



# ESTUDIOS AMBIENTALES Y RIESGOS NATURALES

## Aportaciones al sureste de México

Rodolfo Palacios Silva (coordinador)

Colección  
Jaguar



UNICACH



# Estudios Ambientales y Riesgos Naturales

Aportaciones al sureste de México  
Rodolfo Palacios Silva  
(Coordinador)



UNIVERSIDAD DE CIENCIAS Y ARTES DE CHIAPAS  
2009

**Colección**

**Jaguar**



**UNICACH**

El jaguar es uno de las especies más representativas de la fauna chiapaneca y el símbolo por antonomasia de la biodiversidad en nuestro estado. Bajo su nombre están contenidos todos los títulos pertenecientes al ámbito de las ciencias naturales producidos en la universidad.

Primera edición: 2009

D. R. ©2009. Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas

1ª Avenida Sur Poniente número 1460

C. P. 29000, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México.

[www.unicach.edu.mx](http://www.unicach.edu.mx)

[editorial@unicach.edu.mx](mailto:editorial@unicach.edu.mx)

ISBN 978-607-7510-13-0

Diseño de la colección: Manuel Cunjamá

Ilustración de portada: Ana Laura Gordillo Ponce

Impreso en México

# Estudios Ambientales y Riesgos Naturales

Aportaciones al sureste de México  
Rodolfo Palacios Silva  
(Coordinador)

**Colección  
Jaguar**



UNICACH



# Índice

Prólogo.....	13
Prefacio .....	15
Presentación .....	17
Semblanza del Cuerpo Académico de Estudios Ambientales y Riesgos Naturales .....	19
I. Los desastres naturales y sus costos .....	21
Desastres naturales y su clasificación .....	21
Marco conceptual del riesgo .....	23
Importancia económica de los estudios de riesgo en el mundo .....	27
Importancia económica de los estudios de riesgo en México .....	32
Importancia económica de los estudios de riesgo en Chiapas .....	37
Efectos económicos de los desastres en las zonas urbanas .....	43
Comentarios finales .....	46
Bibliografía .....	49
II. Importancia del estudio de los sismos en Chiapas.....	51
Introducción.....	51
Magnitud e intensidad sísmica.....	55
Sismicidad regional.....	63
Mayor sismo en Chiapas.....	67
Peligro sísmico.....	69
Comentarios finales.....	71
Bibliografía.....	73
III. Vulnerabilidad de los bosques templados bajo manejo silvícola.....	75
Importancia biológica y ecológica de los bosques .....	75
Deforestación.....	77
Uso forestal de los bosques.....	80
Principios de silvicultura.....	81

La silvicultura como manejo comunitario.....	84
Factores de vulnerabilidad de los bosques templados bajo manejo silvícola ....	85
Disturbios abióticos .....	87
Incendios.....	87
Heladas.....	90
Factores bióticos.....	90
Plagas y enfermedades nativas.....	90
Factores antrópicos.....	92
Disturbio crónico.....	92
Consideraciones finales.....	93
Bibliografía.....	97
IV. Métodos para tratar el agua residual.....	101
Introducción.....	101
Datos estadísticos del agua en México y Chiapas .....	102
Métodos y tecnologías de tratamiento para el agua residual .....	105
Operaciones físicas unitarias.....	106
Procesos químicos unitarios.....	106
Procesos biológicos unitarios.....	106
Vía aerobia .....	107
Vía anaerobia .....	107
Tratamiento preliminar .....	107
Tratamiento primario.....	108
Tratamiento secundario .....	108
Tratamiento terciario o avanzado .....	108
Sistemas naturales.....	108
Sistemas de baja carga.....	109
Infiltración rápida.....	110
Sistemas de riego superficial.....	110
Los sistemas acuáticos de tratamiento.....	111
Sistemas de tratamientos mediante humedales.....	111
FWS.....	112
SFS.....	112
Sistemas de tratamiento con plantas acuáticas.....	112
Sistemas de tratamiento con plantas flotantes.....	112

Sistemas de tratamiento con plantas sumergidas.....	113
Sistemas convencionales.....	113
Clasificación de los métodos de tratamiento de aguas residuales vía anaerobia.....	113
Lagunas anaerobias.....	114
Contactores anaerobios.....	114
Reactores anaerobios zonales (digestores).....	114
Sistemas de cultivo fijo.....	115
Reactor anaerobio de flujo superior.....	115
Reactor anaerobio de flujo inferior.....	116
Reactor anaerobio de lecho fluidificado.....	116
Reactor anaerobio combinado.....	117
Clasificación de los métodos de tratamiento de aguas residuales vía aerobia.....	118
Procesos en estanques o lagunajes.....	118
Las lagunas aireadas.....	118
Filtro percolador.....	119
Filtros de baja carga.....	120
Filtros de media y alta carga.....	120
Filtros de muy alta carga.....	120
Filtros de desbaste.....	120
Filtros de dos etapas.....	121
Sistemas biológicos rotativos de contacto o biodiscos (RCB).....	121
El reactor secuencial por tandas (Sequencing Batch Reactor, SBR).....	122
Conclusiones.....	123
Bibliografía.....	125
V. El manejo de los residuos sólidos no peligrosos.....	129
Introducción.....	129
Antecedentes.....	130
Residuos sólidos ¿qué son y cómo se clasifican?.....	131
Efectos de los residuos sólidos en el medio ambiente.....	133
Normatividad aplicable.....	135
Etapas del manejo de los residuos sólidos.....	137
Generación.....	139

Almacenamiento y reducción en la fuente .....	140
Recolección.....	141
Estaciones de transferencia (ET).....	144
Tratamiento y recuperación.....	146
Disposición final .....	152
El manejo de los residuos sólidos en el territorio nacional y estatal .....	153
La disposición final de los residuos sólidos .....	156
Rellenos sanitarios en el territorio nacional y tratamiento de subproductos .....	158
La disposición final de los RSU y RME en el estado de Chiapas.....	159
Acciones realizadas en el territorio estatal y alternativas de tratamiento en la disposición final de los RSU y RME .....	160
Comentarios finales.....	160
Bibliografía.....	163

VI. Sensores de fibra óptica: aplicaciones en áreas de la ingeniería ambiental.....	167
Introducción.....	167
La fibra óptica en sistemas de comunicación .....	167
La fibra óptica en sistemas de sensores .....	170
La fibra óptica.....	172
Aspectos generales .....	172
Teoría de operación .....	175
Los sensores de fibra óptica.....	179
Estructuras.....	179
Conclusiones .....	190
Bibliografía.....	191

VII. Aplicaciones ópticas para estudios ambientales.....	197
Introducción.....	197
Conceptos básicos.....	205
Métodos ópticos no espectroscópicos .....	206
Métodos ópticos espectroscópicos .....	215
Aplicaciones .....	218

Técnica TDLAS (Espectroscopía por absorción de un diodo láser sintonizable) .....	223
Técnica FTIR (Espectroscopía infrarroja basada en la transformada de Fourier) .....	225
Técnica DIAL (LIDAR, Absorción diferencial por búsqueda y detección de luz) .....	230
Bibliografía .....	233



## Prólogo

Publicar un libro es un acto que representa esfuerzo individual o colectivo, personal o institucional, de quien o quienes hacen posible una tarea de esta naturaleza. Su importancia radica no solamente en integrar sistemática y rigurosamente la información, hasta traducirla en datos de interés al usuario que habrá de acogerlos como fuente de primera mano, sino trabajar colegiadamente al interior del grupo autorial. Esta premisa se cumple con satisfacción en la presente obra bibliográfica.

Su contenido alude, sin duda, a una temática que representa un área de conocimiento fundamental y necesario para los estudiosos del medio ambiente y de los riesgos naturales. Una dualidad temática que se constituye en una revisión bibliográfica de consulta para la sustentación de estudios relacionados con estas disciplinas.

Es satisfactorio observar que desde el marco de las políticas educativas nacionales, particularmente en el ámbito del Programa Integral de Fortalecimiento Institucional (PIFI), se desarrollen propuestas como las del presente libro *Estudios Ambientales y Riesgos Naturales: Aportaciones al Sureste Mexicano*, que redundará en beneficios tangibles a investigadores, especialistas y profesores del tema, y sobre todo a estudiantes de las ciencias ambientales de Chiapas y de México, y de países interesados en el estudio de estas asignaturas científicas.

La variedad temática de la obra es un aspecto de relevancia que muestra el alcance y pretensión académica de los autores. Refleja las posibilidades que pueden derivarse en la formación de líneas de generación y aplicación del conocimiento (LGAC) al interior de Cuerpos Académicos, y su pertinencia didáctica en el uso de la construcción del conocimiento.

---

Hoy se reconoce que los Cuerpos Académicos al interior de las instituciones de educación superior, son el núcleo básico para la realización de diversas acciones. Es decir, producto de consensos colegiados, los Cuerpos Académicos son la base para diseñar LGAC oportunas a la realidad social, comprobable por los resultados que se obtienen y por su aplicabilidad en la solución de problemáticas específicas. Pero además, los Cuerpos Académicos deben ser el punto de sustentación de los programas de maestría y doctorado que las universidades ofrecen a la comunidad estudiantil; y deben ser punto de vinculación permanente con otras instituciones universitarias y tecnológicas, para integrar redes temáticas que posibiliten una efectiva interrelación de esfuerzos, proyectos y resultados de investigaciones.

Por lo anterior, juzgo de importancia y de impacto académico la publicación de *Estudios Ambientales y Riesgos Naturales: Aportaciones al Sureste Mexicano*. El esfuerzo de sus autores refleja las condiciones de desarrollo y consolidación del Cuerpo Académico denominado “Estudios Ambientales y Riesgos Naturales”, inscrito en la Escuela de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas.

La publicación de esta obra responde a las políticas institucionales que sobre los Cuerpos Académicos señala el Plan de Desarrollo Institucional de la UNICACH. Entre otras consideraciones, se da cumplimiento a que los Cuerpos Académicos serán el eje rector para mejorar la generación y aplicación innovadora del conocimiento; serán los que difundan permanentemente los resultados de las investigaciones y se enlacen con la sociedad; y el medio para que, vía vinculación interinstitucional, se logre una mayor proyección y reconocimiento institucional.

Es legítimo reconocer el esfuerzo de los autores del presente libro: Raúl González Herrera, Carlos Narcía López, Rodolfo José Palacios Silva, Pedro Vera Toledo, Hugo Alejandro Nájera Aguilar, Rubén Alejandro Vázquez Sánchez y Carlos Manuel García Lara, profesores todos de la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas.

Enhorabuena.

M. en C. José Francisco Nigenda Pérez  
Secretario General  
UNICACH

## Prefacio

**E**n febrero de 1985, es decir, hace 24 años ingresé como profesor de la materia de Recursos Naturales en la escuela de Biología del entonces Instituto de Ciencias y Artes de Chiapas, he conocido prácticamente a todas las generaciones de estudiantes, observando al mismo tiempo el crecimiento de esta Universidad. La investigación en esos tiempos era muy incipiente y con presupuestos que el día de hoy causarían algo más que una sonrisa de frustración. Como director de la Escuela de Biología una de las principales preocupaciones era mantener una plantilla de profesores estable y de un mejor nivel académico, tiempos sin duda difíciles, y como se dice de “picar piedra”. Años más tarde, y después de una ausencia forzada por los estudios de posgrado retomé mi papel como profesor de asignatura, y desde hace un año el de coordinador del Doctorado en Ciencias en Desarrollo Sustentable.

Me he permitido hacer una muy breve reseña de mi paso por la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas debido que ahora me he topado con un desarrollo un tanto deslumbrante, ahora la Universidad cuenta con una mejor organización, hay una preocupación por mantener y lograr un mejor nivel académico, aumentar los planes educativos y extender su quehacer hacia la sociedad chiapaneca. Existe un gran interés por destacar y participar más activamente en la solución de la problemática actual de Chiapas que enfrenta, como podrán constatar por esta obra, una crisis ambiental ya alarmante, que debe ser abordada por las diferentes ramas de las ciencia naturales y sociales, es decir la ciencia y tecnología unidas en un esfuerzo común para la remediación ambiental y el desarrollo social.

---

Ha sido para mí muy grato el que me hayan solicitado escribir estas breves palabras para describir el esfuerzo de un cuerpo académico de la UNICACH, que como ellos mismos describen el más joven de la Universidad con gran inquietud por trabajar y hacer investigación multidisciplinaria, producto histórico de otros cuerpos académicos. Observo en este libro, una actitud prepositiva que con energía y entrega a la academia quieren generar información que coadyuve a la solución de problemas ambientales.

En innegable el impacto que ha tenido el cambio climático global, la presencia de mega huracanes ha causado al mundo grandes pérdidas, no solamente de tipo económico, sino también un alto costo en la pérdida de vidas humanas. Estos eventos también han sido constatados en Chiapas por las intensas lluvias, que aunadas a el mal manejo de bosques y suelos han causado efectos indeseables en el ámbito ecológico y económico. Los siete capítulos que se presentan en este libro dejan ver la importancia que tienen los fenómenos naturales, el riesgo que representa su impacto y la importancia de establecer medidas de protección. También se presentan herramientas importantes para el manejo y uso de residuos, así como también el uso de la tecnología para lo que se ha determinado las Ciencias Ambientales.

Por último, quiero destacar que existen muy pocos recursos bibliográficos sobre estos temas, por lo que este libro implica un gran esfuerzo de parte de los autores para conjuntar información sin duda alguna importante para nuestro país y específicamente para el estado de Chiapas por lo que invito a los lectores que observen la gran cantidad de datos que se ofrecen de manera ágil y que pueden ser de gran utilidad para aquellas personas interesadas en el estudio de las ciencias ambientales.

**Dr. Eduardo Espinoza Medinilla**  
Coordinador del Doctorado en Ciencias  
y Desarrollo Sustentable  
UNICACH

## Presentación

Este libro es nuestra primera contribución como integrantes del Cuerpo Académico de Estudios Ambientales y Riesgos Naturales. Es una obra que surge de la pretensión a una aproximación multidisciplinaria y del convencimiento por refrendar la razón de existir de nuestra agrupación.

El volumen se compone de siete capítulos sustentados en investigaciones bibliográficas que contraponen diferentes puntos de vista y presentan a la consideración de estudiantes, profesores, especialistas y estudiosos de las ciencias ambientales, temas que nos son interesantes.

El capítulo I analiza el impacto social y económico de los desastres naturales. A partir de la definición de riesgo se observan los principales fenómenos naturales que han afectado diferentes ciudades del mundo a lo largo de la historia y manifiesta la importancia de investigar sobre la vulnerabilidad de las zonas urbanas, utilizando varios ejemplos de desastres ocurridos a nivel nacional, particularmente aquellos que han tenido impacto en el estado de Chiapas.

El capítulo II ofrece un panorama general en torno a uno de los fenómenos naturales más comunes del sureste de México: los sismos. Se hace mención de la evolución de la sismometría en el país, así como de conceptos fundamentales para entender este fenómeno. Para analizar la sismicidad regional se usan los catálogos del Centro Internacional de Sismología y del Servicio Sismológico Nacional y se mencionan los esfuerzos de la Escuela de Ingeniería Ambiental en el registro y análisis de los sismos originados en el sureste de México.

---

El capítulo III propone incorporar el concepto de disturbio en las estrategias del manejo silvícola en los bosques templados. Considerando generalidades del manejo forestal en el país, así como particularidades de la producción silvícola del estado de Chiapas, se sugieren algunas alternativas de manejo para disminuir la vulnerabilidad de este sistema productivo al efecto de las plagas forestales.

El capítulo IV aborda estadísticas nacionales y estatales sobre la potabilización del agua, y el tratamiento de aguas residuales de origen municipal. Haciendo un recuento de la infraestructura disponible para la depuración de las aguas residuales generadas en el estado de Chiapas, además de un recorrido por los diversos métodos de tratamiento de aguas residuales y sus variantes y posibilidades de aplicación.

El capítulo V describe las etapas generales que comprende el manejo de los residuos sólidos: generación, almacenamiento, recolección y disposición final, realizando un énfasis particular en los residuos catalogados como no peligrosos. Analizando principalmente la etapa de disposición final, comentando de manera general la situación de los municipios del estado de Chiapas, con respecto a la forma de disponer los residuos sólidos y el grado de cumplimiento con la normatividad ambiental.

El capítulo VI pone a consideración las oportunidades de aplicación de la fibra óptica en sensores de detección y medición de parámetros ambientales. Se realiza una descripción de la utilización de la fibra óptica en los sistemas de comunicación para explicar como su estructura y funcionamiento permiten considerarla como un elemento importante en las herramientas de cuantificación de parámetros fisicoquímicos, lo que permite darle solución a problemas de la contaminación ambiental.

El capítulo VII presenta un enfoque histórico sobre la descripción corpuscular y ondulatoria de la luz desde los diferentes experimentos iniciales que comprobaron ambas propiedades. Se describe además de manera breve los métodos ópticos de análisis espectrofotométricos y aquellos que no lo requieren, así como su aplicación en la caracterización y medición de contaminantes en la atmósfera.

El objetivo de este libro es ofrecer un espacio de entendimiento de asuntos ambientales e inspiración al desarrollo de nuestra sociedad.

Rodolfo Palacios Silva

## Semblanza del Cuerpo Académico de Estudios Ambientales y Riesgos Naturales

El Cuerpo Académico (CA) denominado *Estudios Ambientales y Riesgos Naturales*, es uno de los más jóvenes de la Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas (UNICACH) y es producto del dinamismo que en años recientes caracterizan a nuestra Universidad.

Este CA está conformado por personal multidisciplinario joven y con inquietud de investigación y aplicación del conocimiento, agrupados en dos líneas estratégicas denominadas Estudios Ambientales la primera y Riesgos Naturales la segunda. El CA pertenece al programa educativo (PE) de Ingeniería Ambiental, integrado en la división de ingeniería (DI) que incluye otros dos PE.

En la DI hay otro CA que fue el origen del que se presenta en este documento, el cual se denomina Geomática e Hidrología, este presentó desde su formación una sola línea de generación y aplicación del conocimiento (LGAC), fue hasta la elaboración del Programa Integral de Fortalecimiento Interinstitucional (PIFI) en su versión 3.2 (2005), cuando se propuso una segunda LGAC denominada Estudios de Prevención y Mitigación para Zonas de Alto Riesgo.

La LGAC fue creciendo y adhiriendo a investigadores, los cuales tras un tiempo prudente y derivado de su trabajo académico (a principios de 2008), proponen a las autoridades de nuestra Universidad la necesidad de continuar el trabajo en un nuevo CA, el cual en su primera evaluación confirmó su pertinencia y se encontró cercano a alcanzar una categoría superior, no obstante su juventud.

Raúl González Herrera



## I. Los desastres naturales y sus costos

M.I. Raúl González Herrera

### Desastres naturales y su clasificación

Un desastre puede definirse como<sup>[7]</sup>: “un evento o suceso que ocurre, en la mayoría de los casos, de forma repentina e inesperada, causando sobre los elementos sometidos alteraciones intensas, representadas en la pérdida de vida y salud de la población, la destrucción o pérdida de los bienes de una colectividad y daños severos sobre el medio ambiente”. Esta situación significa la desorganización de los patrones normales de vida, generando desconcierto en las personas, efectos sobre la estructura socioeconómica de una región o un país y la modificación del medio ambiente, lo cual determina la necesidad de asistencia y de intervención inmediata, que puede durar varios años.

Para definir un desastre debemos definir el subsistema que los produce y el que los controla. De esta diferenciación surgen dos elementos esenciales: calamidad y desastre. El primero entendido como aquel fenómeno destructivo que perturba y provoca daños a un sistema propenso a sus impactos, puede ser una región, comunidad, área, obra, etcétera., que abarca tanto la población expuesta y sus bienes como el medio ambiente; el segundo, no sólo se refiere a los estados mismos de pérdidas humanas y daños materiales, sino a todas las consecuencias adversas que se caracterizan por múltiples alteraciones del orden normal de las relaciones productivas, comerciales, sociales, de seguridad y políticas en la sociedad <sup>[10]</sup>.

Los desastres pueden ser originados por la manifestación de un fenómeno natural, provocados por el hombre o como consecuencia de una falla de carácter técnico en sistemas industriales o bélicos. Las ciudades y sus construcciones deben ser capaces de comportarse de manera correcta ante éstos, tras cumplir las recomendaciones de los estudios de riesgo, como lo ejemplifica <sup>[6]</sup>, para el caso del terrorismo en los Estados Unidos y en particular tras el atentado del 11 de septiembre del 2001.

Algunos desastres de origen natural corresponden a amenazas que no pueden ser neutralizadas debido a que difícilmente su mecanismo de origen puede ser intervenido, aunque en algunos casos puede controlarse parcialmente (esto se refiere al desastre más nunca al fenómeno) ya que sus manifestaciones pueden ser paulatinas en el tiempo e identificadas mediante monitoreo constante, planificación de las ciudades, respeto de los derechos de vía y áreas protegidas, construcción con sistemas de control de la respuesta y verificando reglamentos para actualizarlos y cumplirlos.

Los desastres, cualesquiera que sean sus génesis, causas y procesos desencadenantes, ocurren en todas las escalas, desde lo individual - familiar y puntual - hasta lo nacional e internacional, los cuales sólo son diferenciados según las capacidades y conocimientos para la mitigación que cada comunidad o individuo haya logrado desarrollar.

Una lista general de los fenómenos naturales que pueden originar desastres o calamidades es la siguiente:

- Terremotos
- Tsunamis (maremotos)
- Erupciones volcánicas
- Huracanes (tormentas y vendavales)
- Inundaciones
- Movimientos en masa (deslizamientos, derrumbes, flujos)
- Sequías (desertificación)
- Epidemias
- Plagas

Entendiendo estos fenómenos como complejos, producen a su vez fenómenos secundarios derivados de los primeros, como es el caso de las avalanchas y los flujos de material piroclástico, los que están directamen-

te asociados con el fenómeno volcánico. Existen otros fenómenos que pudieran asimilarse como equivalentes, como es el caso de los tornados, ciclones tropicales o tifones, que pueden relacionarse con el término huracanes. La mayoría de estos fenómenos ocurren de forma cataclísmica, es decir, súbitamente y afectan un área no muy grande. Sin embargo, hay casos como la desertificación y las sequías, que ocurren durante un largo periodo sobre áreas extensas de manera casi irreversible.

Los desastres de tipo antrópico pueden ser originados intencionalmente por el hombre o por una falla de carácter técnico, la cual puede desencadenar fallas en serie, causando un desastre de gran magnitud. Como ejemplo podemos citar el terrorismo ocurrido el 11 de septiembre de 2001, el cual culminó en una guerra de consecuencias impactantes para el mundo y produjo una crisis social y un estancamiento económico de orden mundial. Entre otros desastres de origen antrópico pueden mencionarse los siguientes:

- Guerras
- Terrorismo
- Explosiones
- Incendios
- Accidentes
- Deforestación
- Contaminación
- Colapsos (impactos)

En la actualidad los centros urbanos ofrecen una alta susceptibilidad a que se presenten este tipo de eventos debido a la concentración de la industria y su vinculación con zonas urbanas de alta densidad de población, de la edificación masiva y de los medios e infraestructura de transporte, comunicación y energía en pequeñas áreas.

## Marco conceptual del riesgo

Ante la diversidad de conceptos acerca de los desastres naturales que eran propuestos por algunos autores de todo el mundo y con el fin de unificar sus acepciones, la Oficina de las Naciones Unidad para Desastres (UNDRO) que está dentro de la Oficina para Asuntos Humanita-

rios (DAH) en conjunto con el Programa para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) promovió una reunión de expertos para obtener conceptos homogéneos para la disciplina. A partir de esta reunión, las acepciones que se utilizan en esta disciplina son:

- **Amenaza o peligro (Hazard – H)**, definida como la probabilidad de ocurrencia de un evento potencialmente desastroso durante cierto periodo de tiempo en un sitio dado.
- **Vulnerabilidad (V) (Vulnerability – V)**, conocida como el grado de pérdida de un elemento o grupo de elementos bajo riesgo, resultado de la probable ocurrencia de un evento desastroso, expresada en una escala desde cero “0”, o sin daño, hasta uno “1”, o pérdida total.
- **Riesgo Específico (Specific Risk – R<sub>s</sub>)**, como el grado de pérdidas esperadas debido a la ocurrencia de un evento particular y como una función de la amenaza y la vulnerabilidad.
- **Elementos bajo Riesgo (E)**, como la población, las edificaciones y obras civiles, las actividades económicas, los servicios públicos, las utilidades y la infraestructura expuestos en un área determinada.
- **Riesgo Total (Total Risk – R<sub>t</sub>)**, como el número de pérdidas humanas, heridos, daños a las propiedades y efectos sobre la actividad económica, debido a la ocurrencia de un evento desastroso, es decir, el producto del riesgo específico R<sub>s</sub> y los elementos bajo riesgo E.

