímicos y fisiológicos producidos por los tóxicos en el organismo, así como también el mecanismo de toxicidad. De un modo más puntual, es la interacción de los tóxicos a nivel molecular o iónico con los sitios específicos de la célula (receptores) o de su interior con el resultado

último del efecto tóxico.

Toxicología: Ciencia que estudia las relaciones entre la cantidad de sustancia introducida en el organismo y el efecto biológico obtenido, tanto cualitativa como cuantitativamente.

Toxicología ambiental: Estudia los daños causados al organismo por la exposición a los tóxicos que se encuentran en el ambiente. El objetivo principal de la toxicología ambiental es evaluar los efectos que producen en la salud pública la exposición de la población a los tóxicos ambientales presentes en un sitio contaminado. En particular se estudian los efectos sobre los seres humanos, aunque es posible que existan en el sitio de estudio otros organismos susceptibles a los compuestos tóxicos, como microorganismos, plantas, animales, etc.

Tóxicos: Sustancias xenobióticas que producen efectos adversos en los organismos vivos.

Transcripción: Proceso en el que el ARN mensajero se forma a lo largo de una plantilla de ADN. La enzima polimerasa de ARN cataliza la formación de ARN a partir de trifosfatos de ribonucleótidos.

Transporte activo: Cualquier transporte que implique gasto de energía, por ejemplo, una proteína llamada bomba que sirve de vehículo y transporta iones a través de la membrana celular, utiliza una molécula de ATP para cada transporte.

Transversión: Mutación puntual que consiste en el cambio de un nucleótido por otro de distinta clase (es decir, purina por pirimidina o pirimidina por purina).

Trisomía: Alteración caracterizada por la presencia de un cromosoma extra en un determinado par cromosómico. En el ser humano, las células trisómicas contienen 47 cromosomas y se designan $2n+1$. El cromosoma adicional puede unirse a cualquiera de los pares homólogos normales, aunque la mayoría de las trisomías humanas se dan en los pequeños cromosomas, como los del grupo E o G, o los cromosomas sexuales.

Troposfera: Región inferior de la atmósfera, hasta una altura de 12 km, donde se realiza la mayoría de los fenómenos que afectan a la meteorología o al clima.

Tumorigeno: Sustancia química u otro agente capaz de iniciar o promover el crecimiento de tumores.

Turbidez: Reducción de la transparencia de un líquido provocada por la presencia de materia insoluble suspendida.

Valor basal: Valor inicial que servirá de base para controlar los resultados de un tratamiento o el desarrollo de una enfermedad.

Variación clinal: Diferenciación gradual de los caracteres morfológicos de una especie de amplia distribución a lo largo de un gradiente geográfico.

Xenobiótico: La palabra xenobiótico deriva del griego "xeno" (extraño) y "bio" (vida) y se aplica a cualquier sustancia que no ha sido producida por la biota, esto es, compuestos sintetizados por el ser humano en el laboratorio, como los productos industriales, fármacos, aditivos de alimentos, compuestos inorgánicos, etc. La mayoría han aparecido en el ambiente durante los últimos cien años.

Perspectivas de Investigación en Genética y Ambiente,
de García, GE., García, NE. y Gómez, CMA. (Comps.)
se terminó de imprimir en el mes de agosto de 2010,
en los talleres de Siena Editores,
Calle Jade 4305 Col. Villa Posadas, Puebla, Pue.
El tiraje fue de 500 ejemplares.