En otras palabras, la evaluación del riesgo puede llevarse a cabo mediante la siguiente formulación general:

$$R_t = E * R = E * (HV) \quad (1)$$

Considerando la exposición E, implícita en la vulnerabilidad V, sin que esto modifique la concepción original, podría plantearse que:

Una vez conocida la amenaza o peligro H<sub>t</sub>, entendida como la susceptibilidad o posibilidad de que se presente un evento con una intensidad mayor o igual a i durante un periodo de exposición t, y conocida

la vulnerabilidad  $V_e$ , entendida como la predisposición intrínseca de un elemento expuesto e a ser afectado o de ser susceptible a sufrir una pérdida ante la ocurrencia de un evento con una intensidad  $i$ , el riesgo  $R_{ie}$  puede entenderse como la posibilidad de que se presente una pérdida sobre el elemento  $e$ , como consecuencia de la ocurrencia de un evento con una intensidad mayor o igual a  $i$ ,

$$R_{ie} = (H_i, V_e) \quad (2)$$

Es decir, la posibilidad de exceder unas consecuencias sociales y económicas durante un periodo de tiempo  $t$  dado.

De una manera más exacta, entonces, pueden distinguirse dos conceptos que en ocasiones han sido equivocadamente considerados como sinónimos pero que son diferentes tanto desde el punto de vista cualitativo como cuantitativo:

- La amenaza o peligro, o factor de riesgo externo de un sujeto o sistema, representado por un peligro latente asociado con un fenómeno físico de origen natural o tecnológico que puede presentarse en un sitio específico y en un tiempo determinado, produciendo efectos adversos en las personas, los bienes y/o el medio ambiente. Matemáticamente es expresado como la posibilidad de exceder un nivel de ocurrencia de un evento con una cierta intensidad en un cierto sitio y en cierto periodo de tiempo.
- El riesgo, o daño, destrucción o pérdida esperada obtenido de la convolución de la probabilidad de ocurrencia de eventos peligrosos y de la vulnerabilidad de los elementos expuestos a tales amenazas, matemáticamente expresado como la posibilidad de exceder un nivel de consecuencias económicas y sociales en cierto sitio y en cierto periodo de tiempo. Según <sup>[2]</sup>, la palabra riesgo proviene de la palabra griega RHIZA que hace alusión a los peligros de navegar alrededor de un arrecife.

En términos generales, la vulnerabilidad puede entenderse, entonces, como la predisposición intrínseca de un sujeto o elemento a sufrir daño debido a posibles acciones externas, y por lo tanto su evaluación

contribuye en forma fundamental al conocimiento del riesgo mediante interacciones del elemento susceptible con el ambiente peligroso.

La vulnerabilidad de un grupo de personas o de una región está inseparablemente ligada a los procesos sociales, culturales y económicos en el lugar, así como a la transformación agrícola y ecológica de la región.

Según <sup>[2]</sup>, las vulnerabilidades se crean; son el producto de la evolución —tanto positiva como negativa— de la sociedad, puesto que reflejan la debilidad, las falencias o los trastornos dentro de la evolución de una determinada sociedad.

La diferencia fundamental entre la amenaza y el riesgo está en que la amenaza está relacionada con la probabilidad de que se manifieste un evento natural o un evento provocado, mientras que el riesgo está relacionado con la posibilidad de que se manifiesten ciertas consecuencias, las cuales están íntimamente relacionadas no sólo con el grado de exposición de los elementos sometidos, sino con la vulnerabilidad que tienen dichos elementos a ser afectados por el evento.

Debemos considerar que los elementos en riesgo son: Las construcciones, las actividades económicas, culturales y sociales, la infraestructura, los servicios públicos, las líneas de comunicación, vidas humanas, entre otras.

Otro elemento a considerar es la gestión del riesgo, que es el proceso multidisciplinario mediante el cual los organismos públicos o privados pueden trabajar organizadamente para reducir el riesgo en una región. En la figura 1 se muestra el ciclo en que se puede esquematizar la gestión del riesgo.



Figura 1. Ciclo de la gestión de riesgos y reducción de la vulnerabilidad <sup>[2]</sup>

A través de la gestión de riesgos es posible trabajar en los siguientes temas:

- Disminuir los efectos de las amenazas naturales
- Intervención de la vulnerabilidad de las ciudades y los elementos expuestos
- Reducir al mínimo las amenazas socio-naturales y tecnológicas
- Prevenir el deterioro del medio ambiente

### Importancia económica de los estudios de riesgo en el mundo

Con el establecimiento de las primeras ciudades, comenzó el reto para sus habitantes de estudiar las condiciones de la región donde establecían su urbe y las técnicas de construcción adecuadas para estas. Pronto descubrirían que el sitio elegido debía ser estratégico no sólo para satisfacer sus necesidades de alimento, agua, defensa, clima, etcétera., sino que relacionados a las ciudades, existían peligros naturales relativos que debían considerarse.

Los sismos han sido uno de los retos más importantes para las ciudades desde sus comienzos. Son varios los relatos de ciudades de la antigüedad que desaparecieron o se refundaron en otro sitio tras la ocurrencia de un sismo de magnitud importante (Pompeya y Herculano), perdieron su estatus de capital (la ciudad de Antigua en Guatemala) o simplemente la gente emigraba a otra, para sentirse a salvo.

Otro elemento a considerar es que, desde hace casi mil años, ya eran alarmantes las pérdidas de vidas humanas en ciudades ubicadas en países densamente poblados, como China e India (véase figura 2b).



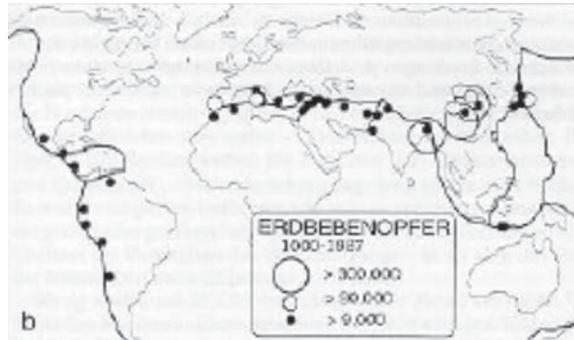
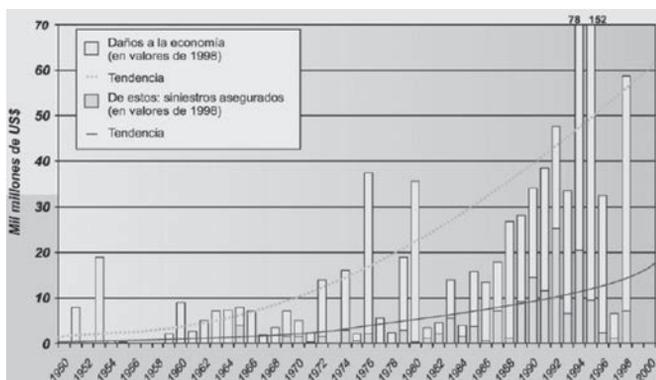


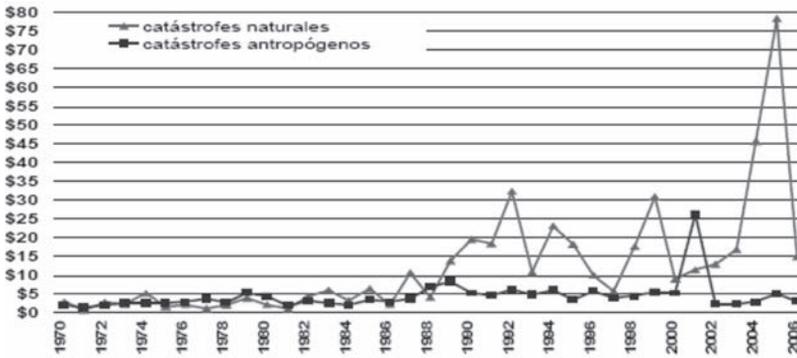
Figura 2. a) Ciudades en el año 2000 con más de dos millones de habitantes y b) Terremotos ocurridos desde el año 1000 y hasta 1987 con más de 9,000 víctimas <sup>[1]</sup>

No obstante que a lo largo de los años la ingeniería ha evolucionado permitiendo mejorar los sistemas estructurales y constructivos y contar con reglamentos constructivos más específicos, sin embargo, las dimensiones que han alcanzado algunas de las ciudades, los costos de los terrenos más seguros, la desatención por parte de las autoridades de la invasión de terrenos ubicados en zonas de alto riesgo y la falta de planeación urbana, en gran medida potenciada por un crecimiento descontrolado de las zonas urbanas por la pobreza del campo, ha hecho que cada vez más habitantes desarrollen su vida en zonas de mayor riesgo de distintos fenómenos naturales.

a)



b)



c)

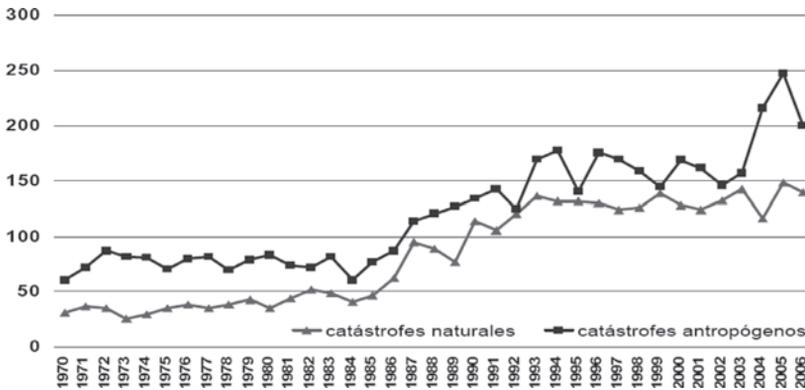


Figura 3. a) Daños económicos mundiales debidos a desastres naturales para la segunda mitad del siglo XX [14]. Los años 1994 y 1995 no se representan a escala y sólo se señala la cantidad económica que representaron para el mundo. b) Número de eventos catastróficos en el mundo catalogados por su origen natural y antropogénico [1]. a) Costos asociados a los desastres en miles de millones de dólares a precios de 2006 [1].

En la actualidad los riesgos para la ciudades han crecido exponencialmente (véase figuras 3a, 3b y 3c), no obstante que en nuestros días

se tiene mayor información sobre estos fenómenos, se caracteriza mejor el peligro y se ha establecido un importante número de metodologías para evaluar la vulnerabilidad, el riesgo y sus costos asociados. Las dimensiones de las ciudades y la inversión de la infraestructura presente, hace que el nivel de riesgo económico y social sea cada vez más alto, siendo ahora casi imposible trasladar las ciudades hacia otro sitio como en el pasado.

La figura 3a muestra de manera esquemática una gráfica elaborada con información procesada en el CENAPRED (Centro Nacional de Prevención de Desastres Naturales), donde se indica de manera general el comportamiento mundial de los desastres naturales para un periodo de 50 años, con sus respectivas consecuencias sociales y económicas.

En la figura 3b se enumera el crecimiento anual de los principales desastres en el mundo recopilados <sup>[1]</sup> y en la figura 3c se refleja el impacto económico de los desastres, donde es claro que se incrementan, pero que adicionalmente el costo de los ocasionados por fenómenos naturales es muy superior recientemente a los ocasionados por el hombre que guardan una tendencia estable, lo que hace que muchos investigadores afirmen que el cambio climático es el causante.

Lo que es indudable es que los desastres muestran una tendencia de crecimiento exponencial, lo cual denuncia que cada vez son más vulnerables las principales economías mundiales a los desastres y cada uno de estos eventos tiene repercusiones no sólo locales como en el pasado (véase figura 4), sino a nivel mundial.

El sismo de abril de 1906 en San Francisco del que se muestra una fotografía en la figura 4, desapareció prácticamente la ciudad, no sólo por la acción del sismo sino por los incendios que se provocaron tras el sismo. No obstante la destrucción, su impacto no fue devastador en la economía nacional y el efecto mundial fue discreto, sin embargo en nuestros días un evento de esta magnitud representaría un impacto no sólo nacional, sino mundial y hay estadísticas que dicen que de ocurrir en el año 2005 un evento similar podría costar 108 mil millones de dólares, lo cual si podría desestabilizar la economía mundial.



Figura 4. Daños por el sismo de abril de 1906 en San Francisco, California [8].

Tras analizar lo anteriormente expuesto, las principales economías del mundo organizaron conjuntamente en mayo de 1994 en Yokohama, Japón, la primera Conferencia Mundial sobre la Reducción de los Desastres, que tuvo como elemento de coincidencia el trabajo desarrollado por todos los participantes, el cual fue denominado “Estrategia de Yokohama para un mundo más seguro y su plan de acción”<sup>1</sup>.

Dentro de esta estrategia global se manifestó un compromiso generalizado para implementar las siguientes acciones en pro de la reducción de desastres mundiales para las siguientes áreas:

- Sociológicas: aprender a vivir con el riesgo mediante una cultura de la prevención y difusión de las amenazas naturales y sus consecuencias.
- Técnicas: realizar investigación sobre el tema para reducir la vulnerabilidad, estando conscientes del peligro y divulgarlo a la sociedad de manera clara y concisa.
- Políticas: gestión integral de riesgos, planificación del desarrollo urbano en las ciudades y brindar recursos para la prevención.

Sin embargo, tras haber transcurrido más de quince años de haberse celebrado la cumbre de Yokohama, los desastres subsecuentes en el mundo han sido cada vez más costosos, esto ha ocasionado que la manera en que se estudia el fenómeno del riesgo, así como el número

---

<sup>1</sup> [http://www.unisdr.org/eng/about\\_isdr/bd-yokohama-strat-eng.htm](http://www.unisdr.org/eng/about_isdr/bd-yokohama-strat-eng.htm)

de investigadores involucrados y los recursos asignados para esta tarea sean cada vez mayores.

Basta como ejemplo recordar que posterior a la cumbre de Yokohama, han ocurrido sismos como los de Northridge (Estados Unidos, 1994), Kobe (Japón, 1995), Bam (Irán, 2003), Tecomán (México, 2003), Pisco (Perú, 2007), y Wenchuan (China, 2008), el maremoto del océano Índico, huracanes como Stan, Wilma y Katrina; entre otras catástrofes las cuales suman más de 71,000 eventos a nivel mundial con 400,000 fallecidos y más de 1,000 millones de dólares en pérdidas <sup>[5]</sup>.

En el año 2005 y para el periodo 2005-2015 se llevó a cabo otra reunión en la ciudad de Kobe, Japón a diez años del sismo más costoso de la historia (180 billones de dólares) donde se hicieron los compromisos siguientes:

- Implementar la reducción de riesgos de los desastres a todos los niveles y, en particular, su integración en los procesos de planificación del desarrollo.
- Reducción de los riesgos a través de la reducción de la pobreza, el desarrollo y la preservación del medio ambiente.

### Importancia económica de los estudios de riesgo en México

El CENAPRED es la instancia que en nuestro país ha estudiado el fenómeno de riesgo con todos sus componentes, así como los costos asociados a los desastres. Ha documentado su investigación económica en una serie de reportes denominados “Impacto Socioeconómico de los Desastres en México”, los cuales fueron coordinados <sup>[4]</sup>, y aún siguen desarrollándose anualmente, estando hasta la fecha publicado en línea el anuario 2006. En síntesis, de estas investigaciones se desprenden las siguientes cifras para todo el país durante el periodo de 1900 al año 2000:

- Durante el siglo XX, en nuestro país ocurrieron 71 sismos con magnitud  $M \geq 6.0$ .
- El 33% de la población (hasta el censo del INEGI del año 2000) vive en zonas de alto y muy alto peligro sísmico.
- Durante el sismo de 1985 según cifras oficiales hubo pérdidas por 4,500 millones de dólares, más de 10,000 víctimas fatales y 90,000 viviendas dañadas.

- En 1999 con dos sismos (Colima y Puebla), de M<sub>7.5</sub>, hubo daños en 51,000 viviendas, 3,600 escuelas y 221 hospitales.
- En el periodo comprendido entre los años 1980 y 1999, el impacto de los huracanes en México produjo un poco más de 160,000 viviendas dañadas y 55,000 viviendas destruidas.
- Fuera de los cien años de estudio, pero un dato interesante corresponde a los fenómenos del año 2005 cuando los huracanes Stan y Wilma, produjeron daños en nuestro país por 15,000 millones de dólares (tres veces más que en el sismo de 1985, pero se debe considerar que estos datos se relacionan con montos asegurados)<sup>2</sup>

Revisando las cifras, podemos entender que los desastres son cada vez más cercanos a nosotros y representan un costo que el país no puede superar fácilmente, lo cual se comprende de manera muy contundente tras considerar el tiempo de recuperación del país con el sismo de 1985.

Tras un desastre, las regiones afectadas retroceden algunos años en su desarrollo social y económico. Tal es el caso de la ciudad de Tapachula de Córdova y Ordoñez en la costa de Chiapas, que a poco más de tres años del impacto del huracán Stan, siguen siendo infructuosos los esfuerzos de las autoridades y la sociedad civil para alcanzar al menos en cada uno de sus habitantes e infraestructura, las mismas condiciones existentes previas al desastre natural.

En nuestro país los riesgos presentes en cada región de estudio se han catalogado en documentos denominados “Atlas de riesgo” [3], el cual agrupa los riesgos presentes mediante la siguiente clasificación:

- Riesgos geológicos
- Riesgos hidrometeorológicos
- Riesgos químico-tecnológicos
- Riesgos biológicos-sanitarios
- Riesgos socioeconómicos

Hasta el año 2000 y durante todo el siglo pasado, el CENAPRED tiene registrados y estudiados a 101 “grandes desastres” en el territo-

---

<sup>2</sup> <http://www.elfinanciero.com.mx/pages/NotaEMail.aspx?IdNota=146273>

rio nacional. Dentro de esta selección, se consideran sólo aquellos que fueron provocados por causas naturales y fueron agrupados de acuerdo con las categorías presentes en los Atlas de riesgo.

El porcentaje representativo de cada una de estas categorías se pueden observar en la figura 5. En ella se muestra que los riesgos geológicos e hidrometeorológicos han aportado el 80% de los desastres naturales y costos asociados a ellos en todo el país durante el periodo de estudio, pero puede intuirse que ha sido así en toda la historia de nuestro país. No obstante los fenómenos socio organizativos no parecen impactar en cantidad, en 1910 se presentó nuestra Revolución cuyos efectos aún no concluyen, con lo cual entender por número de eventos el impacto de los fenómenos, puede ser simplista.

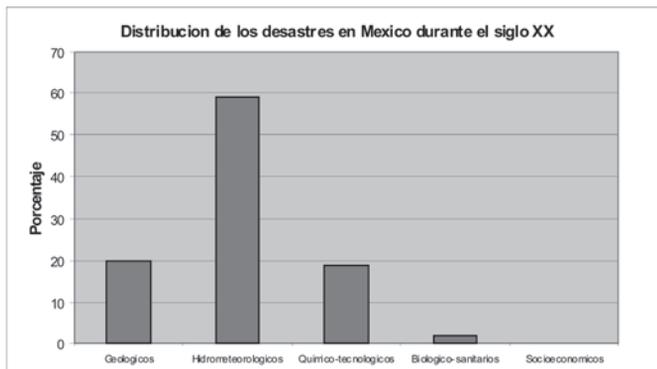


Figura 5. Clasificación de los 101 principales desastres naturales ocurridos en México en el siglo XX <sup>[4]</sup>.

No obstante que los fenómenos hidrometeorológicos son los que más daños ocasionaron durante el siglo pasado y al inicio de éste y son los eventos naturales destructores que más frecuentemente se presentaron, los sismos son los que más viviendas dañan por evento como se puede ver en el estudio desarrollado <sup>[16]</sup>, donde se analizan 2,674 eventos que se presentaron desde enero 1988 a diciembre de 1997. Los resultados del estudio se observan en la tabla 1.

Tabla 1. Índice de muertos y heridos, así como viviendas afectadas por desastre natural en México desde 1988 hasta 1999 <sup>[16]</sup>.

Concepto	Inundación	Deslizamiento	Incendio	Sismo
Relación de heridos y muertos por evento	0.20	0.70	4.20	0.20
Viviendas afectadas y destruidas por evento	6.60	2.50	0.10	8.30

En la tabla 1 observamos que por inundación y sismo han muerto un promedio de 0.20 personas, una cantidad inferior a los decesos que se presentan en incendios y deslizamientos, sin embargo por sismo se pierden un mayor número de viviendas 8.30 comparadas con las 6.60 que se pierden durante una inundación y no se diga respecto a otros fenómenos naturales como incendio o deslizamiento.

En las figuras 6a y 6b, se muestran las afectaciones que se han presentado en distintos sectores básicos de la economía de los estados y el país según lo reportado por el estudio desarrollado con la metodología denominada *Desinventar*, elaborado por <sup>[16]</sup>. En la gráfica de la figura 6a se observa que Chiapas es el quinto estado con mayor daño en su infraestructura (tan solo por debajo del Distrito Federal, Estado de México, Veracruz y Oaxaca), pero debe considerarse que el estado de Chiapas está muy rezagado en infraestructura, por lo cual, el daño a ésta, afecta aún más a los distintos sectores.

El estudio referenciado no contempla los años 1998, 2005 y 2007, en los cuales el estado de Chiapas ha sido afectado por distintos eventos muy importantes en cuanto al daño que produjeron, considerando lo anterior las cifras se harían más críticas de lo reportado anteriormente para los sectores agropecuario, educación, industria y de transporte, los cuales son los considerados en el estudio. En la gráfica de la figura 6b se observa que Chiapas es el catorceavo estado con mayor daño en su infraestructura de servicios (considerando alcantarillado, energía y acueducto).

La tendencia ascendente de los daños causados por los desastres y considerando lo limitado de los recursos disponibles para resarcirlos (al menos en lo que respecta a la parte económica), pone de manifiesto que una de las mejores alternativas para disminuir el riesgo y atenuar su impacto económico, es reducir la vulnerabilidad de nuestras ciudades, lo cual es una tarea que obliga una mejoría técnica y cultural en la sociedad, así como un marco de legalidad en las decisiones de las autoridades y en su postura frente a las invasiones de terrenos no apropiados para el desarrollo urbano.

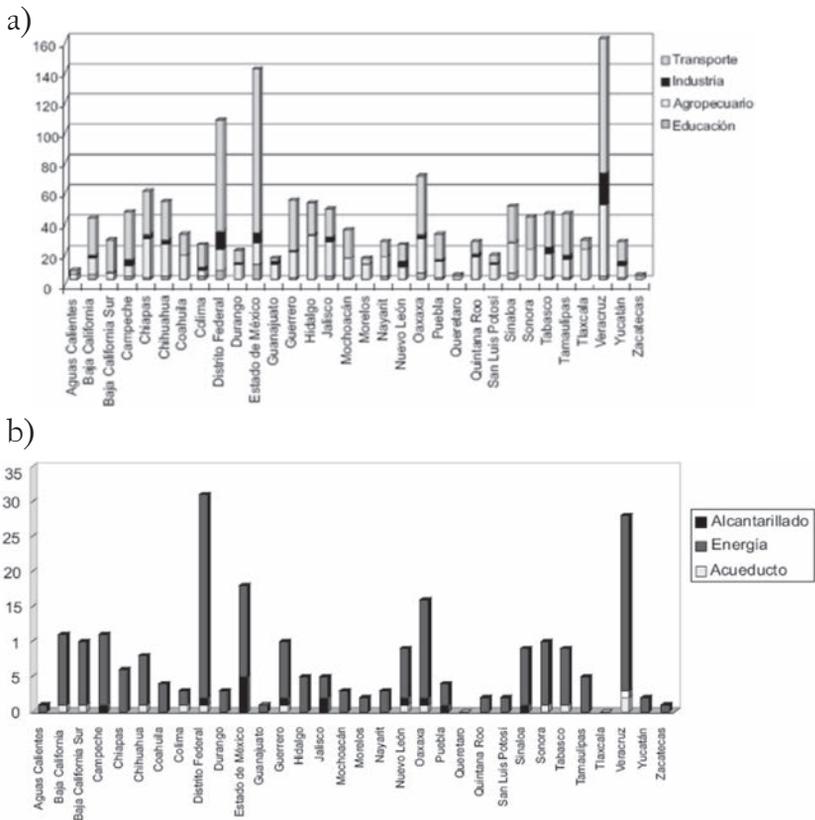


Figura 6. a) Afectaciones a distintos sectores y su respectiva infraestructura <sup>[16]</sup>. b) Afectaciones a distintos servicios y su infraestructura <sup>[16]</sup>.

## Importancia económica de los estudios de riesgo en Chiapas

Los diversos fenómenos naturales, tras su paso por el estado de Chiapas, también se han convertido en desastres naturales por las condiciones de vulnerabilidad técnica, social y económica que presenta la entidad.

Desde 1996, fecha en que empezó a funcionar el FONDEN (Fondo Nacional para Desastres Naturales), y hasta el 2004 se entregaron a las autoridades del estado de Chiapas, en números cerrados el 20% de este fondo, lo que corresponde a un monto de 5,275.90 millones de pesos.

La cantidad anterior ubicó al estado de Chiapas en el primer lugar de las 32 entidades federativas en cantidad de apoyo recibido. Los resultados anteriores se pueden observar en la figura 7 y denuncia la urgencia de elaborar estudios de riesgo para el estado en general y su capital Tuxtla Gutiérrez.

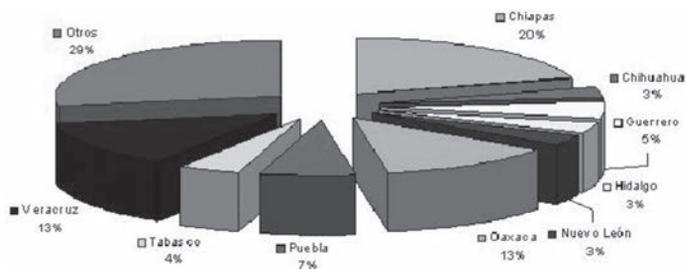


Figura 7. Esquema porcentual de los montos del FONDEN otorgados a las distintas entidades de la República Mexicana [5].

En la más reciente actualización que se hace de los recursos otorgados a los estados mediante el FONDEN [12], se puede observar que debido a que durante el 2006 no hubo desastres importantes en el estado de Chiapas y si en otros estados, el porcentaje de apoyo al estado de Chiapas se redujo al 13.40% del monto.

Sin embargo este porcentaje aumentará nuevamente para el 2008 debido a los eventos en la zona norte del estado con el desgajamiento de cerros en Ostuacán, lo cual detonó el desarrollo de las ciudades rurales que tienen por objeto disminuir el riesgo y la marginación generada por la dispersión rural.

Tabla 2. Distribución del FONDEN en Chiapas desde 1996 hasta 2006 y comparación con los gastos nacionales <sup>[12]</sup>.

Concepto	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	%
Total	861	2,520	3,267	6,969	4,841	825	4,044	1,765	1,863	8,530	3,940	100
Chiapas	0	52	1,923	353	40	41	128	45	187	2,507	0	13.4

En la tabla 3 se presentan los desastres naturales más importantes que han acontecido en el estado de Chiapas para el periodo comprendido desde 1982 y hasta 2007 y sus principales repercusiones no sólo económicas, sino en víctimas y daños reportados por el CENAPRED y el gobierno del Estado, las cuales pueden diferir respecto a las mencionadas por otras publicaciones.

De la relación de desastres de la tabla 3 podemos mencionar que no todos los desastres muestran un monto del costo, lo anterior se debe a lo complicado que es determinarlas y más aun las correspondientes a las pérdidas indirectas.

A continuación se presenta una relación de otros desastres naturales que han impactado al Estado en su historia moderna según la clasificación que incluye el Atlas de riesgos <sup>[3]</sup>.

**Riesgos Hidrometeorológicos.** Estos fenómenos son los más recurrentes en el Estado y son debidos principalmente a inundaciones, huracanes, y sequías. Los principales eventos que han afectado el estado de Chiapas son los siguientes:

- En 1785 se desbordó el río San Cristóbal, ocasionando grandes pérdidas directas e indirectas y la necesidad de construcción de los túneles, los cuales aún se mantienen como la principal defensa contra inundaciones de la ciudad de San Cristóbal de Las Casas.
- El huracán *Miriam* en 1988. Provocó 51,159 Has agrícolas dañadas y 6,770 damnificados.
- Los huracanes *Opal* y *Félix* en 1995. Provocaron inundaciones de 19 comunidades rurales, 7 víctimas y 3,000 damnificados.

Tabla 3. Costos de los principales desastres ocurridos en el estado de Chiapas desde 1980 hasta 2007, <sup>[5]</sup> complementada por la página del Sistema de Información y Prevención de Desastres en Chiapas <http://200.23.34.73/index.php>

Eventos en Chiapas	Año	Muertos / Casas dañadas	Daños directos (MD)	Daños indirectos (MD)	Total daños (MD)
Volcán Chichonal	1982	1,770 / NC	205.40	NC	205.40
Lluvias torrenciales	1982	NC / NC	36.94	NC	36.94
Lluvias torrenciales	1985	NC / NC	17.85	NC	17.85
Huracán Miriam	1988	1 / 755	NC	NC	NC
Tromba	1992	NC / 392	1.30	NC	1.30
Huracanes Opal y Félix	1995	7 / 3,000	NC	NC	NC
Huracanes Earl y Javier	1998	407 / 28,753	602.70	NC	602.70
Incendios forestales El Ocote	1998	NC / NC	900.00	NC	900.00
Lluvias torrenciales	1999	NC / NC	108.00	NC	108.00
Lluvias torrenciales	2000	NC / NC	17.85	NC	17.85
Lluvias torrenciales	2001	NC / NC	9.26	NC	9.26
Huracán Isidore	2002	NC / 171	0.86	NC	0.86
Huracán Larry	2003	NC / 1,862	NC	NC	NC
Huracán Stan	2005	86 / 32,514	878.69	624.79	1,503.48
Huracán Bárbara	2007	NC / 2,500	28.2	NC	28.2
Deslizamiento de laderas Ostucán	2007	13 / 327	254.3	NC	254.3
Resumen	1982-2007	2,277/69,882	3,061.35	624.79	3,686.14

(NC) No cuantificados, (MD) Millones de dólares

- Los huracanes *Olaf* y *Paulina* en 1997. Provocaron inundaciones en 7 municipios.
- Los huracanes *Earl* y *Javier* en 1998. Afectaron 39 municipios, provocando 407 decesos, 554 desaparecidos, 28,753 viviendas dañadas, 28,753 damnificados, 22 puentes colapsaron, 712 Km de carretera dañadas – tal como la carretera Panamericana –, así como 3,600 Km de caminos rurales.
- El huracán *Isidore* en 2002. Generó 171 viviendas dañadas y 8.6 millones de pesos en pérdidas.
- El huracán *Larry* en 2003. Provocó daño en 5 municipios como Tuxtla Gutiérrez y 1,862 viviendas dañadas.
- El huracán *Stan* en 2005. Provocó 86 muertos, 32,514 viviendas afectadas, 208,064.60 Has deforestadas, 5,669.20 caminos dañados. Ha sido el huracán más importante en los desastres naturales en Chiapas. Véase las figuras 8a, 8b, 8c y 8d.
- El huracán *Bárbara* en 2007. Provocó 2,500 damnificados en 17 municipios, 1,597 viviendas afectadas y 5,600 Has pérdidas.

Parece contrastante pensar sobre sequías ocurridas en un estado como Chiapas, pero en algunos momentos se han presentado. Los daños más importantes por sequías <sup>[5]</sup> son los siguientes:

- Año 1994 se perdieron 12,000 Has de maíz.
- Año 1998 se secaron varias lagunas.
- Año 2005 se perdieron 66,094.50 Has de cosechas diversas.



Figuras 8. Daños ocasionados por las lluvias provocadas por huracán Stan, fotos de la página del Sistema de Información y Prevención de Desastres en Chiapas. <http://200.23.34.73/index.php>.

**Riesgos geológicos.** Estos fenómenos son debidos principalmente a erupciones volcánicas, deslaves y sismos. En este capítulo no se abunda sobre el aspecto sísmico, que se tratará más adelante.

- En 1982 el volcán Chichonal presentó una erupción violenta el 28 de marzo, 3 y 4 de abril. El poblado de Francisco León, a 5.0 km del volcán fue arrasado y las cenizas alcanzaron la ciudad de Villahermosa a 70 km del volcán con capas de hasta 5.0 cm de espesor. Los damnificados fueron 150,000 en un radio de 200 km., 209 muertos y 510 personas desaparecidas, 15,000 Has de maíz, 905 Has de frijol, 10,000 Has de café, 17,000 Has de cacao y 4,000 Has de plátano.
- El 11 de octubre de 2007, se desgajó un cerro en Ostucán y Tecpatán (véase figura 9) debido a los frentes fríos 2 y 4, se inundaron más de 327 viviendas por el crecimiento del río Grijalva y se otorgaron a través del FONDEN \$2,284 millones de pesos. Datos extraídos de El Heraldo el día 11 de enero de 2008, en entrevista con Cristóbal Zavala de Paz, Subsecretario de Protección Civil.



Figura 9. Taponamiento del río Grijalva por el desgajamiento de un cerro en Ostucán <sup>[15]</sup>.

**Riesgos químicos.** Estos fenómenos se limitan a contaminación e incendios. Los principales eventos que han afectado al estado de Chiapas son los siguientes:

- Incendios forestales en 1988, los cuales provocaron 492 siniestros con 51,159 Has afectadas.
- Incendios forestales en 1994, los que provocaron 121 incendios con 16,673 Has.
- En el año 1995, se suscitaron 150 incendios con 24,193 Has afectadas.
- En el año 1996, se presentaron 197 incendios con 18,574 Has dañadas.
- En el año 1997, se generaron 181 incendios con 48,114 Has siniestradas.
- Para el año 1998, se presenta un número record de incendios con 405, los cuales dieron como resultado 198,808 Has dañadas, muchas de ellas en la reserva de la biósfera conocida como El Ocote, con pérdidas estimadas en 900 millones de dólares.
- Para el año 2004, los incendios afectan 5,447 Has.
- Para el año 2005, 23,508 Has son afectadas.
- Para el año 2006, los daños corresponden a 10,485.00 Has.

No se consideran otros eventos como los derivados de la contaminación por residuos sólidos, vertido de químicos en ríos, etc. No se ha relacionado por estar fuera del alcance de esta investigación lo correspondiente a riesgos derivados de fenómenos socio-organizativos, los cuales han detonado en costos directos, pero principalmente indirectos en la sociedad chiapaneca.

## Efectos económicos de los desastres en las zonas urbanas

Los efectos que puede causar un desastre varían dependiendo de las características propias de los elementos expuestos y de la naturaleza del evento mismo. En general pueden considerarse como elementos bajo riesgo: la población, el medio ambiente, y la estructura física representada por la vivienda, la industria y los servicios públicos [7].

Los efectos pueden clasificarse en pérdidas directas e indirectas. Las pérdidas directas están relacionadas con el daño físico, expresado en número de víctimas, en daños en la infraestructura de servicios públicos, daños en edificaciones, el espacio urbano, la industria, el comercio y el deterioro del medio ambiente, es decir, la alteración física del hábitat.

Las pérdidas indirectas generalmente pueden subdividirse en efectos sociales tales como la interrupción del transporte, de los servicios públicos, de los medios de información y la desfavorable imagen que pueda tomar una región respecto a otras; y en efectos económicos que representan la alteración del comercio y la industria como consecuencia de la baja en la producción, la desmotivación de la inversión y la generación de gastos de rehabilitación y reconstrucción.

La determinación de las pérdidas económicas, humanas, en tiempo de operación o incluso en prestigio de una empresa o institución que se ve imposibilitada para cumplir con sus compromisos es un proceso complejo que en ocasiones no se puede estimar adecuadamente, sino se tienen antecedentes del comportamiento anterior de la ciudad, de la estructura o elemento a analizar, previo al evento, como serían las pérdidas indirectas que se producen por la falla de un puente. Por ejemplo, los costos del retraso en la entrega de las mercancías, de que no puedan trasladarse a los enfermos rumbo al hospital o de los trabajadores a su empleo [11].

Debido a la recurrencia de diferentes tipos de desastres en varios de los países del continente americano, se han tenido pérdidas muy importantes con respecto a su PIB (Producto Interno Bruto), situación que se traduce en empobrecimiento de la población y estancamiento de su desarrollo, puesto que como consecuencia implica llevar a cabo gastos no previstos en la planeación anual que afectan la balanza de pagos y el desarrollo económico. Por lo cual, es urgente la inversión en el desarrollo de estudios aplicados que ayuden a mitigar las acciones de los desastres en los centros urbanos.

Como ejemplo podemos citar el caso de países como Guatemala, El Salvador, Nicaragua y México, que como se observa en la tabla 4, no obstante que el costo de algunos sismos ha sido mucho mayor en Estados Unidos o en Japón (desde 8 y hasta 130 mil de millones de dólares), el producto de estos daños no ha llegado al 2.5% del PIB, lo que hace que se recuperaran en corto plazo, en cambio en Nicaragua con el sismo de 1972 en Managua se presentaron pérdidas de 5 mil millones de dólares, estas correspondieron al 40% del PIB, lo cual representa uno de los factores que aún no permiten que el país se recupere económicamente del todo.

En México tras analizar los datos económicos del sismo de septiembre de 1985, de acuerdo con lo reportado por <sup>[4]</sup>, la pérdida de 4,100 millones de dólares (3,588.50 gastos directos y 515.50 gastos indirectos), significó el 2.70% del producto interno bruto de ese año; el 13.50% de la formación bruta de capital o el 11.0% del gasto total del Gobierno Federal.

Tuvo, además un efecto perceptible sobre las finanzas públicas y el sistema de intermediación financiera. Debido a que unas 150,000 personas quedaron temporalmente desempleadas, se estima que hubo una reducción de unos 84 millones de dólares de ingreso personal. El producto interno bruto que había crecido en 3.60% en 1984, redujo su ritmo a 2.70% en 1985 y presentó una contracción del 4.0% para 1986.

Tabla 4. Efecto de los sismos en la economía de distintos países desarrollados respecto a los efectos en países centroamericanos <sup>[13]</sup>

Año	Sismo	Magnitud	Costo en MMD	Porcentaje del PIB
1972	Managua, Nicaragua	6.2	5.0	40
1976	Guatemala, Guatemala	7.5	1.1	18
1980	Irpina, Italia	6.8	10.0	7
1985	Michoacán, México	8.0	5.0	2.7
1986	El Salvador, El Salvador	7.2	1.5	31
1989	Loma Prieta, California, EUA	6.9	8.0	0.2
1994	Northridge, California, EUA	6.7	30	1.0
1995	Kobe, Japón	6.8	180	2.5
1999	Armenia, Colombia	6.2	NR	1.5

De acuerdo con distintos autores los desastres naturales afectan a todo el planeta, pero Asia ha resultado el continente más afectado, África y América tienen un nivel de afectación intermedia y menos afectados han resultado Europa y Oceanía. Un dato preocupante es que el 60% de las muertes debido a estos fenómenos es en los países subdesarrollados. Sin embargo el dato más contundente es que la pérdida en promedio del PIB en los países subdesarrollados, tras un desastre similar, en los países desarrollados es de alrededor de 20 veces <sup>[9]</sup>.

Algunos otros ejemplos de los efectos de desastres naturales en el PIB de los países por fenómenos hidrometeorológicos son los mostrados en la tabla 5, los resultados de esta tabla van en la misma dirección de los mostrados en la tabla 4 que se concentraba en daños por sismo.

Tabla 5. Efecto de los sismos en la economía de distintos países desarrollados respecto a los efectos en países centroamericanos <sup>[9]</sup>

Año	Huracán	País	Porcentaje del PIB
1996	Mitch	Honduras	80.5
1997	George	República Dominicana	14
1998	Lluvias torrenciales	Ecuador	Tasa de crecimiento de 3.5% a 1%
2004	Katrina	Estados Unidos	1.7
2005	Stan	México	14

## Comentarios finales

No podemos dejar de trabajar en la protección civil, pero es más importante que concentremos la mayor parte de nuestros esfuerzos en investigar sobre el peligro y aplicar medidas para mitigar la vulnerabilidad.

Tabla 6. Grandes catástrofes desde 1950 y hasta 2005 <sup>[1]</sup>

Concepto	1950-1959	1960-1969	1970-1979	1980-1989	1990-1999	2000-2005
Número de eventos	21	27	47	63	91	57
Daños a la economía (MMUSD)	48.1	87.5	151.7	247	728.8	575.2
Daños asegurados (MMUSD)	1.6	7.1	14.6	29.9	137.7	176

Podemos afirmar que los fenómenos naturales serán más recurrentes cada día como lo muestra el trabajo de <sup>[1]</sup> de donde se extrae la tabla 6 que se muestra. Para el autor los elementos clave para disminuir el

riesgo son la investigación, la educación social y la prevención a través de disminuir la vulnerabilidad y la transferencia del riesgo (asegurar los bienes materiales).

Un claro efecto de la importancia de la transferencia del riesgo se manifestó con el impacto del huracán Stan en Chiapas y en Quintana Roo. Mientras en Cancún más del 90% de los daños debidos a costos directos estaban asegurados y pudieron repararse en un tiempo relativamente corto, en Tapachula este porcentaje no llegaba al 10%, por lo cual toda la reparación de daños se concentró en los gobiernos municipales, estatales y federales y aún no se logra volver a la normalidad a la ciudad.



## Bibliografía

1. Ágata, H. 2007. *El impacto financiero de los desastres naturales*. Simposio de Desastres Naturales Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, Ixtapan de la Sal, México.
2. Alarcón, P. 2005. *Comportamiento sísmico de estructuras de mamposterías*. Memorias en CD del curso corto regional sobre edificaciones de mampostería. Morelia, Michoacán, México.
3. *Atlas de riesgos del estado de Chiapas* 2003. Protección civil y Gobierno del Estado, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México.
4. Bitrán, D. 2001. *Características del impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en México en el período 1980 a 1999*. Serie Impacto Socioeconómico de los Desastres en México, CENAPRED, México, D.F.
5. Bitrán, D., L Domínguez, R. Duran, O. Fuentes, N. García, M. Jiménez, O. López, L. Matías, C. Reyes, M. Salas y O. Zepeda. 2006. *Impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en la República Mexicana en el año 2005*. Serie Impacto Socioeconómico de los Desastres en México, CENAPRED, México, D.F.
6. Bruneau, M., A., Whittaker, y A., Reinhorn. 2002. *Engineering and organizational issues related to the World trade center terrorist attack*. Volume 1: Overview of damage to buildings near ground zero, MCEER Special Report Series, March 2002, Buffalo, USA.

7. Cardona, O. 1993. *Mitigación de desastres en las instalaciones de la salud*. Volumen 4: Aspectos de ingeniería (Pan American Health Organization (PAHO) / Organización Panamericana de la Salud (OPS)), 1993, 87 pág.
8. Earthquake Engineering Research Institute. 2006. *Learning from earthquakes*. Learning from Earthquakes Program: A Brief Synopsis of Major Contributions. United States of America, 31 pág.
9. Estrada, A. 2008. *Papel de las instituciones de educación superior ante los desastres*. Foro de protección civil y desarrollo sustentable. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.
10. Gelman, O. 1999. *Desastres y su control: Una experiencia en desarrollo de la investigación interdisciplinaria*. Publicaciones de la UNAM, México, DF.
11. Kiremidjian, A., J. Moore, Y. Fan, A. Hortacsu, K. Burnell y J. Le-Grue. 2001. *Earthquake Risk Assessment for Transportation Systems: Analysis of Pre-Retrofitted System*, Pacific Earthquake Engineering Research Center, VOL. 4, No. 1, winter, USA.
12. Marín, R. 2007. *Características e impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en la República Mexicana en el año 2006*. Serie Impacto Socioeconómico de los Desastres en México, CENAPRED, México, D.F.
13. Miranda, E. 2008. *Diseño sísmico de edificios basado en desempeño*. XXXIII Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural, Santiago de Chile, Chile.
14. Sánchez, T. 2005. *Vulnerabilidad y riesgo de la vivienda en México*, Seminario Edificaciones de mampostería, abril, Morelia Michoacán, México.
15. Valdés, C. 2008. *Peligro sísmico en Chiapas*. Foro de protección civil y desarrollo sustentable. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.
16. Velázquez, A. y C. Rosales. 1999. *Escudriñando en los desastres a todas las escalas*. OSSO, ITDG y LA RED. [www.lared.org.pe](http://www.lared.org.pe).

## II. Importancia del estudio de los sismos en Chiapas

M. en C. Carlos Narcía López

### Introducción

Los sismos son fenómenos naturales que a través de los siglos han ocasionado una mezcla de curiosidad y temor en la humanidad. El misterio que envuelve al fenómeno sísmico ha permitido el desarrollo de la ciencia que se encarga actualmente de su estudio: la *Sismología*.

Entendida como la ciencia que estudia la generación, propagación y registro de ondas elásticas en la Tierra y otros cuerpos celestes, así como de las fuentes que las generan, la Sismología ha aportado un enorme bloque de información a las Ciencias de la Tierra.

El entendimiento del interior del planeta, la localización espacio-temporal de las fuentes sísmicas, la energía liberada en el proceso sísmico, los tipos de fuentes sismogénicas, la geometría de las fallas geológicas y las diferencias físicas entre corteza oceánica y continental son algunos ejemplos de los objetivos clásicos de la Sismología<sup>[4]</sup>.

Estos temas han sido de vital importancia para la comprensión integral del fenómeno sísmico y de sus consecuencias sociales e inclusive ambientales. Por decir, la cantidad de energía liberada por una fuente sísmica ubicada en una zona específica del planeta podría ocasionar daños a una comunidad ubicada en otra zona con características locales del suelo tales que intensifiquen los movimientos del mismo. En este escenario, esa comunidad tendría un nivel de peligro asociado con la energía liberada y con la intensificación local del movimiento del suelo y sí, además de esto,

los sistemas (ejemplo infraestructura) desarrollados en la comunidad fueran vulnerables ante los movimientos intensificados del suelo, el nivel de riesgo sísmico de la zona sería, sin duda, muy alto.

Ejemplo de lo anterior fue el sismo de magnitud  $8.1 M_w$  que se generó el 19 de Septiembre de 1985 enfrente de las costas de Michoacán y Guerrero, ubicado en  $17.6^\circ N$  y  $102.5^\circ O$ , según el Servicio Sismológico Nacional<sup>[16]</sup> (SSN), a 28 km de profundidad, alrededor de las 7:18 hrs (tiempo local). Este evento, aunque generado en las costas del Pacífico mexicano, tuvo consecuencias lamentables en algunas zonas del Distrito Federal.

El SSN reporta que el evento generó un tsunami con altura máxima de ola de aproximadamente dos metros en las costas de Michoacán, el primero registrado en México. Además de esto, y de los pocos daños ocasionados en la zona epicentral, en algunas zonas del Distrito Federal se reportaron intensidades de IX y los daños se concentraron en una zona no mayor de  $25 \text{ km}^2$ , abatiendo en la zona a poco más de 350 edificios modernos de 6 a 15 pisos<sup>[16]</sup>.

El concepto de peligro, peligrosidad o amenaza se refiere a la probabilidad de que en cierto instante espacio-temporal suceda un determinado fenómeno con ciertas características. De esta manera, el peligro sísmico al que está sometida una región del planeta queda definido como la probabilidad de que se observe cierta intensidad relacionada con la generación de un evento sísmico de magnitud determinada en un momento específico.

Aunque la tendencia actual de visualizar el peligro sísmico de una región es meramente estocástica, un aspecto inherente es el comportamiento físico de los medios terrestres que interactúan en el fenómeno. Por esta razón, el conocimiento de las propiedades físicas de los mismos, que permita modelar la sismotectónica regional, es de mucha ayuda. De cualquier manera resulta obvio que el estudio del peligro sísmico en una región se torna un trabajo que requiere de un enorme historial de registros sismológicos, que permitan la estimación de periodos de recurrencia. A mayor cantidad de información, mayor precisión en los resultados obtenidos.

Aún cuando existen testimonios de las observaciones hechas al fenómeno sísmico en el México precolombino (figura 1), por los antiguos pobladores del centro del país; así como descripciones de algunos sismos, por los frailes del México colonial y reportes, posteriores, de datos descriptivos del fenómeno en periódicos (y posteriormente mediante la red telegráfica nacional); el registro instrumental formal de sismos inició a finales del siglo XIX.



Figura 1. Ollin, Divinidad de la Cultura Azteca que representaba al movimiento. Imagen tomada de <sup>[8]</sup>.

El primer instrumento de registro sísmico instalado en territorio nacional fue un sismógrafo tipo *Cecchi*, ubicado en la azotea del Palacio nacional y perteneciente al entonces recién creado Observatorio Meteorológico y Astronómico de México. Este observatorio fue fundado en 1877 bajo el gobierno de Porfirio Díaz, en las celebraciones del primer centenario del inicio de la Independencia de México.

Posterior a esto y como consecuencia de los acuerdos tomados en la reunión de Estrasburgo del 1º de Abril de 1904, en la que se reunieron dieciocho países (entre ellos México) para formar la Asociación Sismológica Internacional, en el país se pretendían instalar sesenta estaciones sismológicas. Por los percances socio-económicos derivados de la Revolución Mexicana, solo fueron instaladas nueve estaciones que usaban sismógrafos tipo *Wiechert*.

Actualmente, en México existen varias estaciones de monitoreo sísmico, la mayoría de ellas opera en diferentes redes. El SSN opera la Red de Banda Ancha (RBA), con 36 estaciones; la Red del Valle de México (RVM), con 12 estaciones y la Red Sismológica Convencional (RSC), formada de 9 estaciones; haciendo un total aproximado de 56 equipos para el registro de los sismos <sup>[16]</sup> (figura 2).



Figura 2. Ubicación de las estaciones de la Red de Banda Ancha del SSN. <sup>[16]</sup>

Al norte del país, el Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada (CICESE), opera la Red Sísmica del Noroeste de México (RESNOM), encargada del monitoreo de toda la sismicidad de la región norte de Baja California y oeste de Sonora <sup>[10]</sup>. Hasta esta fecha, RESNOM cuenta con 17 estaciones que cubren los objetivos de la red (figura 3). Otra red operada por CICESE es NARS-Baja, en colaboración con las universidades de Utrecht y Caltech. Además de estas redes existen otras más que operan en diferentes universidades o centros de investigación dentro del país.

Un claro ejemplo de lo anterior es la Red Interuniversitaria de Ingeniería Sísmica (RIIS), aunque su mayor enfoque es cumplir con objetivos de ingeniería, a esta red pertenecen algunas universidades del centro y sur de México y es operada por el Grupo Interuniversitario de Ingeniería Sísmica (GIIS).



Figura 3. Estaciones de RESNOM, operadas por CICESE. Con esta red se registra toda la sismicidad regional. Imagen tomada de [10].

El 20 de Octubre de 1995, alrededor de las 20:39 hrs (local), sacudió a Chiapas un sismo reportado por el Servicio Geológico de Estados Unidos<sup>[18]</sup> (USGS) con magnitud 6.2  $m_b$  y ubicado en 16.89° N y 93.45° O, a una profundidad de 161 Km. Este sismo ha sido uno de los más importantes en los últimos años, debido a la cantidad de daños que generó en muchas viviendas de diferentes comunidades localizadas en torno al epicentro y representa una muestra regional del potencial de daño a la sociedad que estos fenómenos pueden llegar a tener.

En este capítulo se pretende transmitir al lector la importancia del estudio del fenómeno sísmológico en Chiapas, como herramienta fundamental en la investigación del peligro sísmico regional. Para entender los conceptos que se abordan, el lector no necesita contar con conocimientos especializados en el área de sísmología y las ecuaciones que se tratan son simples. Las imágenes desarrolladas por el autor se hicieron en ambiente *Matlab*<sup>[5]</sup>.

## Magnitud e intensidad sísmica

Es común la confusión debida a los términos de *Magnitud* e *Intensidad* sísmicas. Sin embargo son conceptos diferentes y conviene enfatizar en ello.

Los sismos se generan por perturbaciones que se originan en alguna zona del planeta. Placas tectónicas que están en continua fricción unas con otras, o que se rompen en el interior del planeta, cuerpos ascendentes de magma dentro de volcanes, fallas geológicas que se activan, meteoritos que entran a la atmósfera y se impactan con la Tierra y eventos antropogénicos (ejemplo explosiones) son ejemplos de la diversidad de procesos que pueden producir sismos.

Cuando se genera un sismo, se libera cierta cantidad de energía que es responsable de los movimientos ondulatorios que se originan. La magnitud sísmica es una medida relacionada con esta energía.

La mayoría de las escalas de magnitud se basan en mediciones hechas a amplitudes de ciertas fases (ondas) sísmicas registradas en un sismograma (figura 5). La forma general de todas las escalas de magnitud está dada por <sup>[4]</sup>:

$$M = \log_{10} \left( \frac{A}{T} \right) + f(\Delta, h) + C_s + C_r \quad (1)$$

En donde  $A$  es el desplazamiento del terreno de la onda (o fase) sísmica que se usa en la escala,  $T$  es el periodo de la misma,  $f$  es una función de corrección para la distancia epicentral ( $D$ ) y la profundidad focal ( $h$ ).  $C_s$  es la corrección del sitio (e.g., el tipo de suelo o roca en el que se ubica la estación) y  $C_r$  es una corrección dependiente de la región y asociada a la fuente sísmica.

La escala de magnitud más conocida es la escala de Richter (Charles), quien en 1935 ideó una manera de medir el tamaño de los sismos locales ( $M_L$ ) en California, asociada a la energía liberada en el proceso. La ecuación usada por Richter en California y usando un sismómetro de tipo *Wood-Anderson* es<sup>[4]</sup>:

$$M_L = \log_{10} (A) + 3 \log_{10} (8\Delta r) - 2.9 \quad (2)$$

Que de alguna manera corresponde a los tres primeros términos de (1) y se observa que el término  $C_r$  está ausente, ya que (2) es la ecuación desarrollada originalmente para medir sismos locales de California únicamente (la falla de San Andrés genera eventos sísmicos someros, figu-

ra 4). Cualquier estimación de la magnitud de sismos en otras partes del mundo, con diferentes tipos de fuente, ubicadas a profundidades mayores, requiere de las correcciones por región y profundidad.

Además de  $M_L$  existen otras escalas que, como se mencionó anteriormente, dependen del tipo de onda que se mida. Si las ondas son de cuerpo (generalmente ondas P, figura 5) la magnitud se denomina  $m_b$  y si se usan ondas superficiales (generalmente ondas Rayleigh, figura 5), esta será  $M_s$ .



Figura 4.- Imagen de la falla de San Andrés, que divide las placas del Pacífico y Norteamérica. Los sismos producidos por este límite tectónico son someros. Imagen tomada de [15].

Además de estos tres tipos de escalas, existe otra manera más formal para medir la energía asociada a un evento sísmico y se conoce como magnitud de momento sísmico ( $M_w$ ), que representa físicamente una de las escalas más confiables, ya que usa el concepto de momento sísmico que involucra las fuerzas y desplazamientos de ruptura de la zona sismogénica. De esta manera la magnitud de momento sísmico estaría dada por:

$$M_w = \left( \frac{\log(M_0)}{1.5} \right) - 10.73 \quad (3)$$

Donde  $M_0$  es el momento sísmico asociado al evento y puede entenderse de manera simple como:

$$M_0 = \mu \cdot s \cdot d \quad (4)$$

Siendo  $\mu$  el módulo de rigidez de la roca,  $s$  el área de la falla y  $d$  el deslizamiento presentado.

Una expresión importante que relaciona la magnitud ( $M_s$ ) con la energía liberada ( $E$ ) es la encontrada por Richter y Gutenberg<sup>[4]</sup>:

$$\log_{10} E = 1.8 + 1.5M_s \quad (5)$$

A nivel mundial, en el siglo XX se registraron cincuenta y cinco sismos con  $M_s$  mayor o igual a 8.0<sup>[4]</sup>. De estos destacan los eventos del 4 de Noviembre de 1952 en la región de Kamchatka (Rusia) con 9.0  $M_w$ , del 22 de Mayo de 1960 en la región Valdivia (Chile) con 9.5  $M_w$  y del 28 de Marzo de 1964 en la región de Alaska (Estados Unidos) con 9.2  $M_w$ . No se tienen registros de un sismo mayor al de Chile de 1960, que se asoció a un desplazamiento de 20 m en una falla de 1000 m de largo. El evento de Sumatra, ocurrido el 26 de Diciembre de 2004 y origen del Tsunami más famoso de los últimos años, fue asociado a una magnitud de 9.0  $M_w$ .

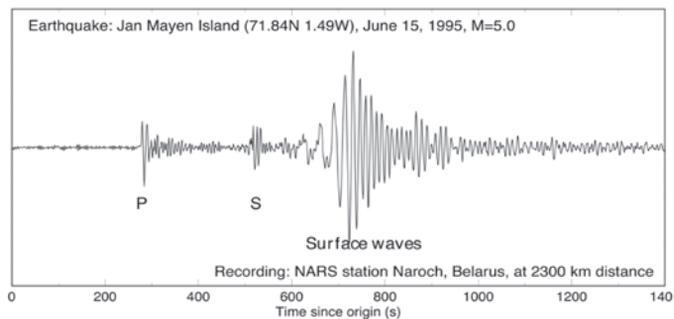


Figura 5. Sismograma típico y ondas principales. Se muestran las ondas P, S y superficiales. El registro corresponde al sismo de 15 de Junio de 1995, ocurrido en las islas Jan Mayen. Imagen tomada de <sup>[9]</sup>.

Es importante señalar que un grado de magnitud de diferencia entre dos sismos implica una diferencia aproximada de 32 veces en cantidad de energía liberada<sup>[2]</sup>. Es decir que un sismo de magnitud 8 equivale aproximadamente a 32 sismos de magnitud 7, a 1000 sismos de magnitud 6, a 32000 sismos de magnitud 5 y a 1000000 de sismos de magnitud 4 (y no a dos). Esto se debe a la naturaleza logarítmica de las escalas y la relación puede encontrarse usando la ecuación (5).

Hablar de intensidad sísmica es referirse a los efectos que un sismo de magnitud determinada causa en la superficie terrestre, es decir la manera en que el evento se presenta en diferentes zonas. Estas diferencias se asocian principalmente al efecto de sitio del lugar, lo que se entiende como el comportamiento de las capas someras del suelo ante la incidencia de energía sísmica; aunque el efecto de las edificaciones y los medios del interior de la Tierra durante la trayectoria de la energía también influyen.



Figura 6. El sismo de Chile de 1960, en la región de Valdivia. Imágenes tomada de <sup>[12]</sup>.

La escala más usada en occidente para medir la intensidad de un sismo es la de Mercalli (Giuseppe), quién perfeccionó la escala original

*Rossi-Forel* (desarrollada entre 1880 y 1883). La versión usada en nuestros días es la modificada en 1931 por Harry O. Wood y Frank Neuman <sup>[1.16]</sup>.

Según esta escala, un sismo con nivel I de intensidad es aquel que es sentido por pocas personas y en condiciones de perceptibilidad favorables, mientras que un sismo con nivel XII, el mayor grado de la escala, causa un daño casi total, se desplazan grandes masas de roca, los objetos saltan al aire y los niveles y perspectivas quedan distorsionados. En la tabla 1 se presenta la escala de Mercalli modificada completa.

Un ejemplo claro de la diferencia entre los conceptos de magnitud e intensidad es, nuevamente, el mayor sismo de septiembre de 1985. Este evento se originó en las costas de Michoacán con magnitud de 8.1  $M_{w}$ ; sin embargo, presentó diferentes intensidades en la región, afectando especialmente a una zona de la Ciudad de México, en donde se presentaron los mayores daños a edificios de mediana altura. Como se mencionó anteriormente, fueron las condiciones especiales del suelo de esa zona de la ciudad el principal factor para incrementar la intensidad. Generalmente las mayores intensidades están asociadas a la zona epicentral (figura 8) y existe una disminución hacia fuera del epicentro (figura 7), a menos que existan zonas con condiciones especiales (efecto de sitio) que intensifiquen los movimientos.

La escala de Mercalli es una escala subjetiva que manifiesta la percepción humana del movimiento del terreno, por lo que su uso debe hacerse con precaución. Sin embargo es posible relacionar la intensidad del movimiento con las aceleraciones, velocidades o desplazamientos presentadas en el suelo, de manera que la subjetividad de la percepción humana sea mínima. En mi opinión la caracterización de las aceleraciones del terreno durante un sismo representa la mejor manera de evaluar la intensidad del mismo, aunque es evidente que para esto es necesario contar con redes que monitoreen la zona en estudio, lo que a veces requiere de grandes esfuerzos.

Tabla 1. Escala de Mercalli modificada en 1931 por Harry O. Wood y Frank Neuman. Se muestran los doce niveles de la escala, con su descripción correspondiente. Basada en la publicada por <sup>[1]</sup>.

I	Sentido por muy pocas personas en condiciones especialmente favorables.
II	Sentido sólo por pocas personas en reposo, especialmente en los pisos altos de los edificios. Los objetos suspendidos pueden oscilar.
III	Sentido claramente en los interiores, especialmente en los pisos altos de los edificios, muchas personas no lo asocian con un sismo. Los vehículos de motor estacionados pueden moverse ligeramente. Vibración como la originada por el paso de un vehículo pesado. Duración estimable.
IV	Sentido durante el día por muchas personas en los interiores, por pocas en el exterior. Por la noche, algunas despiertan. Vibración de vajillas, vidrios de ventanas y puertas; los muros crujen. Sensación como la de un vehículo pesado chocando con el edificio, los vehículos de motor estacionados se balancean claramente.
V	Sentido casi por todos; muchos despiertan. Algunas piezas de vajillas, vidrios de ventanas, etcétera, se rompen; pocos casos de agrietamiento de aplanados; caen objetos inestables. Se observan perturbaciones en los árboles, postes y otros objetos altos. Se detienen los relojes de péndulo.
VI	Sentido por todos; muchas personas atemorizadas huyen hacia espacios abiertos. Algunos muebles pesados cambian de sitio; pocos ejemplos de caída de aplanados o daño en chimeneas. Daños ligeros.
VII	Advertido por todos. La gente huye al exterior. Daños sin importancia en edificios de buen diseño y construcción. Daños ligeros en estructuras ordinarias bien construidas; daños considerables en construcciones débiles o mal diseñadas; ruptura de algunas chimeneas. Percibido por las personas conduciendo vehículos en movimiento.
VIII	Daños ligeros en estructuras de diseño especialmente bueno, considerables en edificios ordinarios con derrumbe parcial y grandes en estructuras débilmente construidas. Los muros salen de sus armaduras. Caída de chimeneas, pilas de productos en los almacenes de las fábricas, columnas, monumentos y muros. Los muebles pesados se vuelcan. Arena y lodo proyectados en pequeñas cantidades. Cambio en el nivel del agua de los pozos. Pérdida de control en las personas que guían carros de motor.
IX	Daño considerable en las estructuras de diseño bueno; las armaduras de las estructuras bien planeadas se desploman; grandes daños en los edificios sólidos, con derrumbe parcial. Los edificios salen de sus cimientos. El terreno se agrieta notablemente. Las tuberías subterráneas se rompen.
X	Destrucción de algunas estructuras de madera bien construidas; la mayor parte de las estructuras de mampostería y armaduras se destruyen desde sus cimientos; agrietamiento notable del terreno. Las vías de los ferrocarriles se tuercen. Considerables deslizamientos en las márgenes de los ríos y pendientes fuertes. Invasión del agua de los ríos sobre sus márgenes.
XI	Casi ninguna estructura de mampostería queda en pie. Puentes destruidos. Anchas grietas en el terreno. Las tuberías subterráneas quedan fuera de servicio. Hundimiento y derrumbes en terreno suave. Gran torsión de vías férreas.
XII	Destrucción total. Ondas visibles sobre el terreno. Perturbaciones de las cotas de nivel. Objetos lanzados al aire hacia arriba.

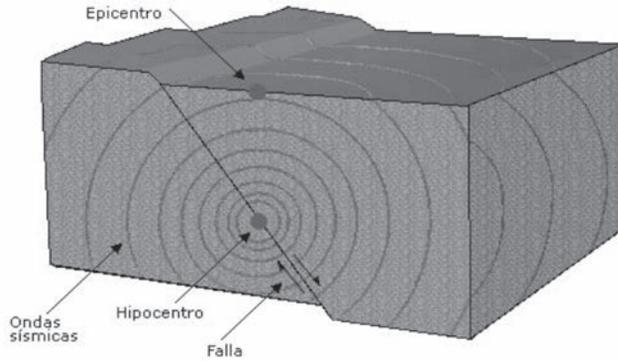


Figura 7. El hipocentro es la zona en donde se originan los sismos y el epicentro es su proyección en la superficie terrestre. Imagen tomada de [13].

Tabla 2. Comparación de escalas de intensidad sísmica y sus probables aceleraciones máximas.

Mercalli modificada		Japonesa	
Grado	Aceleración (Gal)	Grado	Aceleración (Gal)
I - II	1	I	0.8-2.5
III	1.6	II	2.5-8.0
IV	3	III	8.0-25
V	10	IV	25-80
VI	30	V	80-250
VII	80	VI	250-400
VIII	170	VII	>400
IX	300		
X	400		
XI	500		
XII	>500		

En Japón se usa otra escala de intensidades desarrollada por la Agencia Meteorológica Japonesa, que consta de siete niveles<sup>[7]</sup>. En la tabla 2 se muestran las dos escalas con las aceleraciones máximas probables relacionadas a cada nivel. La unidad de aceleración es el *Gal* (en honor a Galileo Galilei), que equivale a  $1 \text{ cm/s}^2$ .

Para visualizar las variaciones espaciales de las intensidades asociadas a un mismo evento de magnitud específica, se hace uso de mapas de isosistas, que son curvas que representan una misma intensidad en la superficie terrestre (figura 8), de esta forma es posible observar las variaciones de la intensidad sísmica en una región determinada.

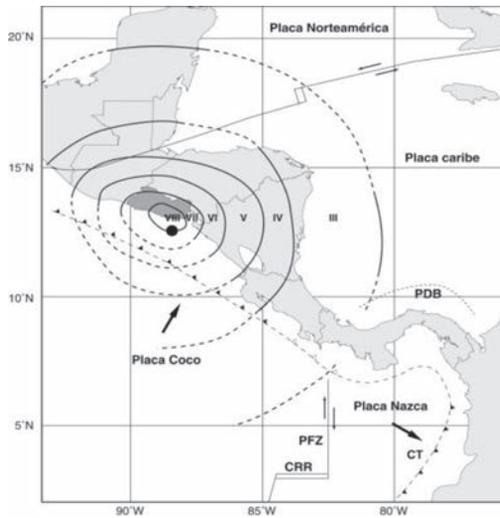


Figura 8. Isosistas del sismo del 13 de enero de 2001 en Centroamérica. La zona epicentral presenta la mayor intensidad (VIII). Imagen tomada de <sup>[14]</sup>.

### Sismicidad regional

Por la cantidad de energía que liberan, los sismos de origen tectónico son los de mayor importancia. El origen de los movimientos tectónicos (e indirectamente el de los volcánicos) tiene su explicación, actualmente, en la dinámica de los procesos internos de la Tierra. Una de las hipótesis aceptadas explica que los materiales más profundos del

manto superior se calientan (el centro de la Tierra se encuentra aproximadamente a  $5000^{\circ}\text{C}$ ) y pierden densidad, por lo que tienden a subir, generando lo que se conoce como celdas convectivas (figura 9). Este proceso es análogo al observado en un recipiente de agua en ebullición.

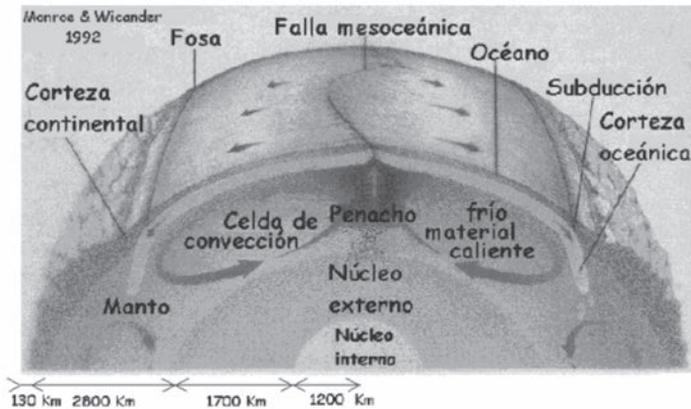


Figura9. Tectónica de placas como consecuencia de las celdas convectivas del manto superior. Las flechas esquematizan la dinámica de los materiales. Imagen tomada de [1].

Los movimientos del manto, que son demasiado lentos para nuestra percepción del tiempo, se transmiten a la base de la litósfera, que está fracturada y formada por varios bloques. Con el paso del tiempo, la litósfera va acumulando energía en diversas zonas y generalmente los bordes de sus piezas (placas tectónicas) alcanzan niveles de esfuerzos mayores a la resistencia de la roca. Como consecuencia, existe una liberación de esfuerzos expresada como desplazamientos repentinos que hacen vibrar a las rocas y se producen los sismos.

En el sureste de México interactúan tres placas tectónicas conocidas: Cocos, Norteamérica y Caribe (figura 10). La interacción de estas tres placas hacen del estado de Chiapas una región con alta actividad sísmica.

En la parte sureste de la zona, la placa de Cocos se acomoda por debajo de las placas de Norteamérica y del Caribe, en un proceso denominado *subducción*. La velocidad de subducción de la zona se estima en  $75\text{ mm/año}$  y el proceso se inicia en el rasgo tectónico conocido como Trinchera Mesoamericana, que se extiende paralelamente a las costas

del Pacífico mexicano y centroamericano por más de 3000 km. Frente a las costas de Chiapas, la trinchera alcanza profundidades aproximadas a 5500 m por debajo del nivel medio del mar<sup>[6]</sup>. Este proceso produce gran cantidad de sismos y es la causa de los eventos sísmicos más grandes registrados en el sur de México.

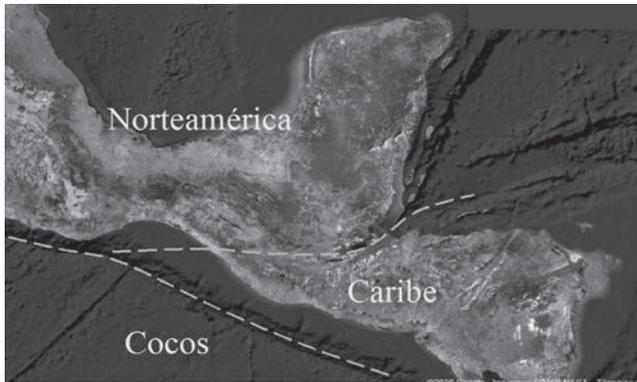


Figura 10. Interacción de placas tectónicas en el Sureste de México. La placa de Cocos subduce a las otras dos y el movimiento entre las placas de Norteamérica y Caribe es de tipo lateral izquierdo.

El movimiento relativo entre las placas de Norteamérica y del Caribe se ha entendido como un sistema de fallas deslizantes de tipo lateral izquierdo, que incluye a las fallas Motagua, Polochic y Jocotán-Chamelecón<sup>[6]</sup>.

Un rasgo tectónico interesante es la morfología de la placa de Cocos por debajo de la litósfera continental. Según algunos estudios, existe una variación lateral en el ángulo de subducción (con respecto a la horizontal) de la placa de Cocos: de 25° para la zona de Oaxaca hasta 40° para la región de Chiapas. Este ángulo se hace aún más grande conforme se avanza hacia Centroamérica y es el responsable de las profundidades observadas en muchos sismos de la región, de hasta 300 km.

Los sismos que se generan a poca profundidad (aproximadamente hasta 40 km), generalmente son producto de la interacción entre las placas y se conocen como sismos *interplaca*. Por otro lado, los sismos generados a profundidades mayores, generalmente se deben al rompi-

miento de la placa que subduce y se conocen como de tipo *intraplaca*. También existe actividad sísmica, aunque con menor liberación de energía, producida por la actividad de las fallas geológicas de la región y por la actividad volcánica. Toda la actividad se relaciona, directa o indirectamente, con el marco tectónico regional.

El grupo IRIS<sup>[7]</sup> (*Incorporated Research Institutions for Seismology*) es una sociedad que reporta la sismicidad de diferentes catálogos sísmicos del planeta. Del catálogo del Centro Internacional de Sismología (ISCCD) se tienen reportados 529 sismos (con magnitud de tipo  $M_s$ ) ocurridos en la región, entre las longitudes  $90^\circ$  y  $95^\circ$  O y latitudes  $13.5^\circ$  y  $19^\circ$  N, desde enero de 1978 hasta junio de 2006.

Las magnitudes mínima y máxima reportadas en ese catálogo varían desde 2.8 hasta 6.8  $M_s$ , casi 350 fuentes fueron localizadas en los primeros 25 km y la magnitud media para la región es de 4.1. Aún cuando el esfuerzo por contar con una base internacional de datos es notable, la información que se tiene está sujeta a la disposición colaborativa de los servicios sismológicos regionales.

Si analizamos la información reportada por el SSN, únicamente en el periodo de enero de 1998 a junio de 2008 reporta 2307 eventos en la misma región. En la figura 11 se muestra esta sismicidad.

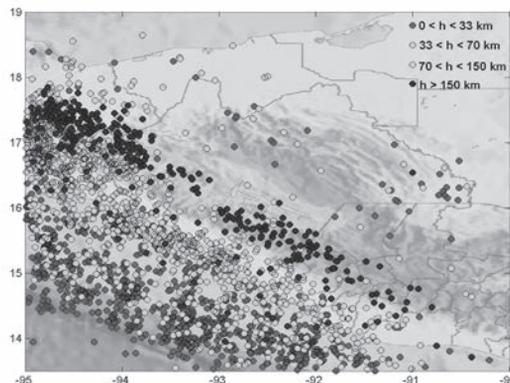


Figura 11. Sismicidad reportada por el SSN, en el periodo de enero de 1998 a junio de 2008. Se indican rangos de profundidad. Nótese el aumento de profundidades, debido a la subducción, desde la Trinchera Mesoamericana hacia dentro del continente.

En cuanto a la profundidad de los eventos reportados, 1027 sismos (44.5%) se originaron en los primeros 25 km de profundidad, lo que implica que más, o al menos, la mitad de los sismos ocurridos en la región se originan en profundidades correspondientes al manto superior.

La magnitud mínima reportada por el SSN es de 2.4 y la máxima es de 6.7. La magnitud media es de 4.2, valor bastante aproximado al observado en el ISCCD y que corresponde a la magnitud más esperada en la región (figura 12).

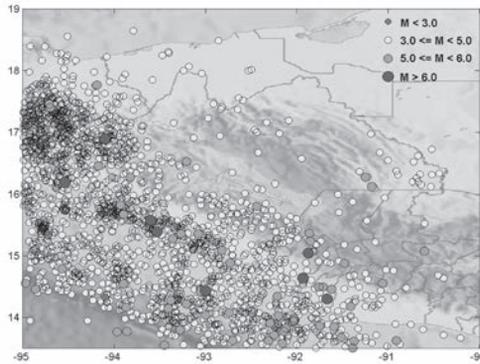


Figura 12. Variaciones espaciales de diferentes rangos de magnitudes. La magnitud esperada aproximada es de 4.2, según el catálogo del SSN. La predominancia de eventos con magnitudes entre 3.0 y 5.0 es evidente.

## Mayor sismo en Chiapas

Podría pensarse que, debido a que la magnitud esperada en la región es aproximadamente de 4.2, no sucederá un evento de magnitud mayor. En el apéndice A del libro *Sismicidad en Chiapas*<sup>[3]</sup>, se reportan 267 sismos de magnitud mayor a 4.0, que afectaron a la región en el periodo de 1729 a 1973.

Aproximadamente el 12% de los eventos reportados en ese listado (31 sismos) presentan magnitudes mayores o iguales a 7.0, siendo el evento más importante el ocurrido el 23 de septiembre de 1902, ya que es asociado a una magnitud de 7.8 y presentó intensidades desde VI hasta X en todo el Estado.

Por la cantidad de energía liberada y por los daños causados a las comunidades chiapanecas, de todos los sismos reportados en la historia reciente de la región, este sismo ha sido el más importante originado en la región de Chiapas. A la fecha no se ha reportado algún otro sismo que supere la energía asociada a ese evento, lo que no implica que no haya sucedido.

Como dato interesante se transcribe un párrafo del libro citado, en el que se describen los efectos del evento:

*“Este macrosismo es el más importante originado en Chiapas. Fue destructor en San Bartolomé de los Llanos (hoy Venustiano Carranza). Los daños fueron fuertes en San Cristóbal Las Casas, Chiapa de Corzo, Tuxtla Gutiérrez etcétera. Según isosistas, grados VI a X en el estado. Sentido en la Ciudad de México con intensidad de IV”* [3].

Cabe mencionar que la escala de intensidades a la que se refiere es la de Rossi-Forel, vigente en esas fechas. En la figura 13 se muestra el mapa de isosistas derivado del sismo del 23 de septiembre de 1902, tomado del mismo libro y que ubica el epicentro cerca del poblado Venustiano Carranza.



Figura 13. Mapa de isosistas del evento del 23 de septiembre de 1902. el epicentro se localiza cerca del poblado Venustiano Carranza. Imagen tomada de [3].

## Peligro sísmico

Uno de los grandes trabajos colaborativos de los sismólogos del mundo ha sido cuantificar el número de eventos sísmicos que suceden en toda la Tierra y clasificarlos de diversas maneras. De esta forma es posible saber las características que predominan en una región sísmica. De este esfuerzo se sabe el número promedio de sismos, de cada magnitud, que ocurren a nivel mundial (figura 14).

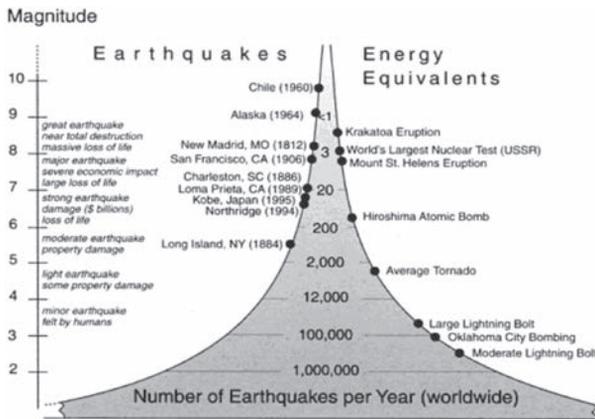


Figura 14. Promedio anual de sismos en el mundo y su comparación con otros eventos energéticos. La bomba atómica de Hiroshima liberó una cantidad de energía equivalente a la del sismo de Chiapas del 20 de Octubre de 1995.

Charles Richter y Beno Gutenberg son reconocidos como los primeros sismólogos que establecieron las relaciones existentes entre el número de sismos y su magnitud; sin embargo, de manera independiente, Ishimoto e Ida también descubrieron en la misma época, a principios de la década de 1940, que el número de sismos en una región determinada decrece exponencialmente conforme aumenta su magnitud. Esta relación puede expresarse de la siguiente manera:

$$\log_{10} N = a - bM_s \quad (6)$$

En donde  $N$  es el número de sismos con magnitudes en un rango centrado en  $M_s$ , y  $a$  y  $b$  son constantes. La misma expresión puede escribirse en función del momento sísmico  $M_0$ :

$$N = kM_0^{-\left(\frac{2b}{3}\right)} \quad (7)$$

En la que  $k$  es una constante.

En este sentido, merece mención especial el trabajo desarrollado por Vit Karnik, quien estudió el comportamiento sísmico en toda Europa, obteniendo las relaciones mostradas en la tabla 3<sup>[7]</sup>.

Tabla 3. Expresiones de frecuencias de ocurrencia, o número de sismos  $N$  de magnitud  $M$ , en determinado intervalo de tiempo, para Europa; propuestas por Vit Karnik.

Región	Frecuencia de ocurrencia
Región del Mediterráneo	$\log_{10} N = 7.39 - 0.49M$
Región del Atlántico Norte	$\log_{10} N = 4.97 - 0.70M$

Finalmente, la probabilidad de ocurrencia de  $r$  sismos por año, en cierta región del planeta, si asumimos que  $r$  es una variable aleatoria *Poissoniana*, es:

$$p_r = \frac{n^r e^{-n}}{r!} \quad (8)$$

En donde  $n$  es el número de sismos por año. En un periodo de  $T$  años, la expresión anterior se modifica a:

$$p_{r[T]} = \frac{(nT)^r e^{-(nT)}}{r!} \quad (9)$$

En la actualidad se han desarrollado varios modelos para evaluar las probabilidades de ocurrencia de eventos sísmicos en diversas regiones del planeta. En estos trabajos se toman en cuenta, por ejemplo, las se-

cuencias de réplicas sísmicas o el uso de estadísticas *Bayesianas*. A la fecha, en la región de Chiapas no existen estudios formales que expongan la distribución del peligro sísmico en el estado; aunque han habido intentos por zonificar el peligro en la región con poca validez científica.

Con la finalidad de aportar datos para el conocimiento del nivel del riesgo sísmico y contar con más información de los sismos generados en la región, en la Escuela de Ingeniería Ambiental de la UNICACH opera un acelerómetro que está instalado en la planta baja del edificio 10 de Ciudad Universitaria, en el laboratorio de la Escuela.

El equipo en un inicio se utilizó para realizar un estudio de vibración ambiental en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez y consta de una digitalizadora K2 y un sensor triaxial de aceleración, *epi*sensor, de *Kinematics* (figura 15). Este sistema ha operado de manera permanente desde inicios de 2008 y lleva treinta eventos detectados, hasta finales de Julio del mismo año. En la figura 15 se muestra el registro del evento ocurrido el 12 de Febrero de 2008, que en el primer semestre del año es el sismo regional de mayor magnitud registrado en la estación ( $M=6.6$ ).

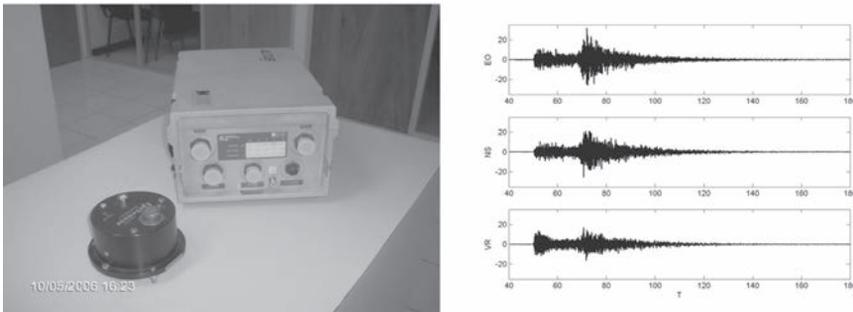


Figura 15. Equipo acelerométrico ubicado en la Escuela de Ingeniería Ambiental. Se trata del evento con mayor magnitud ( $M=6.6$ ) ocurrido en los primeros seis meses de 2008. La aceleración máxima registrada en la zona fue de 31.7 gals.

## Comentarios finales

Los sismos son fenómenos naturales que tienen un alto grado de impacto social en el sureste de México y su estudio debe visualizarse como

una prioridad en el desarrollo regional. La región sureste del país es una de las zonas que mas energía sísmica libera en México y su potencial sísmico es importante.

Dentro del mismo contexto, es necesario desarrollar más estudios que nos permitan conocer mejor las propiedades sísmicas de la corteza y manto superior, como velocidades de propagación de ondas, espesores de los medios, factores de calidad de atenuación, coeficientes de dispersión geométrica, efecto de sitio en zonas pobladas, etcétera. Esta es la única manera para desarrollar modelos confiables que ayuden a conocer el fenómeno sismológico en el sureste de México, con mayor detalle.

## Bibliografía

1. Espíndola, J.M. y Z. Jiménez. 2001. *Terremotos y ondas sísmicas, una breve introducción*. Cuadernos del Instituto de Geofísica. UNAM. México.
2. CENAPRED. 2001. Diagnóstico de peligros e identificación de riesgos de desastres en México. Atlas nacional de riesgos. SEGOB. México.
3. Figueroa A., J. 1974. *Sismicidad en Chiapas*. Facultad de Ingeniería. UNAM. México.
4. Lay, T. y T. C. Wallace. 1995. *Modern Global Seismology*. Academic Press San Diego. USA.
5. Nakamura, S. 1997. Análisis numérico y visualización gráfica con Matlab. Prentice Hall Latinoamérica. México.
6. Narcía-López, C. 2002. *Espesores de la corteza en Chiapas, usando ondas directas y convertidas*. Tesis de Maestría, División de Ciencias de la Tierra. CICESE. México.
7. Solnes, J. 1992. *Theory of stochastic processes and random vibration, with applications in Geophysics and Engineering*. Instituto de Geofísica. UNAM. México.
8. <http://astro.virginia.edu/>

9. <http://cosmos.ucdavis.edu/>
10. <http://www.cicese.mx/>
11. <http://www.cielosur.com/>
12. <http://www.dgf.uchile.cl/>
13. <http://www.proyectogeo.com/>
14. <http://www.scielo.org.ve/>
15. <http://www.scienceclarified.com/>
16. <http://www.ssn.unam.mx/>
17. <http://www.iris.edu/>
18. <http://www.usgs.gov/>

### III. Vulnerabilidad de los bosques templados bajo manejo silvícola

Biól. Rodolfo Palacios Silva

#### Importancia biológica y ecológica de los bosques

Los ecosistemas arbolados del mundo son conocidos con el término general de bosques. Los bosques pueden ser definidos más apropiadamente como un conjunto de árboles con una extensión y densidad suficientes para producir a un nivel local una serie de condiciones climáticas y ecológicas, con cambios significativos en temperatura, humedad, luz, viento, flora, fauna y en las características de las capas superiores del suelo<sup>1</sup>.

El área que ocupan los bosques en el mundo es de aproximadamente 4 mil millones de hectáreas, lo que representa el 30% de la superficie terrestre (figura 1)<sup>2</sup>. En México existe una gran diversidad de ecosistemas boscosos que pueden ser agrupados en dos grandes categorías: bosques tropicales (selvas) y bosques templados (bosque de pino y/o encino). Los bosques en México tienen una superficie estimada en 65 millones de hectáreas (31 millones de hectáreas de bosque tropical y 34 millones de hectáreas de bosque templado), una tercera parte del territorio nacional<sup>3</sup>.

Los bosques de México son muy importantes por su significado biológico ya que contienen el 10% de las especies de vertebrados terrestres y plantas del planeta<sup>4</sup>, a pesar de que representan sólo el 1.6 % de la extensión mundial de los ecosistemas boscosos<sup>2</sup>. Respecto a las especies arbóreas que conforman a los bosques se reconoce que los bosques tro-

picales contienen la mayor riqueza respecto a los bosques templados. En México se estima que en una hectárea de bosque tropical lluvioso (selva alta) es posible encontrar hasta 100 especies de árboles<sup>10</sup>. Aunque cabe destacar que los bosques templados mexicanos presentan una diversidad particularmente alta considerando la homogeneidad de este tipo de ecosistemas en otras regiones del planeta, ya que por ejemplo, contienen más de la mitad de las especies conocidas de pinos<sup>6</sup>. En lo que respecta a los bosques del estado de Chiapas, se ha estimado la existencia de aproximadamente 1800 especies de árboles<sup>7</sup>, más del 30 % de las especies arbóreas encontradas en el territorio nacional.

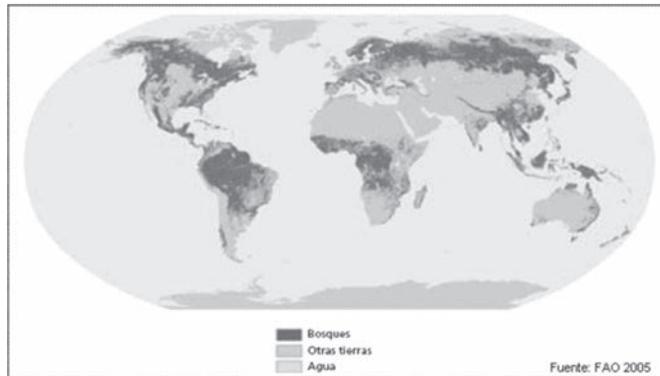


Figura 1.- Distribución de los bosques en el mundo

Además de la riqueza de especies que sostienen, los bosques contribuyen con una serie de beneficios que se obtienen a partir de los procesos ecológicos que llevan a cabo. Los bosques del mundo asimilan dióxido de carbono atmosférico por medio del proceso fotosintético y capturan y conservan más carbono que cualquier otro ecosistema, contribuyendo con más del 90 % del flujo anual de carbono entre la atmósfera y la superficie de la tierra<sup>7</sup>. A nivel mundial se calcula que los bosques almacenan en su biomasa a 283 mil millones de toneladas de carbono y que en conjunto con el carbono contenido en la materia de árboles muertos, hojarasca y suelo, superan la cantidad de carbono contenido en la atmósfera terrestre<sup>2</sup>. En algunos bosques templados del país se ha calculado la captura de entre 90 y 210 toneladas de carbono por hectárea anualmente<sup>8</sup>.

Los bosques, también son fundamentales para regular el ciclo hidrológico, aunque por lo general, retornan menos agua al suelo que los pastizales o áreas de cultivo bien manejados, ya que el bosque es el ecosistema que devuelve mayores cantidades de agua a la atmósfera a través de la evapotranspiración, además, el denso y profundo sistema radicular del arbolado y la alta porosidad del suelo forestal le dan una excelente capacidad de filtración y retención de agua. La escorrentía superficial es mínima y la recarga del agua del subsuelo es más eficiente, lo que produce una mayor presencia de manantiales permanentes<sup>9</sup>. La estimación de la función de protección a las cuencas por parte de los bosques es más difícil de establecer que la fijación de carbono, sin embargo se reconoce que aproximadamente el 99% de la extensión de los bosques juega un papel determinante en la protección de suelos y cuencas hídricas del planeta<sup>1</sup>.

Entre otros servicios forestales, los bosques también influyen en el clima a escala mundial al reflejar hacia la atmósfera menos calor que otros tipos de uso de la tierra con suelos más desnudos y menor cobertura vegetal. Contribuyen también a la reducción de la velocidad del viento y por lo tanto reducen la pérdida de la capa superior del suelo.

## Deforestación

La mayor parte de los bosques del mundo presentan un impacto evidente de las actividades humanas. De la superficie de bosques en el mundo, el 36% no presenta indicios notables de intervención humana directa, el resto muestra el impacto de diferentes tipos de uso. Actualmente, la pérdida de bosques en el planeta es de 16 millones de hectáreas anuales<sup>2</sup>. Debido a que los bosques sostienen un sistema complejo donde los componentes bióticos de los ecosistemas (plantas, animales, hongos y microorganismos) tienen relaciones entre sí y con los componentes abióticos (agua, aire y minerales)<sup>2</sup>, la deforestación se ha convertido en la principal causa de la pérdida de biodiversidad del planeta y es considerado uno de los problemas ambientales de mayor importancia económica y social.

Desde finales de la década de 1970 se empezaron a publicar estimaciones de la deforestación de los bosques en México. La tasa de deforestación calculada en 1980 fue de 500 mil hectáreas anuales (la tercera en magnitud en América latina), en 1990 se estimó en 700 mil hectáreas anuales (la más alta en Centroamérica) y en el año 2005 se observa un descenso a 350 mil hectáreas anuales<sup>2</sup>. La estimación de la deforestación de los bosques de Chiapas a partir del año 2000 oscila entre el 0.8 y el 4.2% anuales. La deforestación en el estado ha producido una fragmentación estimada de 0.034 remanentes/hectárea, con fragmentos de una superficie promedio de 8.4 hectáreas, que contrasta con los valores de 0.001 remanentes/hectárea y fragmentos con un área promedio de 65 hectáreas encontrados en 1975<sup>2</sup>.

En México, como en la mayor parte de Latinoamérica, la pérdida de bosques se debe sobre todo a la conversión del bosque a tierras agrícolas o a pastizales para el pastoreo por razones de subsistencia o comerciales (figura 2)<sup>2</sup>. La tala de los bosques se utiliza generalmente para establecer cultivos, pero al cabo de dos a tres años, una vez que se reduce la fertilidad del suelo, los terrenos son convertidos a pastizales<sup>2</sup>. Se estima que más de la mitad del territorio de Chiapas ha sido modificado para uso agropecuario y se observa la mayor ampliación de área dedicada a la ganadería en el país<sup>2</sup>.



Figura 2. La actividad agropecuaria es la principal causa de la pérdida de los bosques en nuestro país.

La práctica de las actividades ganaderas, además de la simplificación de los ecosistemas hacia especies que sirven de alimento al ganado y son resistentes al pisoteo, tienen un efecto de compactación del suelo, desertificación alrededor de las aguadas y de mayor erosión eólica<sup>2</sup>. Particularmente, los bosques templados de México han cedido 25% de superficie a la actividad ganadera<sup>2</sup>. Si bien esto ha podido significar la tala total del bosque, una práctica común es quemar el sotobosque para que las cenizas aporten fertilizante para el crecimiento vigoroso de hierbas y pastos de los que se alimenta el ganado. Aunque esto no representa la pérdida inmediata de cobertura arbórea, sino al cabo del tiempo, al envejecer y morir los árboles maduros cuando las plántulas y árboles jóvenes ya murieron, debido al fuego y del continuo ramoneo y pisoteo del ganado.

La deforestación a gran escala ha sucedido principalmente por el cambio de bosques a tierras agrícolas y ganaderas. Un factor determinante de la deforestación de los bosques a mediana escala es la construcción de carreteras, infraestructura eléctrica, presas, minas y los desarrollos turísticos, empresas que contribuyen a la deforestación tanto por sus efectos directos como por los indirectos (figura 3). En México, las presas hidroeléctricas cubren una superficie mayor a las 3 millones de hectáreas<sup>2</sup>. Aunque estas obras producen evidentemente un beneficio social, existe un costo asociado menos fácil de percibir, modifican el ciclo hidrológico y la disminución del nivel del manto freático delante de las cortinas de las presas.

A nivel de pequeña escala se reconoce la pérdida de los bosques por el uso de la leña, productos maderables y no maderables. En México, los bosques tienen también gran importancia como ingreso suplementario en la economía de subsistencia de las poblaciones rurales, ya que proveen leña para cocinar, madera para construir viviendas y fabricar muebles, plantas y frutos utilizados como alimento y medicinales o simplemente, como materias primas para la fabricación de otros productos.<sup>16</sup> Aunque el impacto de su recolección es poco notable, este evento es constante y puede deteriorar potencialmente el funcionamiento de los bosques.



Figura 3. Las grandes obras de infraestructura pueden disminuir de manera significativa el funcionamiento de los bosques a nivel local.

## Uso forestal de los bosques

De los bosques se extraen muchos productos, desde madera de construcción y leña hasta alimentos (frutos, hongos, plantas comestibles y caza) y forraje. Cuantitativamente, la madera para uso industrial es el producto más importante (figura 4). En el mundo, aproximadamente el 10% de la superficie de los bosques es utilizado para aprovechamiento forestal, donde se cosechan 2800 millones de metros cúbicos de madera empleados principalmente como combustible (53.5%) y para la fabricación de papel, tablonés y fibra<sup>16</sup>. Se estima que la producción de bienes derivados de la madera es de alrededor del 2% del Producto Mundial Bruto. En México, la producción forestal maderable es de 8 millones de metros cúbicos por año<sup>17</sup> que representan el 1.07% de Producto Interno Bruto Nacional<sup>1</sup>. La producción nacional anual maderable está compuesta en un 95% de madera de bosques templados (84% del género *Pinus*, 2.8% de *Abies*, 1% de otras coníferas, 5% del género *Quercus* y 2.2% de otras latifoliadas)<sup>16</sup>.



Figura 4. La extracción de madera sin conocimiento científico sobre la dinámica poblacional de las especies en uso es una causa de la pérdida de bosques a nivel mundial.

Contrario a lo que cabría esperar, las actividades forestales son una de las principales causas de disminución de las poblaciones de varias especies de árboles. Como sucede a nivel mundial, la mayoría de las operaciones forestales comerciales a gran escala se limitan a los bosques templados, los cuales se encuentran severamente amenazados por la tala total y por el mal manejo de la extracción maderera debido a la falta de incorporación de conocimiento científico sobre las especies involucradas<sup>16</sup>. La silvicultura definida como la ordenación o manejo científico de los bosques para la producción sostenida de bienes y servicios<sup>16</sup>, es en este sentido, una alternativa de producción que contribuya a la conservación de los bosques mexicanos.

## Principios de silvicultura

Las prácticas silvícolas consisten en el tratamiento de cultivo y cosecha en rodales forestales (unidad elemental de manejo) equivalentes a las parcelas en los sistemas agrícolas. La diferencia entre los sistemas agrícolas y los sistemas forestales, es que los rodales requieren de cuidados durante largos periodos de tiempo, por lo que resulta necesario tomar en cuenta mayores factores biológicos, sin descuidar los aspectos sociales y económicos<sup>16</sup>. Un área de ordenación forestal, es la superficie que abastece la industria maderera de una comunidad y generalmente se compone de varios rodales<sup>16</sup>.

La diferencia más notable entre la silvicultura y la tala inmoderada se refiere a las técnicas de regeneración que permitirán sostener indefinidamente a los bosques en un área de ordenación forestal. Los tipos de regeneración más comunes en los bosques templados bajo manejo<sup>16</sup> son los siguientes:

- Corta a matarrasa con plantación. Este tipo de corta consiste en extraer totalmente a los árboles de un rodal y posteriormente realizar una plantación con árboles de vivero.
- Método de árboles semilleros. Este tipo de corta consiste en dejar en el campo una cantidad suficiente de árboles productores de semillas, distribuidos en toda el área del rodal que permitan una distribución uniforme de semillas.
- Método de corta por aclareos sucesivos. El propósito esencial de este método es realizar la regeneración de los terrenos bajo la sombra y protección de los últimos árboles que forman la cosecha final que queda en un rodal. En contraste con las condiciones relativamente rígidas que produce la corta a matarrasa y el método de árboles semilleros, este método permite modificar la densidad de un rodal para la protección del terreno forestal.

En un rodal en desarrollo se distinguen dos características principales, la composición y estructura. La composición está determinada por el número de especies y la estructura por la distribución de los árboles según las clases de edad y/o diámetro. Los bosques templados bajo manejo silvícola generalmente se componen de rodales con pocas especies. Respecto a su estructura, en los bosques templados bajo manejo generalmente se trabaja con rodales de edad uniforme donde todos los árboles muestran aproximadamente la misma edad (aunque en un área de ordenación, distintos rodales de edad uniforme pueden ser de diferentes edades).

Dentro de un rodal con edad uniforme podemos distinguir cuatro categorías de árboles (figura 5)<sup>16</sup>, definidas de la siguiente manera:

- Árboles dominantes. Los árboles dominantes se elevan generalmente por encima del nivel general del dosel superior del bosque, de manera que están expuestos a la irradiación lumínica total en su parte superior y parcialmente en sus partes laterales. Algunos

árboles dominantes tienen un crecimiento que los convierte en árboles gruesos muy ramificados y de copa extensa, conocidos como árboles lobo y que se consideran elementos indeseables del rodal.

- Árboles codominantes. Los árboles codominantes junto con los árboles dominantes forman parte del dosel principal del rodal, aunque no son tan altos como los dominantes por lo que sus copas reciben la luz sólo en su parte superior y generalmente se encuentran limitados por los árboles dominantes en un sentido lateral.
- Árboles suprimidos. Los árboles suprimidos están dominados por las categorías anteriores y casi no reciben la luz directa, estos árboles son generalmente árboles débiles y de crecimiento lento.
- Árboles muertos. En un rodal aún bien manejado puede ser común encontrar árboles muertos debido a que los árboles suprimidos o dominados tarde o temprano se encontrarán en esta condición.

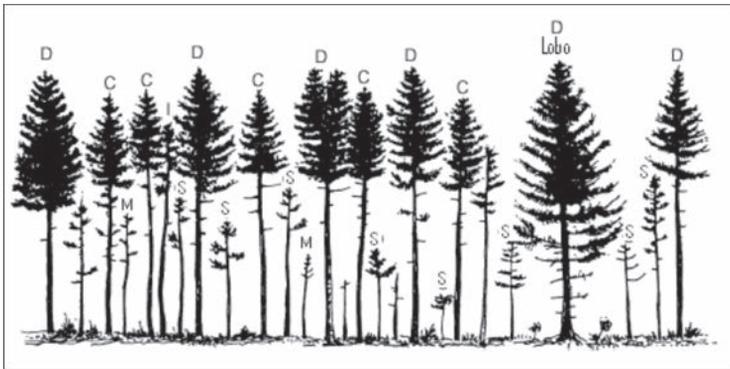


Figura 5. Clasificación de un rodal de edad uniforme: D, dominante; C, codominante; S, suprimido; M, Muerto.

La clasificación del arbolado es un paso muy importante para distinguir las técnicas aplicadas al rodal entre dos periodos de regeneración. Los tratamientos intermedios se realizan con el propósito de asegurar las características deseables de crecimiento dentro de un rodal en desarrollo<sup>16</sup>. Dentro de las técnicas más importantes de los rodales en bosques templados se encuentran las siguientes:

- Liberación. Son las técnicas utilizadas cuando los árboles son pequeños y consisten en disminuir el efecto competitivo de la vegetación que rodea a las plántulas. Generalmente en el bosque templado se emplean las quemadas controladas (que a su vez disminuye la acumulación de combustible).
- Poda. Técnicas en las que se eliminan las ramas de los árboles cuando la especie manejada presenta una corta edad, lo que permite tener árboles maduros libres de nudos.
- Raleo. Técnicas de tala selectiva de árboles al rodal durante la fase previa a la regeneración (es decir, previo a la corta), que permiten liberar a los árboles dominantes y codominantes y establecer rutas de extracción del producto comercial.

Además de estas técnicas intermedias se deben distinguir las técnicas de saneamiento y cortas de recuperación, la técnica de saneamiento consiste en la sustracción de árboles atacados por insectos, con el objetivo de evitar la formación de focos de infección dentro de un rodal y mantener la salud de los árboles que lo conforman. Mientras que las cortas de recuperación es la sustracción de árboles cuando son atacados por insectos pero aún no han perdido totalmente su valor comercial con el fin de obtener una cierta ganancia económica, generalmente se realiza de forma simultánea a la corta de saneamiento<sup>16</sup>.

## La silvicultura como manejo comunitario

En México hay un poco más de 2,500 instalaciones de la industria forestal y el 90% de estas instalaciones son de pequeña escala<sup>16</sup>. Debido a que la mayor extensión de los bosques templados de Chiapas pertenece al sector social, es decir, son propiedades de ejidos y comunidades indígenas, el manejo forestal comunitario puede ser una perspectiva particularmente interesante.

El manejo comunitario de bosques se inició como propuesta internacional en los años setenta y hacia el final de la década de 1980 se establece como una estrategia de desarrollo rural que a la vez, puede permitir la conservación de los bosques<sup>16</sup>. Entre los argumentos manejados a

favor de la silvicultura comunitaria, se plantea que las comunidades asentadas en áreas forestales están en mejor posición para encargarse del manejo de los bosques, porque se asume que cuando los campesinos tienen derechos de largo plazo sobre los bosques están motivados a conservarlos. Mientras que por otro lado, la experiencia mundial de grandes concesiones forestales muestra que éstas tienden a rebasar la capacidad reguladora de los gobiernos, produciendo considerables deterioros ambientales y dejando en cambio escasos beneficios locales<sup>16</sup>.

Aunque distintos estudios muestran que el manejo comunitario permite una mejor vigilancia y cuidado del bosque, cabe resaltar que en nuestro país, las empresas forestales comunitarias generalmente están sostenidas de una economía frágil que exige elaborar planes de manejo forestal *ad hoc*, para lograr que el manejo silvícola comunitario se convierta en una opción económica y ecológicamente rentable.

### Factores de vulnerabilidad de los bosques templados bajo manejo silvícola

Típicamente, el manejo forestal incluye el control de los factores que limitan el crecimiento o producen la mortalidad de árboles como plagas o incendios respecto a las áreas de bosque no manejadas, sin embargo, reconocer estos factores de disturbio, aun en zonas silvícolas, puede resultar relevante no sólo para el manejo forestal sino también para el entendimiento de la dinámica de los bosques.

Aunque el concepto de disturbio parece intuitivamente muy claro, en realidad está influenciado por múltiples factores. Un disturbio es un evento discreto y puntual de mortalidad, desplazamiento o daño de uno o más individuos (o colonias), que modifica directa o indirectamente la regeneración de las poblaciones<sup>16</sup>. En el cuadro 1 se muestran diferentes aproximaciones que permiten caracterizar un régimen de disturbio<sup>16</sup>.

Está comprobada la importancia de los disturbios periódicos en la dinámica de las comunidades y ecosistemas naturales. Cuando los disturbios son muy intensos, los ecosistemas normalmente diversos y complejos se simplifican, conservando pocas especies e interacciones. Sin embargo, muchas veces el sistema puede regenerarse rápidamente,

ya que el disturbio libera recursos que son fácilmente aprovechados, de tal manera que los disturbios generalmente renuevan al ecosistema, si la magnitud del disturbio no afecta de modo significativo a las fuentes de germoplasma en los alrededores. Aunque, bajo diferentes condicionantes, los disturbios también pueden modificar profundamente algunas propiedades del ecosistema, de tal manera que las especies no tienen la capacidad de aprovechar estos tipos de disturbio. Y como consecuencia se observa la pérdida de la capacidad de regeneración y la degradación del ecosistema<sup>16</sup>.

Es interesante el hecho de que los síntomas de la degradación sean similares entre ecosistemas naturales contrastantes. Se puede hablar de un síndrome caracterizado por:

- Biodiversidad reducida
- Alteraciones de la productividad primaria y secundaria
- Poca eficacia en el reciclado de nutrientes
- Dominancia de especies exóticas
- Incremento de especies oportunistas pequeñas con ciclos de vida cortos.

Debido a las condiciones socioeconómicas de las empresas forestales en México, deben atenderse diversos factores que pueden resultar muy importantes para alcanzar resultados económicamente favorables y ecológicamente deseables en los bosques manejados. En las recientes décadas, el régimen de disturbio ha surgido como un factor determinante para el desempeño del manejo silvícola de bosques templados. Problemas de protección que históricamente han sido ignorados por los planes de manejo han terminado por causar grandes trastornos a la planeación a largo plazo. Debido a que los disturbios han inducido una tendencia a disminuir el monto total de cosecha, reducen la cosecha de material aserrable y aumentan los desechos y material celulósico en los rodales, además de que las técnicas de saneamiento y recuperación han obligado a cambiar zonas de corta, caminos y tratamientos silvícolas <sup>16</sup>.

Cuadro I. Definiciones de los conceptos usados

CONCEPTO	DEFINICIÓN
Disposición	Disposición espacial, incluyendo relaciones con gradientes geográficos, topográficos, ambientales y comunitarios.
Frecuencia	Número promedio de eventos por periodo de tiempo. La frecuencia es usada como probabilidad de ocurrencia de disturbio, cuando es expresada como una fracción decimal de eventos anuales.
Intervalo de retorno	Inverso de la frecuencia; es el tiempo promedio entre dos disturbios.
Predictibilidad	Una función inversa, redimensionada, de la varianza del intervalo de retorno, que permite ponderar la recurrencia del disturbio.
Área o tamaño	Área perturbada. Puede ser expresada como área por evento, área por intervalo de tiempo, área por evento por intervalo de tiempo o área total por tipo de disturbio por intervalo de tiempo. Normalmente se expresa como porcentaje del área total.
Intensidad	Fuerza física del evento por área por unidad de tiempo ( e. g. calor liberado por área por intervalo de tiempo en un incendio, o velocidad del viento en huracanes).
Severidad	Impacto en el organismo, la comunidad o el ecosistema ( e. g. biomasa removida).
Sinergia	Efectos por la ocurrencia de otros disturbios ( e. g. la sequía incrementa la intensidad del fuego y el daño por insectos incrementa la susceptibilidad a tormentas).

A continuación se presentan los principales disturbios que afectan los bosques templados, haciendo particular énfasis en la vulnerabilidad del bosque bajo manejo silvícola.

## Disturbios abióticos

### Incendios

Un incendio forestal es un disturbio ecológico con la capacidad de modificar abruptamente la estructura y composición de las comunidades biológicas, y su alcance puede ser el cambio del funcionamiento de los sistemas ecológicos en grandes escalas espaciales y temporales (figura

6). A escala mundial, los incendios son una fuente importante de emisión de carbono, mientras que en el ámbito regional y local, modifican el volumen de biomasa, alteran el ciclo hidrológico e influyen en el comportamiento de las especies vegetales y animales<sup>16</sup>.



Figura 6. Los incendios son uno de los principales disturbios abióticos de los bosques templados que puede modificar significativamente el funcionamiento del ecosistema.

Los incendios no necesariamente tienen un aspecto negativo en los bosques, los incendios son un proceso físico que sucede periódicamente en casi todos los sistemas continentales e insulares (excepto en los polos) y las comunidades biológicas se encuentran adaptadas a este proceso. Generalmente se reconoce que el fuego juega un papel determinante en la sucesión de especies y promueve la diversidad de organismos en los bosques templados<sup>16</sup>. Por ejemplo, algunas especies de pino han desarrollado adaptaciones, como el grosor y consistencia de la corteza y el estímulo de la germinación de sus semillas sometidas a altas temperaturas (figura 7).

En los bosques templados es común que se presenten incendios de baja intensidad con una extensión menor a las 10 hectáreas y un periodo de retorno de 10 años, considerados de una severidad baja<sup>16</sup>. El régimen de fuego está determinado primordialmente por patrones climáticos, particularmente en nuestro país se ha observado una correlación con la presencia del fenómeno del niño/niña<sup>16</sup>.

Sin embargo durante las últimas décadas, el régimen de incendios de los bosques mexicanos está siendo modificado debido al sobrepastoreo de ganado y la utilización del fuego como una herramienta agrícola

en la adyacencia del bosque, así como la cosecha de madera, y en algunos casos la supresión de incendios (que ocasiona la acumulación de material combustible), registrándose incendios con mayor frecuencia, intensidad y severidad. Tan sólo entre 2005 y 2006 ocurrieron más de 18 mil incendios con una extensión promedio de 28 hectáreas, donde 41% de las zonas afectadas por incendios fueron registradas en Chiapas y Oaxaca<sup>16</sup>. A pesar de la magnitud de afectación existen pocos estudios realizados para comprender la afectación de los bosques templados en el estado por la modificación del régimen de fuego.

Todos los bosques son vulnerables a los incendios, aunque las plantaciones forestales presentan un peligro menor respecto a los bosques naturales. Debido a que las plantaciones forestales tienen un conjunto de medidas para disminuir la vulnerabilidad a un incendio, quemas prescrites que eliminan sistemáticamente el combustible, sistemas de alerta temprana y equipos de combate capacitados. Las redes de caminos en una plantación forestal facilitan el acceso a la zona de incendio y generalmente, se cuenta con un sistema de abastecimiento estratégico de agua en los predios. Sin embargo, debido a la modificación del régimen del fuego en los bosques templados bajo manejo silvícola en el estado de Chiapas había incendios con una frecuencia mayor, en sinergia con el sobrepastoreo que existe en los rodales, podría estar generando un estrés fisiológico y en consecuencia la reducción del vigor de los árboles.



Figura 7. Los pinos generalmente presentan adaptaciones que les permite aprovechar los espacios abiertos generados por los incendios.

## Heladas

Las heladas son un disturbio que en los bosques templados se presentan con un periodo de retorno de uno a tres años, generalmente con una distribución de decenas a cientos de hectáreas y con una intensidad de menos de 20 días al año, generalmente con severidad baja.

Los bosques templados presentan diversas adaptaciones a condiciones extremas de bajas temperaturas. No se han registrado pérdidas de bosque por este factor y tienen un efecto poco evidente en las plantaciones forestales. Sin embargo, heladas extremas pueden reducir la capacidad fotosintética del arbolado y producir un estrés hídrico en los individuos, además de ser un factor que podría favorecer el incremento de combustible en los rodales.

## Factores bióticos

### Plagas y enfermedades nativas

Los bosques templados son frecuentemente afectados por plagas y enfermedades. Los descortezadores se encuentran entre los más importantes grupos de insectos plaga en los bosques templados, son pequeños escarabajos (0.5 a 10mm) que se reproducen en el interior de la corteza del árbol, aunque el daño de los descortezadores disminuye considerablemente el vigor del arbolado son capaces de causar la muerte de su huésped porque son portadores de hongos patógenos. Los hongos junto con el descortezador impiden la circulación de nutrimentos en el árbol<sup>16</sup>.

Los principales descortezadores de los bosques templados en México pertenecen a los géneros *Dendroctonus* e *Ips*. Entre 1990 y el año 2000, más de 1000 mil hectáreas de los bosques templados mexicanos fueron afectadas por insectos descortezadores. En los bosques templados de Chiapas se han encontrado seis especies de descortezadores, aunque la biología de estos insectos ha sido extensamente estudiada, los factores que determinan su incidencia ha sido un tema poco abordado (Altuzar com. pers.).

En un nivel de selección individual, los descortezadores responden a las características nutricionales y defensivas de los árboles hospederos. Se sabe que las hembras adultas son las encargadas de la selección del hospedero. Una vez localizado un hospedero, la hembra atraviesa la corteza para iniciar la construcción de la galería en el interior del floema. Una vez iniciado el ataque, las hembras emiten una feromona que por un lado atrae a los machos adultos y por otro, al combinarse con el olor de la resina que surge del punto de ataque atrae a más hembras y se produce una infestación masiva del hospedero en un corto tiempo. La secreción de resina por parte del hospedero puede eliminar exitosamente a los descortezadores cuando son sólo unos pocos, sin embargo, el ataque masivo permite vencer el mecanismo natural de defensa, ya que sobrepasa la capacidad del árbol para producir resina y entonces, puede ser fácilmente atacado por los descortezadores <sup>16</sup>.

En el caso particular de los descortezadores pertenecientes al género *Dendroctonus*, el apareamiento toma lugar en el interior del árbol donde las hembras comienzan a construir una larga galería en forma de "S" donde depositan hasta 30 huevos (figura 8). Los padres emergen del árbol a los pocos días de depositar los huevos y proceden a atacar el mismo u otro hospedero. Los huevos eclosionan a los nueve días de la ovoposición. Las larvas se alimentan en el interior del floema durante cuatro o cinco semanas antes de emerger para atacar otro árbol hospedero. Los escarabajos adultos son capaces de volar hasta tres kilómetros para buscar un hospedero. Los descortezadores de esta manera pueden tener de siete a nueve generaciones por año <sup>16</sup>.

Como disturbio, la función ecológica de los descortezadores es la de remover el arbolado maduro y sobremaduro permitiendo la renovación de la masa forestal. Los descortezadores generalmente habitan los bosques templados en bajas poblaciones, atacando árboles sobremaduros, estresados o dañados; sin embargo, de forma natural suceden periódicamente brotes epidémicos (promovidos por condiciones climáticas). Durante las epidemias a menudo comienzan el ataque en árboles suprimidos aunque ante un crecimiento considerable de las poblaciones de descortezadores son capaces de atacar árboles vigorosos.

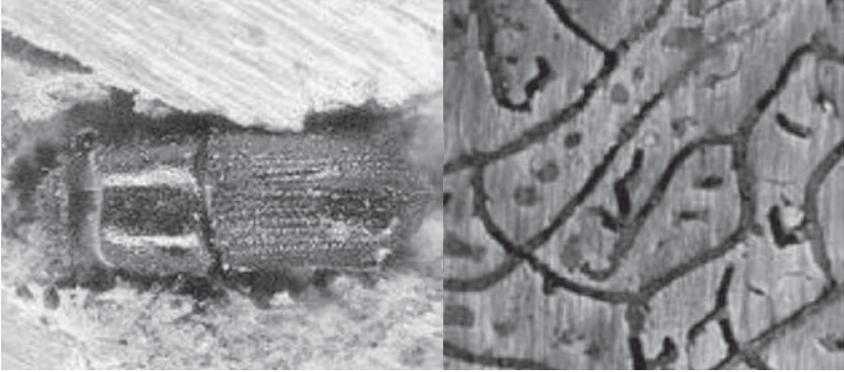


Figura 8. Los escarabajos descortezadores son uno de los principales disturbios bióticos de los bosques templados que puede modificar significativamente el funcionamiento del ecosistema.

Una infestación de descortezadores puede durar de dos a cuatro años y puede repetirse cíclicamente de cinco a nueve años. Sin embargo en las últimas décadas se ha observado un alarmante incremento de brotes epidémicos en América del Norte y América Central<sup>32</sup>. Hay varias razones por las que se han presentado estos brotes, que incluyen desde un posible estrés hídrico provocado por el calentamiento global, hasta la susceptibilidad debido a la propia estructura del bosque. Particularmente en los bosques templados bajo manejo en el estado de Chiapas, los descortezadores se presentan en rodales de estructura de edad uniforme, donde se observa sobrepastoreo y descortezamiento del arbolado para la obtención de combustible (ocote), además de adyacencia a varios focos de infestación en zonas no manejadas. Todas estas condiciones por sí solas o en forma sinérgica son propicias para el brote de epidemias de descortezadores a pesar de los esfuerzos de control en los bosques manejados.

### Factores antrópicos Disturbio crónico

Además de los disturbios anteriormente presentados debe señalarse el posible efecto del disturbio crónico en los bosques templados. El

disturbio crónico es un tipo de perturbación cotidiana que afecta al ambiente manteniéndose en el tiempo y el espacio<sup>25</sup>; éste consiste en remover sistemáticamente pequeñas fracciones de biomasa, generalmente leña, forraje, materiales para la construcción de origen orgánico, y otros productos no maderables. Por lo general estas actividades no dan suficiente tiempo para que la vegetación se recupere adecuadamente, incluso estando dentro de la capacidad de carga del ecosistema, causando, con el paso del tiempo, el colapso productivo del sistema aun en bosques bajo manejo.

## Consideraciones finales

Establecer estrategias para el uso apropiado y la conservación de los recursos naturales es un tema que adquiere mayor importancia conforme disminuye la diversidad biológica del planeta. El manejo forestal comunitario en el estado de Chiapas orientado a la extracción de madera, puede ser una alternativa que permita proteger los bosques templados de manera tan efectiva como las áreas naturales protegidas, generar ingresos que contribuyan a disminuir la pobreza y favorecer la disminución de las disputas intracomunitarias. Siempre y cuando los propietarios de los bosques se preocupen y tengan las facilidades para perfeccionar su manejo forestal con criterios ambientales.

A pesar de que la silvicultura tiene más de medio siglo de desarrollo en nuestro país, típicamente la planificación del uso forestal es, desde entonces, dirigida por un enfoque económico y administrativo. El manejo silvícola en el bosque templado de Chiapas se realiza en su mayoría sobre rodales con una estructura de edad uniforme básicamente porque la ordenación del área de producción es más simple, privilegia la reducción de los costos de cosecha y comercialización, la regeneración es más fácil y además permite el pastoreo ya que este tipo de rodales permite una cierta producción forrajera. A pesar de que se ha encontrado evidencia de que en los rodales de edad no uniforme existe un mejor aprovechamiento del perfil del suelo, un espacio adecuado entre las copas, un microclima con menos fluctuaciones y que en general el bosque es menos susceptible a insectos plaga.

Particularmente para disminuir el impacto de las plagas se sugiere la utilización de algunas técnicas de regeneración e intermedias<sup>32</sup>:

- Plantar los pinos en sitios adecuados: Los pinos no crecen bien si no son plantados en sitios adecuados. Los pinos ubicados en suelos muy pobres o no muy profundos tienen un alto riesgo de ser afectados por insectos y enfermedades.
- Favorecer los rodales de diversas edades y de especies más resistentes: Los bosques de pino sufren menos daño de plagas si constan de una diversidad de especies y edades.
- Eliminación de los árboles de alto riesgo: Durante los primeros años del establecimiento de los rodales, se recomiendan los raleos de saneamiento, es decir, la eliminación de los árboles suprimidos.
- Regulación de las densidades: En los bosques jóvenes, se deben hacer raleos cada 5-10 años empezando a los 8 - 12 años de edad del arbolado para reducir la competencia entre los árboles y mantener un crecimiento rápido. Los árboles con copas escasas, los suprimidos e intermedios, son los primeros a cortar, dejando en pie los árboles dominantes y codominantes con características de buena salud (copa viva y vigorosa).
- Evitar los incendios forestales: Los bosques debilitados frecuentemente por fuegos o incendios son más susceptibles al ataque de descortezadores. En cambio, en los rodales de 10 años o más de edad, las quemas prescriptas cada 3-5 años pueden reducir la competencia entre los árboles al eliminar los árboles suprimidos en los rodales muy densos y las plantas en el sotobosque.
- Reducir los daños durante el aprovechamiento forestal: Durante los raleos y otras oportunidades de aprovechar árboles de un rodal, se deben tomar precauciones para minimizar las heridas en los pinos vivos. Al mismo tiempo, se deben aprovechar los pinos dañados por rayos, operaciones abandonadas de resinación, muérdagos, enfermedades u otras causas de mala condición. Si algunos árboles quedan sin corteza en los troncos debido al equipo de extracción, éstos también deben ser eliminados del rodal.

- Regeneración de los rodales sobremaduros: Los pinos de edad mayor (más de 60 años) son menos resistentes a los ataques del descortezador. En bosques comerciales, los rodales sobremaduros deben ser aprovechados y los sitios regenerados nuevamente con pinos.

Quizás no sólo sea suficiente con aplicar técnicas alternativas para tener un mejor rendimiento de los bosques bajo manejo silvícola, la incorporación del concepto de disturbio puede también sugerir la modificación de la ordenación forestal. Ya que los disturbios cuestionan el carácter homogéneo que se asume en la definición del concepto de rodal y exigen considerar un gradiente delimitado por la vulnerabilidad de los elementos del rodal a disturbios bióticos, abióticos y crónicos.



## Bibliografía

1. Ford, R. 1971. *Terminology of forest science*. Practice and Products, Soc. Am. Foresters, Washington.
2. FAO. 2006. *Evaluación de los recursos forestales mundiales 2005: hacia la ordenación forestal sostenible*, FAO, Roma.
3. SEMARNAT. 2000. *La gestión ambiental en México*, Semarnat-INE, UAM, PNUMA, Distrito Federal.
4. McNeely J., M. Kenton, R. Walter, M. Russell y W. Timothy. 1990. *Conserving the World's Biological Diversity*. IUCN, WRI, CI, WWF-WS, Banco Mundial.
5. González-Espinosa M., N. Ramírez-Marcial, G. Méndez-Dewar, L. Galindo-Jaimes y D. Golicher. 2005. *Riqueza de especies de árboles en Chiapas: variación espacial y dimensiones espaciales asociadas al nivel regional*, In: *Diversidad biológica en Chiapas*. González-Espinosa M., Ramírez-Marcial N. y Ruiz-Montoya (Coords). Plaza y Valdés, CO-CyTECH, ECOSUR, Distrito Federal, 81-126.
6. Sánchez-Mejorada N. y L. Hugué. 1959. *Las coníferas de México*, *Unasylva* 13(1), disponible en <http://www.fao.org/docrep/x5390e/x5390e04.htm>, consultado en 2008.07.13.

7. Dixon, R.K., S. Brown, R. A. Houghton, A. M. Solomon, M. C. Trexler, y J. Wisniewski. 1994. *Carbon pools and flux of global forest ecosystems*, Science **263**: 185-190.
8. Ordóñez J. A., B.H.J. de Jong y O. Masera. 2001. *Almacenamiento de carbono en un bosque de Pinus pseudostrobus en Nuevo San Juan, Michoacán*. Madera y Bosques **7(2)**: 27-47.
9. Brüsweiler S., U. Höggel y A. Kläy. 2004. *Los Bosques y el Agua: Interrelaciones y su Manejo*, InfoResources News **5(4)**: disponible en [http://www.inforesources.ch/p\\_news04\\_5\\_s.htm#inter](http://www.inforesources.ch/p_news04_5_s.htm#inter), consultado en 2008.07.13.
6. FAO, 2003. *Situación de los bosques del mundo*. FAO, Roma, 136 pp.
7. Challenger, A. 1998. *Utilización y conservación de los ecosistemas terrestres de México: pasado, presente y futuro*, CONABIO, UNAM, Agrupación Sierra Madre, Distrito Federal.
9. Ochoa-Gaona, S. y M. González-Espinosa. 2000. *Land use and deforestation in the highlands of Chiapas, Mexico*. Appl. Geo. **20**: 17-42.
10. Toledo, V. M. 1988. *La diversidad biológica de México*. Ciencia y desarrollo. **XIV(81)**:17-31.
11. Gómez-Pompa, A. 1985. *Los recursos bióticos de México (reflexiones)*. INIREB y Alhambra mexicana. Distrito Federal.
12. Sinclair, A. R. E. y L. Fryxell. 1985. *The Sahel of Africa: ecology of disaster*. Can. J. of Zoo. **63**: 987-994.
13. World Bank. 1995. *Natural Resources and Rural Poverty Operations Division, Latin America and the Caribbean Regional Office*. Revisión sobre la conservación de recursos y el sector forestal en México, Informe No. 13114-ME, Washington: World Bank.

14. Carrillo-Anzures, F., M. Acosta-Mireles, E. Flores-Ayala y E. Buendía-Rodríguez. 2005. *La silvicultura en México*. Teor. Amb., **52**: disponible en [http://www.teorema.com.mx/articulos.php?id\\_sec=49&id\\_art=140](http://www.teorema.com.mx/articulos.php?id_sec=49&id_art=140), consultado en 2008.06.21.
16. González Pacheco, C. 1983. *Capital extranjero en la selva de Chiapas, 1863-1982*. UNAM, Distrito Federal.
17. Daniel, P. W., U. E. Helms y F. S. Baker. *Principios de Silvicultura*, McGraw Hill, Distrito Federal.
19. Gadgil, P y J. Bain. 1999. *Vulnerability of planted forest to biotic and abiotic disturbances*. New Forest **17**: 227-238.
- 20 Brown, C. L. 1971. *Growth and form*. Springer Verlag, Viena.
21. Merino L. 1997. *El manejo forestal comunitario en México y sus perspectivas de sustentabilidad*. UNAM, Distrito Federal.
22. Sousa, W. P. 1984. *The role of disturbance in natural communities*. Annual Rev. of Eco. and Sys. **15**:353-391.
- 23 Pickett, S. T. A. y P. S. White. 1985. *The Ecology of Natural Disturbance and Patch Dynamics*, Academic Press, Washington.
24. Vega E. y E. Peters. 2006. *Conceptos generales sobre el disturbio y sus efectos en los ecosistemas*, Rev. electrónica del INE. Disponible en [http://www.ine.gob.mx/ueajei/publicaciones/libros/395/vega\\_peters.html](http://www.ine.gob.mx/ueajei/publicaciones/libros/395/vega_peters.html) consultado en 2008.06.21.
25. Mendoza, M. A., J. J. Fajardo y J. Zepeta. 2005. *Manejo de paisaje, una interpretación práctica*, Bois et forêts des tropiques, **285 (3)**: 47-54.
26. Rodríguez T., D. A. y P. Z. Fulé. 2003. *Fire ecology of Mexican pines and a fire management proposal*. Int. J. of Wildland Fire **12**: 23-37.

27. Christensen, N.L. 1993. *Fire Regimes and ecosystem*. Fire in the environment: The ecological, atmospheric, and climatic importance of vegetation fires. *Land. Ecol.* **8**: 95–101.
28. Magaña, V.O (Ed). 1999. *Los impactos de El Niño en México*. Universidad Nacional Autónoma de México-Secretaría de Gobernación. Distrito Federal.
29. CONAFOR. 2006. *Reporte de incendios forestales 2006*. CONAFOR, Disponible en [http://www.conafor.gob.mx/portal/docs/subsecciones/Incendios\\_forestales](http://www.conafor.gob.mx/portal/docs/subsecciones/Incendios_forestales) consultado en 2008.06.21.
30. Chellman, C.W., y R.C. Wilkinson. 1975. *Recent history of southern pine beetle, Dendroctonus frontalis Zimm., (Col.; Scolytidae) in Florida*. *Flor. Ent.* **58**: 22.
31. Powers, J. S., P. Sollins, M. E. Harmon y J. A. Jones. 1999. Plant-pest interactions in time and space: A Douglas-fir bark beetle outbreak as a case study. *Land. Ecol.* **14**: 105–120.
32. Matthew R., E. Symonds y M. A. Elgar. 2004. *The mode of pheromone evolution: evidence from bark beetles*, *Proc. R. Soc. Lond.*, **271**: 839–846.
33. Billings R. F. y J. V. 2005. Espino Mendoza. *Cómo Reconocer, Prevenir y Controlar Plagas*. Servicio Forestal de Texas, Publicación **0605/15000** disponible en <http://www.barkbeetles.org/centralamerica/0605s.html>, consultado en 2008.07.13.

## IV. Métodos para tratar el agua residual

Ing. Pedro Vera Toledo

### Introducción

La superficie de México se calcula en cerca de un millón 964 mil kilómetros cuadrados; sus litorales bordean 11 mil 122 kilómetros, bañados por las aguas de tres grandes cuencas marinas: el Océano Pacífico, el Golfo de México y el Mar Caribe.

La precipitación en el territorio se concentra principalmente entre los meses de junio a septiembre; sin embargo, en la zona norte de la península de Baja California pueden presentarse precipitaciones durante el invierno. La orografía determina la existencia de 37 regiones hidrográficas, muchas de ellas con ríos grandes y caudalosos, entre los que pueden citarse el Grijalva, Usumacinta, Balsas y Papaloapan. También se cuentan 70 lagos de diversos tamaños<sup>[1]</sup>.

El agua es considerada como uno de los recursos más importantes para el desarrollo de la sociedad, por lo que su uso racional, y la correcta gestión es fundamental para alcanzar un completo bienestar. En este capítulo se analiza el agua, primero un panorama general y somero de la potabilización, y en segundo lugar los sistemas de tratamiento enfocados a la depuración del agua de origen municipal (dejando de lado a todos los efluentes industriales y de servicios). Las modalidades que más se usan en la actualidad en México y particularmente Chiapas, así como la evolución de las diversas variables de los mismos.

## Datos estadísticos del agua en México y Chiapas

La disponibilidad natural media total de agua en México (que considera al agua renovable, es decir, la que escurre superficialmente y recarga los acuíferos) es de 474 mil 637 hm<sup>3</sup> al año, de la cual se emplea para usos consuntivos cerca de 75 mil 430 hm<sup>3</sup>.

El grado de presión del recurso difiere notablemente entre zonas: mientras que en el norte del país y la región de Aguas del Valle de México y Sistema Cutzamala (XIII) es mayor a 40%, en las regiones del Pacífico Sur (V), Golfo Centro (X) y en la Frontera Sur (XI) no rebasa 5%. Con respecto a los acuíferos nacionales en el 2004, 104 de ellos se encontraron sobreexplotados (es decir, la extracción excede a la recarga), localizándose la mayor cantidad de ellos en las regiones Lerma-Santiago-Pacífico(VIII) y Cuencas Centrales del Norte (VII). En 2004, la disponibilidad natural media anual per cápita en México se estimó en 4 mil 505 m<sup>3</sup> [2], volumen clasificado como de disponibilidad baja<sup>[3]</sup> y considerado como peligroso en años de precipitación escasa. Debe mencionarse que aunque la disponibilidad se mide por habitante, este volumen debe además satisfacer otros requerimientos, como son la demanda del líquido por los ecosistemas naturales (lagos, ríos, humedales, etcétera). En el último siglo, la disponibilidad de agua per cápita se ha reducido drásticamente a nivel nacional (a inicios del siglo XX era siete veces mayor que en el 2004), lo que se explica fundamentalmente por el crecimiento de la población y no por la disminución de la cantidad de precipitación en el país. Destacan a nivel nacional dos grandes zonas de disponibilidad: la sur y sureste (cuya disponibilidad es en conjunto 68% del total nacional), que contrastan con las zonas norte, centro y noroeste (que en conjunto disponen de 32%, pero albergan 77% de la población y contribuyen con 85% del PIB).

En la zona sur-sureste se concentran la mayor cantidad de recursos hídricos, tan sólo en Tabasco y Chiapas se tiene más del 30 % del total del agua disponible, por otro lado en Tabasco se posee la mayor precipitación pluvial con 2 424.1 mm anuales y en Chiapas el promedio asciende a los 1 963.4 mm anuales<sup>[3]</sup> (Precipitación pluvial normal mensual histórica por entidad federativa, en el periodo de 1941 a 2000), por

si fuera poco en estas dos entidades corren los ríos más caudalosos del país el Usumacinta y el Grijalva.

De la totalidad del agua disponible que en términos generales, requiere de cierto tratamiento para alcanzar los criterios de la normatividad correspondiente sobre todo para consumo humano y se tiene que al concluir el año 2000 existían registradas en el país, 336 plantas potabilizadoras en operación, con una capacidad total instalada de 105,003 l/s y un caudal potabilizado de 78,319.01 l/s. Al cierre de 2006, el registro de plantas en operación se incrementó a 491 unidades, con capacidad de 118,137.65 l/s y un caudal potabilizado de 85,398.99 l/s. sin que esto signifique que las plantas que actualmente se encuentran operando alcancen los parámetros exigidos en la normatividad correspondiente.

En comparación con el 2005, la capacidad instalada de la infraestructura en operación se redujo en 3,620.76 l/s y el caudal potabilizado en 1,653.33 l/s, bebido a que en el periodo 2006, se dieron de baja de la infraestructura once plantas en Yucatán, cinco en Quintana Roo y dos en Campeche, que no operaban con su proceso <sup>[4]</sup>.

Datos de la agenda estadística 2001 arrojan que en Chiapas existían 3 431 “sistemas de agua potable” y de acuerdo a la propia agenda los “sistemas comprenden”: diferentes tipos, como son: de gravedad, bombeo, pluvial, olla y mixto y que se referían a los sistemas de abastecimiento de agua entubada <sup>[5]</sup>. Para diciembre de 2006 en contraparte, en el inventario nacional de plantas municipales de potabilización y de tratamiento de aguas residuales en operación, se contaba con solo 3 plantas potabilizadoras en todo el estado, con una capacidad instalada de 2500 l/s sin embargo el caudal potabilizado es de únicamente 2100 l/s, para una población de 4 200 000 habitantes (de acuerdo a las proyecciones del INEGI).

En lo referente a la estimación de la generación de aguas residuales en el estado, la Comisión Nacional del Agua propone que para obras de drenaje sanitario se adopta el criterio de aceptar como aportación de aguas negras, el 75% de la dotación de agua potable, considerando que el 25 % restante se “consume” antes de llegar a los conductos <sup>[6]</sup>, es importante tomar en cuenta que prácticamente en todas las localidades del estado no se posee sistema de drenaje pluvial lo que da como resultado la mezcla del agua residual con la pluvial aumentado el caudal de la primera.

La CNA a través del IMTA realiza mediciones en diferentes localidades del país, con objeto de definir el porcentaje de aportaciones.

En todo el país se contabilizan un total de 1 593 plantas de tratamiento de aguas residuales a diciembre de 2006, sin dar a conocer la calidad del agua del efluente de las mismas<sup>[4]</sup>.

Para el 31 de diciembre de 2000, de acuerdo a la agenda estadística 2001, en Chiapas existían 14 plantas de tratamiento de aguas residuales municipales, con 809 l/s de capacidad instalada y se tenían tres tipos de procesos: filtros rociadores, lagunas de oxidación y reactores enzimáticos, diseminados en los municipios de: Chiapilla, Frontera Comalapa, Ixtapa, Palenque, Pijijiapan, Las Rosas, Suchiapa, San Lucas, estas en uso. La misma agenda informa que las restantes seis plantas se encontraban fuera de servicio, en los municipios de: Tuxtla Gutiérrez, Villaflores (dos plantas), Catazajá, Ocosingo, y Pichucalco<sup>[5]</sup>.

En ese mismo año se cuantificaron 18 122 fuentes de abastecimiento de agua, que incluían pozos profundos, manantiales, ríos, presas, lagunas, norias y arroyos, con un volumen anual de extracción de agua potable que ascendía a 196 500 270 m<sup>3</sup>, lo que arrojaría de acuerdo a los criterios de la Comisión Nacional de Agua la cantidad anual de 147 375 202.5 m<sup>3</sup> de agua residual, en el mismo periodo sólo reciben algún tratamiento 10 375 344 m<sup>3</sup>/año (329 l/s que se tratan de los 809 l/s instalados)<sup>[3]</sup>, es decir poco menos del 7%, lo que refleja un enorme reto en materia de saneamiento.

Para diciembre de 2006, se contaba con 11 plantas registradas en el inventario nacional, la suma del total del caudal instalado es de 1,109.20 l/s, con un total tratado de 953.20 l/s, de las once plantas en operación, seis de ellas operan de “forma deficiente por azolvamiento”, cinco lagunas de estabilización, en los municipios de Chiapilla, Playas de Catazajá, Las rosas, Paso Hondo en Frontera Comalapa y Suchiapa y una fosa séptica en la localidad de Santo Domingo en el municipio de Unión Juárez, el total del caudal que fluye en estas plantas asciende a los 71.7 l/s<sup>[4]</sup>, ver tabla No. 1.

Tabla No. 1

PLANTAS MUNICIPALES DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES EN OPERACIÓN EN EL ESTADO DE CHIAPAS							
Municipio	Localidad	Nombre de la planta	Proceso	Capacidad instalada (l/s)	Caudal Tratado (l/s)	Cuerpo Receptor o Reuso	Observaciones
CATAZAJA	CATAZAJA	PLAYAS CATAZAJA	LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN	10	10	LAGO DE CATAZAJA	OPERA DE FORMA DEFICIENTE POR AZOLVAMIENTO
CHIAPILLA	CHIAPILLA	CHIAPILLA	LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN	6.4	6.4	INFILTRACIÓN AL SUBSUELO Y REUSO EN RIEGO	SE REHABILITÓ EN 2004. OPERA DE FORMA DEFICIENTE POR AZOLVAMIENTO
COMITAN DE DOMINGUEZ	COMITAN DE DOMINGUEZ	COMITAN	LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN	210	210	RIO GRANDE	EN 2006 SE AMPLIÓ DE 140 A 210 L/S
FRONTERA COMALAPA	PASO HONDO	PASO HONDO	LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN	8.3	8.3	RIO GRANDE/SALINAS	OPERA DEFICIENTEMENTE POR AZOLVAMIENTO
ROSAS, LAS	ROSAS, LAS	LAS ROSAS	LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN	30	30	INFILTRACIÓN AL SUBSUELO Y REUSO EN RIEGO	SE REHABILITÓ EN 2004. OPERA EN FORMA DEFICIENTE POR AZOLVAMIENTO
SUCHIAPA	SUCHIAPA	SUCHIAPA	LAGUNAS DE ESTABILIZACIÓN	16	13	RIO SUCHIAPA	SE REHABILITÓ EN 2002. OPERA EN FORMA DEFICIENTE POR AZOLVAMIENTO
TRINITARIA, LA	TRINITARIA, LA	LA TRINITARIA	RAFA, WAB3 + HUMEDAL	7.5	7.5	SUMIDERO SAN FRANCISCO	INICIÓ OPERACIÓN EN 2005
TUXTLA GUTIERREZ	COPOYA	COPOYA	FILTROS BIOLÓGICOS O ROCADORES O PERCOLADORES	11	11	INFILTRACIÓN AL SUBSUELO	SE REHABILITÓ EN 2004
TUXTLA GUTIERREZ	JOBO, EL	EL JOBO	HUMEDALES (WETLAND)	6	3	INFILTRACIÓN AL SUBSUELO Y REUSO EN RIEGO	INICIÓ OPERACIÓN EN 2005
TUXTLA GUTIERREZ	TUXTLA GUTIERREZ	TUXTLA GUTIERREZ (PASO LIMÓN)	FILTROS BIOLÓGICOS O ROCADORES O PERCOLADORES	800	660	RIO SABINAL	SE REHABILITÓ Y AMPLIÓ EN 2004
UNION JUAREZ	SANTO DOMINGO	SANTO DOMINGO	FOSA SÉPTICA	4	4	RIO SUCHIATE	OPERA DEFICIENTEMENTE POR AZOLVAMIENTO
TOTAL DE PLANTAS:				11	1,169.26	953.20	

Tomada del Inventario Nacional de Plantas Municipales de potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación, Comisión Nacional del Agua, Méx. 2006.

## Métodos y tecnologías de tratamiento para el agua residual

En la actualidad existen una gran gama de tecnologías para el tratamiento del agua residual, los métodos individuales de tratamiento de aguas residuales se clasifican usualmente como:

- a. Operaciones físicas unitarias
- b. Procesos químicos unitarios
- c. Procesos biológicos unitarios.

Las operaciones de tratamiento implican una remoción, sin transformación de la materia removida es decir sin reacción al menos en ese instante, en tanto que en los procesos hay una remoción, a través de una transformación o reacción ya sea química o bioquímica (cinética) de la materia<sup>[1]</sup>.

## Operaciones físicas unitarias

Dentro de las operaciones físicas unitarias que básicamente remueven sólidos por medio físico, se encuentran:

- Cribado
- Mezclado
- Desarenado
- Sedimentación
- Flotación
- Filtración
- Transferencia de gases

## Procesos químicos unitarios

Para los procesos químicos unitarios que producen la remoción mediante la conversión y/o transformación (reacción química) de los contaminantes a través de la adición de compuestos químicos.

- Precipitación
- Adsorción
- Desinfección

## Procesos biológicos unitarios

Son métodos de tratamiento de agua residuales en los cuales la remoción de contaminantes se realiza a través de la actividad biológica.

- Se utiliza para remover sustancias orgánicas, coloidales o disueltas.
- La materia orgánica degradable se transforma en material celular (nuevas células o gases).
- Los procesos biológicos se usan también para remover nutrientes (nitrógeno y fósforo).

Dentro de los procesos biológicos existen dos vías para eliminar la contaminación de los efluentes<sup>[7]</sup>.

## Vía aerobia

Cuando el oxígeno esta asociado a las reacciones bioquímicas. Esta es la vía que espontáneamente se instaura en aguas suficientemente aireadas. El carbono orgánico es transformado en  $\text{CO}_2$ , y biomasa.

## Vía anaerobia

Cuando las reacciones bioquímicas se efectúan en ausencia de aire y en un medio reductor. Después de la degradación, el carbono orgánico, se encuentra en forma de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  y biomasa.

Otra subdivisión es la que se particulariza en la presencia o ausencia de aire, oxígeno o combinación de ellos y se distinguen cinco grupos principales de procesos biológicos

1. Procesos aerobios
2. Procesos anóxicos
3. Procesos anaerobios
4. Procesos aerobios-atóxicos – anaerobios combinados
5. Procesos por lagunas de oxidación

A su vez los procesos individuales se pueden subdividir en

1. Procesos con biomasa suspendida
2. Procesos con biomasa fija
3. Procesos mixtos

Por último de acuerdo a la calidad que se desea alcanzar en el efluente tratado, existe otra clasificación que, puede incluir operaciones físicas unitarias, procesos químicos unitarios y procesos biológicos unitarios o inclusive la combinación de ellos<sup>[9]</sup>.

## Tratamiento preliminar

Remoción del agua residual de los constituyentes que pueden causar problemas de operación y mantenimiento en los procesos y equipos auxiliares. Ejemplo remoción de material grueso por medio de rejillas.

## Tratamiento primario

Se eliminan los sólidos suspendidos y la materia orgánica, la remoción se lleva a cabo con operaciones físicas como la sedimentación.

## Tratamiento secundario

Se elimina la materia orgánica biodegradable y los sólidos suspendidos. La desinfección se incluye usualmente en tratamientos secundarios. Ejemplo: procesos biológicos por lodos activados, reactores con biomasa fija y lagunas.

## Tratamiento terciario o avanzado

Eliminación o control de nutrientes, generalmente se requiere de un control de nutrientes para descarga de agua a cuerpos cerrados donde la eutroficación puede ser causada o acelerada.

Descarga a corrientes donde la nitrificación puede consumir oxígeno y causar la proliferación de plantas acuáticas.

Recarga de acuíferos que pueden ser usados directamente para abastecimiento de aguas. Los nutrientes de interés son nitrógeno y fósforo y pueden ser eliminados mediante procesos químicos o biológicos o una combinación de ambos.

## Sistemas naturales

Los sistemas naturales para el tratamiento de aguas residuales se diferencian de los convencionales en la fuente de energía utilizada, los primeros usan fuentes renovables y los segundos fuentes no renovables, además, los naturales hacen uso intensivo del suelo y los convencionales uso intensivo de la energía <sup>[12]</sup>.

En el medio ambiente natural, cuando interaccionan el suelo, el agua, las plantas, microorganismos y la atmósfera, se producen procesos físicos, químicos y biológicos.

Con el objeto de tratar el agua residual, los sistemas naturales se diseñan para aprovechar esos procesos.

Los procesos que intervienen en los sistemas de tratamiento natural incluyen muchos de los utilizados en las plantas de tratamiento: sedimentación, filtración, adsorción, intercambio iónico, precipitación química, transferencia de gases, oxidación y reducción química y conversión y descomposición biológicas <sup>[13]</sup>. Junto con procesos propios de los sistemas de tratamiento natural tales como la fotosíntesis, foto oxidación y la asimilación por parte de las plantas a diferencias de los sistemas mecánicos, en los que los procesos se llevan a cabo de forma secuencial, en diferentes tanques y reactores a velocidades aceleradas como consecuencia del aporte energético, en los sistemas naturales los procesos se producen a velocidades naturales y tienden a realizarse de forma simultánea en un único reactor ecosistema.

Entre las tecnologías naturales se tienen dos grandes grupos: el primero, el sistema de aplicación sobre el terreno y el segundo los sistemas que utilizan plantas acuáticas flotantes y los pantanos construidos.

Los sistemas naturales se dividen en aplicación al terreno de baja carga, de infiltración rápida y de riego superficial y sistemas acuáticos: terrenos pantanosos (humedales) naturales y artificiales, y sistemas de tratamiento mediante plantas acuáticas.

## Los sistemas de aplicación sobre el terreno son: Sistemas de baja carga

Contempla la aplicación del agua residual sobre un terreno con vegetación para conseguir el grado de tratamiento así como crecimiento de la vegetación existente. El agua aplicada puede consumirse por evapotranspiración o percolar vertical u horizontalmente. Toda el agua que pueda fluir se recoge y se vuelve a aplicar al sistema. El tratamiento se da conforme se percola en el terreno. En la mayoría de los casos el agua percolada alcanzará las aguas subterráneas pero, en algunos casos, pueden ser interceptadas por aguas naturales superficiales o recuperada mediante sistemas de drenaje o pozos. El caudal aplicado por unidad de superficie de terreno (carga hidráulica) y la elección y el control del tipo de

vegetación dependen de la permeabilidad, la altura de columna del suelo hasta alcanzar las aguas subterráneas y la presencia de sistemas de roca.

## Infiltración rápida

La aplicación del agua para alcanzar el funcionamiento correcto es necesario que la permeabilidad del terreno sea mayor de 25 mm/h. los tipos de suelos aptos incluyen arenas, margas arenosas, y gravas. Las arenas y gravas gruesas presentan el inconveniente que permite la circulación a gran velocidad del agua en los primeros metros del suelo, donde se tiene la mayor actividad tanto química como biológica. Los suelos uniformes son preferibles, por operatividad y ensayos de campo.

Como condiciones de operación mínima (calma y cielo cubierto), características del suelo y del acuífero, y movimiento del agua en el terreno y en acuíferos adyacentes.

Pretratamiento; con el objetivo de reducir el sellado del suelo por obturación de los poros del mismo y evitar condiciones desagradables (olores). Mínimo recomendado es el tratamiento primario u otro equivalente.

## Sistemas de riego superficial

Como su nombre lo indica en este sistema el agua residual se “riega” utilizando métodos como: rociadores o aspersores, tubería con compuertas o ranuradas, las características del suelo con baja permeabilidad ( $< 15$  mm/h), aunque se ha observado que se trabaja en el rango de 15 a 50 mm/h.

Distancia a nivel freático como mínimo de 0.3 m, con topografía del terreno de pendiente uniforme de entre 1 y 8%, con climas preferentemente calidos, ya que los climas fríos pueden afectar negativamente el sistema; para obtener mejores resultados el agua debe ser tratada previamente, recuenta con reportes que el nivel mínimo de pretratamiento es el tamizado fino<sup>[18]</sup>.

Siempre existe la posibilidad de obturación de los utensilios utilizados para el riego por la película biológica que se forma en los conductos, por lo que se debe tener especial atención y limpieza de estos.

## Los sistemas acuáticos de tratamiento

### Sistemas de tratamientos mediante humedales

Los pantanos construidos o humedales artificiales, se definen como aquel sistema que pretende simular un humedal artificial, específicamente construido para tratar desechos, bajo condiciones controladas de ubicación, dimensionamiento y capacidad de tratamiento agua residual [14].

Algunas características que se deben de tomar en cuenta para la implementación de estos sistemas son: la topografía (uniforme horizontal o ligera pendiente 5%), suelo (permeabilidad  $< 0.5$  cm/h), riesgo de inundación, uso actual del terreno (agrícola próxima a terreno pantanoso), clima (se reportan en operación hasta a  $3^{\circ}\text{C}$ ) y el pretratamiento (del agua a tratar), selección y control de cubierta de vegetación.

Ventajas y desventajas:

Las ventajas que se atribuyen a los humedales artificiales con relación a los sistemas convencionales de tratamiento son:

1. Son relativamente económicos para construir y operar.
2. Es fácil obtenerlos.
3. Proveen tratamiento efectivo y real.
4. Son relativamente tolerantes a las fluctuaciones hidráulicas y de carga de contaminantes.
5. Tienen beneficios indirectos como espacios verdes, hábitat silvestre y áreas educacionales y recreativas.
6. Eficientes energéticamente.

Entre las desventajas relativas a los procesos convencionales están<sup>[10]</sup>:

1. Tienen relativamente grandes requerimientos de áreas para tratamiento avanzado.
2. Generalmente los criterios de diseño y operación no son precisos.
3. Hidráulica y biológicamente son complejos y falta por entender la dinámica del proceso.
4. Existe la posibilidad de plagas indeseables.

Se diferencian dos tipos de humedales, los FWS y los SFS, (por sus siglas en inglés).

## FWS

Sistemas de agua libre o de flujo libre con vegetación emergente, consistente en estanques o canales de poca profundidad de agua y baja velocidad.

## SFS

Sistemas libre de flujo lento, también conocidos como de lecho vegetal sumergido o de flujo subsuperficial; son sistemas de caudal bajo la superficie con vegetación emergente, consistente en una red de trincheras o lechos de drenaje, barreras contra escapes y bajas velocidades.

## Sistemas de tratamiento con plantas acuáticas

Estos sistemas consisten en uno o más estanques poco profundos en los que crecen una o más especies de plantas vasculares. La escasa profundidad y la presencia de microfitos acuáticos en vez de algas son las diferencias más importantes entre lagunas de estabilización y estos sistemas. Las plantas representan que el efluente del sistema sea de mejor calidad para tiempos de retención menor o iguales.

En estos sistemas el agua residual se trata mediante metabolismo bacteriano y sedimentación física

## Sistemas de tratamiento con plantas flotantes

Los sistemas habituales incluyen el jacinto y la lenteja de agua. El sistema se distingue por la capacidad de estas plantas de captar directamente  $\text{CO}_2$  y oxígeno requerido de la atmósfera, mientras que los minerales y nutrientes lo toman del agua. Esto último es común en plantas de raíces suspendidas.

## Sistemas de tratamiento con plantas sumergidas

Para estos sistemas típicamente se utilizan las plantas como el berro y la elodea mielenrama (*Myriophyllum*), y se distinguen por la capacidad de absorber  $\text{CO}_2$  y oxígeno, los minerales y los nutrientes de la columna del agua. Las plantas sumergidas se inhiben cuando la turbidez del agua es elevada puesto que la planta encargada de la fotosíntesis permanece por debajo de la superficie del agua.

## Sistemas convencionales

Los sistemas convencionales se han desarrollado y utilizado en países industrializados con el objetivo de prevenir la contaminación de los cuerpos de agua y los sistemas naturales en países en vías de desarrollo donde además es necesario reusar el agua, por ejemplo en riego agrícola, para proteger el recurso <sup>[8]</sup> y de manera general haciendo uso intensivo de la energía.

## Clasificación de los métodos de tratamiento de aguas residuales vía anaerobia

Los microorganismos anaerobios pueden estar en cultivos en suspensión o como una película adherida de cualquier manera, los reactores anaerobios se diseñan para optimizar el crecimiento microbiano. Existen diferentes sistemas, entre ellos se tienen:

Los sistemas de cultivo en suspensión

Los 3 tipos de reactores son:

1. Lagunas anaerobias
2. Contactores anaerobios
3. Reactores anaerobios zonales también conocidos como digestores

## Lagunas anaerobias

Se emplean cuando no se requiere un control estricto del proceso, ni alto grado de tratamiento, las variables físicas como la temperatura no se controlan y puede o no emplearse un clarificador, en función de tiempo de retención en el tanque y la calidad requerida para el efluente final.

## Contactores anaerobios

También conocido como “*Reactor de contacto*”, emplea una unidad de separación de sólidos por gravedad, para recircular los sólidos biológicos, como si se tratara de un proceso de lodos activados, sin embargo se emplea un desgasificador a vacío para eliminar el gas producido a la salida del reactor, y que interferiría con el proceso de sedimentación. El control del sistema reside en la adecuada sedimentación y recirculación de los sólidos al reactor principal.

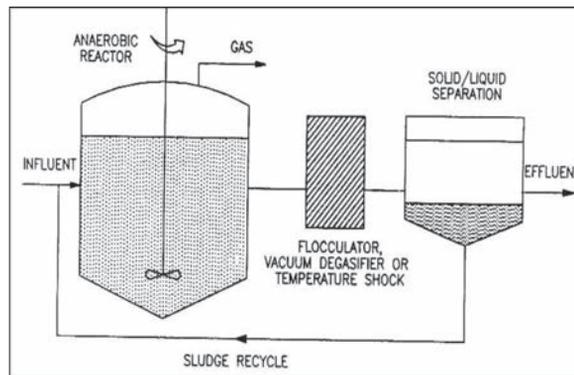


Figura 1. Reactor de contacto.

## Reactores anaerobios zonales (digestores)

Emplea una combinación de reactor anaeróbico con una unidad de separación de sólidos, de manera que el líquido clarificado (efluente) sobrenada el reactor el tiempo de contacto en el reactor se determina mediante el caudal y el volumen. La concentración de sólidos se contro-

la mediante el vaciado periódico de los sólidos biológicos mientras que la clarificación se mantiene ajustando la velocidad ascensional de flujo en vez de la velocidad de sedimentación de la biomasa. La técnica del control de los sólidos resulta ser el aspecto más crítico para el proceso.

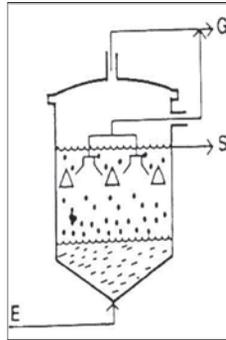


Figura 2. Reactor anaerobio zonal. Manto de lodos flujo ascendente

## Sistemas de cultivo fijo

Debido a las dificultades para la clarificación en los sistemas con biomasa en suspensión, los sistemas con cultivo fijo se emplean en agua que no posee sólidos en suspensión, se reconocen por lo menos tres tipos de estos sistemas:

1. Reactor anaerobio de flujo superior
2. Reactor anaerobio de flujo inferior
3. Reactor anaerobio de lecho fluidizado
4. Reactor anaerobio combinado

## Reactor anaerobio de flujo superior

Este tipo de reactor posee empaque o soporte para que la película biológica se adhiera a él, el material de empaque va desde madera hasta plásticos o rocas, con distribuciones al azar, que incluyen formas de anillos sueltos, de diversos tamaños o placas corrugadas dispuestas horizontal o verticalmente. El reactor contiene generalmente un espacio vacío para la recolección y eliminación de los sólidos.

## Reactor anaerobio de flujo inferior

En muchos sentidos este reactor es similar al reactor anaerobio de flujo superior, y la principal diferencia es que posee el empaque de manera únicamente vertical, el empaque puede ser placas corrugadas. Puede tratar agua residual con elevado contenido de sólidos en suspensión ya que todos los sólidos se arrastran a través del medio de soporte. El efluente tiene lugar en la parte inferior del equipo.

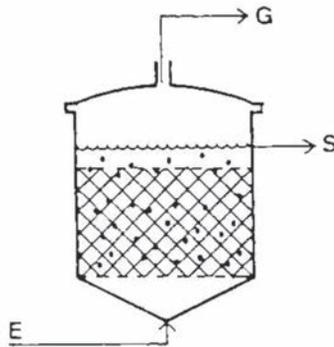


Figura 3. Reactor anaerobio de flujo inferior.

## Reactor anaerobio de lecho fluidificado

Opera en modo de flujo superior con una elevada proporción de recirculación del efluente, de entre 10 – 15 gpm/ft<sup>2</sup> y emplea como medio inerte.

Una variación de es el Reactor de lecho fluidificado inverso (LFI), Integrado de un cilindro con una relación L/D=13. Unido a él se encuentra un separador que tiene como función atrapar las partículas que se hayan desplazado del lecho. Éste a su vez se encuentra conectado a una bomba de recirculación por medio de la cual se obtiene la expansión del lecho y por lo tanto la fluidización. Cuenta además, con una bomba de alimentación. Por otra parte, se encuentra adaptado un colector de gas que está conectado al lecho y al separador de partículas, este colector se encuentra comunicado a un contador de biogás que mide el volumen producido.

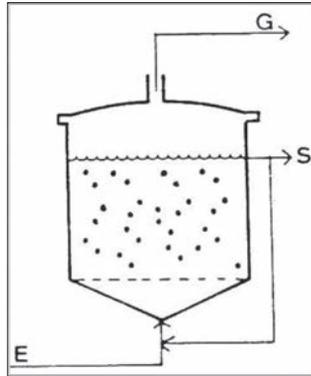


Figura 4. Esquema de reactor anaerobio de lecho fluidificado.

### Reactor anaerobio combinado

El tratamiento anaerobio también puede llevarse a cabo en un reactor que emplea al mismo tiempo cultivo en suspensión y soportado. Se trata de reactores de flujo superior con un espacio libre en la parte inferior para promover el cultivo en suspensión.

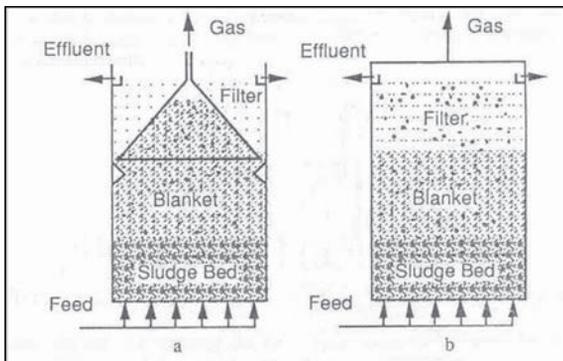


Figura 5. Diseño esquemático de reactor combinado.

La parte superior contiene un medio entrecruzado, con el objetivo de promover el crecimiento de los microorganismos soportados y proporcionar un entorno en que los microorganismos en suspensión sedimenten hacia la zona inferior del reactor, se conoce también como reactor híbrido.

## Clasificación de los métodos de tratamiento de aguas residuales vía aerobia

### Procesos en estanques o lagunajes

Existen una gran gama de sistemas lagunares, entre las que se encuentran; lagunas aerobias, lagunas facultativas, lagunas anaerobias y lagunas de maduración o terciarias.

Este proceso fue desarrollado por primera vez en Inglaterra en 1914, por Arden y Lockett, y su nombre proviene de la producción de una masa activada de microorganismos capaz de estabilizar un residuo por vía aerobia.

En el tratamiento biológico de aguas residuales mediante el proceso de lodos activados el residuo orgánico se introduce en un reactor, donde se mantiene un cultivo bacteriano aerobio en suspensión. El contenido del reactor se conoce con el nombre de licor mezclado.

En el reactor, el cultivo bacteriano lleva a cabo la conversión en concordancia general con la estequiometría de las ecuaciones de “oxidación y síntesis” y “respiración endógena”. (En dichas ecuaciones, COHNS representa la materia orgánica del agua residual).

En este proceso las bacterias son los microorganismos más importantes, ya que son los causantes de la descomposición de la materia orgánica del afluente; aunque también intervienen otros microorganismos como los protozoos y rotíferos que ejercen una acción de refinado de los efluentes.

### Las lagunas aireadas

Se desarrollaron a partir de lagunas de estabilización facultativas, en las que se instalaron aireadores de superficie para eliminar los olores que se producían al estar sometidos a sobrecargas orgánicas.

Este proceso es esencialmente el mismo que el de lodos activados de aireación prolongada convencional, excepto que se usa como reactor un depósito excavado en el terreno y el oxígeno se suministra mediante difusores o aireadores superficiales. La microbiología es similar a la de lodos activados. En estas lagunas es posible llevar a cabo el proceso de

nitrificación, tanto de forma estacional como continua; y el grado de nitrificación depende del diseño y funcionamiento del sistema y de la temperatura del agua residual.

Los factores que hay que tener en cuenta en el diseño de las lagunas aireadas son:

- La eliminación de la DBO, que se basa en el tiempo medio de retención celular (valores típicos entre 3 y 6 d), además la eliminación de  $DBO_5$  se mide en la entrada y salida de la laguna aireada.
- Las características del efluente, que revisten mayor importancia son la concentración de  $DBO_5$  y de sólidos suspendidos.

## Filtro percolador

Se puso en funcionamiento en Inglaterra en el año 1893. El concepto de filtro percolador se originó del uso de filtros de contacto, que eran estanques impermeables rellenos con piedra machacada.

El filtro percolador moderno consiste en un lecho formado por un medio filtrante al que se adhieren los microorganismos, y a través del cual percola el agua residual, fenómeno por el cual recibe nombre el proceso.

El medio filtrante suele estar formado por piedras (su diámetro oscila entre 2.5 y 10 cm), o diferentes materiales plásticos de relleno. La profundidad del lecho varía en cada diseño entre 0.9 y 2.5 m, con una profundidad media de 1.8 m. Los de medio filtrante de piedra suelen ser circulares y los de material plástico pueden ser circulares, cuadrados, o de otras formas y con profundidades entre 4 y 12 m.

La comunidad biológica está compuesta principalmente de bacterias facultativas, nitrificantes, aerobias, anaerobias, hongos, algas y protozoos.

Los principales factores a tener en cuenta a la hora de predecir el adecuado funcionamiento son las cargas orgánicas e hidráulicas y el grado de tratamiento.

Los filtros percoladores se clasifican en función de la carga orgánica en filtros de baja carga, filtros de media y alta carga, filtros de muy alta carga, filtros de desbaste, y filtros de dos etapas.

## Filtros de baja carga

Emplea roca como medio de soporte aplicando el agua residual mediante un distribuidor rotatorio. Es un dispositivo relativamente sencillo y de gran facilidad, que produce una calidad estable del efluente con independencia de la naturaleza cambiante del afluente.

Generalmente, se mantiene una carga hidráulica constante, no por recirculación, sino por medio de bombas con control del nivel de succión o con sifones dosificadores. Éstos bien operados pueden producir un efluente con un elevado nivel de alimentación de DBO y altamente nitrificado. El desprendimiento de olores es un gran problema, en especial si el agua residual es séptica o el clima es caluroso. No se deben ubicar en lugares que el desprendimiento de olores pueda ser un inconveniente.

## Filtros de media y alta carga

En estos filtros la recirculación del efluente del filtro o del efluente final permite la utilización de cargas orgánicas más elevadas. En los filtros de media carga el flujo del caudal al filtro suele ser continuo; y los de alta carga se proyectan para cargas notablemente superiores a las correspondientes a los filtros de baja carga, y el caudal es continuo, la recirculación ayuda a prevenir el encharcamiento y a reducir los problemas de olores y proliferación de moscas.

## Filtros de muy alta carga

Estos filtros de muy alta carga trabajan a altas cargas hidráulicas y orgánicas. Las principales diferencias entre estos y los de alta carga radican en las mayores cargas hidráulicas y la mayor profundidad.

## Filtros de desbaste

Son filtros de alta carga que se proyectan para trabajar con cargas orgánicas superiores a  $1,6 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{d}$  y cargas hidráulicas elevadas, superior-

res a  $187 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$  [15]. Se utilizan como pretratamiento del agua residual antes del tratamiento secundario, y usa medios plásticos. Se emplean principalmente para reducir la carga orgánica aplicada a los procesos posteriores y para obtener una nitrificación estacional. Tienen tendencia al uso de medios sintéticos, con profundidades entre 3.7 y 12 m. Su funcionamiento depende de la temperatura, y necesitan tasas altas de recirculación por las cargas hidráulicas elevadas. La actividad biológica es similar a la de un filtro percolador.

## Filtros de dos etapas

En el tratamiento de aguas residuales muy concentradas se suele usar un sistema de dos filtros en serie con un decantador intermedio para la eliminación de sólidos generados en el primer filtro. El filtro de la primera etapa y el clarificador reducen la DBO carbonosa y en la segunda etapa se produce la nitrificación.

## Sistemas biológicos rotativos de contacto o biodiscos (RCB)

Un biodisco consiste en una serie de discos circulares de poliestireno o cloruro de polivinilo, situados sobre un eje, a corta distancia unos de otros; los discos están parcialmente sumergidos en el agua residual y giran lentamente en el seno de la misma. Los biodiscos se pueden utilizar como tratamiento secundario, y también para la nitrificación y desnitrificación estacionales o permanentes. Son fiables debido a la gran cantidad de biomasa presente.

En el diseño de un sistema de biodiscos, se debe prestar atención a:

- La distribución en etapas de las unidades de biodiscos
- Los criterios de carga
- Las características del efluente
- Los tanques de sedimentación

Este diseño se basa en la DBO soluble por unidad de superficie ( $\text{kg DBO}_5/\text{m}^2$ ), o en el caso de la nitrificación ( $\text{kg NH}_3/\text{m}^2$ ), y se pueden diseñar para llevar a cabo tratamientos secundarios o avanzados.

Los problemas operacionales que presentan los sistemas de biodiscos están relacionados con la rotura del medio, fallos en los cojinetes de apoyo, y problemas de olores.

## El reactor secuencial por tandas (Sequencing Batch Reactor, SBR)

Sistema de lodos activados para tratamiento del agua residual que utiliza ciclos de llenado y descarga. En este sistema el agua residual entra en una tanda a un reactor único, recibe tratamiento para remover componentes indeseables y luego se descarga.

La homogenización de caudales, la aireación y la sedimentación se logran en ese reactor único. Para optimizar el desempeño del sistema, se utilizan dos o más reactores en una secuencia de operación predefinida. Los sistemas SBR han sido utilizados con éxito para tratar aguas residuales tanto municipales como industriales.

Estos sistemas son especialmente efectivos para aplicaciones de tratamiento de agua residual caracterizadas por caudales reducidos o intermitentes.

Los procesos de llenado y descarga por tandas, similares a los de reactores SBR no son un desarrollo reciente como se cree comúnmente. Entre 1914 y 1920 varios sistemas de llenado y descarga se encontraban en operación. El interés en los SBR se revivió a finales de la década de 1950 e inicios de la década de 1960 con el desarrollo de nuevos equipos y tecnología <sup>[16]</sup> (Las mejoras de los sistemas de aireación y de controles permitieron que los SBR compitieran con éxito con los sistemas convencionales de lodos activados.

Los procesos unitarios de los SBR y los sistemas convencionales de lodos activados son iguales. Un informe de la EPA de 1993 resumió esto al indicar que “los SBR son simplemente sistemas de lodos activados que operan en el tiempo en lugar del espacio”. La diferencia entre las dos tecnologías es que los SBR logran la homogenización de caudales, el tratamiento biológico y la sedimentación secundaria en un tanque único usando una secuencia de tiempo controlada. Este tipo de reactor realiza también, en algunos casos, la sedimentación secundaria. En un sistema convencional de lodos activados estos procesos serían realizados en tanques separados.

Una versión modificada de SBR es el sistema de aireación extendida de ciclo intermitente (Intermittent Cycle Extended Aeration System, ICEAS). En el sistema ICEAS el agua residual afluyente entra al reactor en forma continua.

Como tal, no es un sistema de SBR convencional. Una pared de deflexión puede ser usada en el ICEAS para dispersar el flujo continuo. Con esta excepción, las configuraciones de diseño de los ICEAS y los SBR son muy similares.

## Conclusiones

La disponibilidad natural media per cápita, que resulta de dividir el valor nacional entre el número de habitantes, ha disminuido de 18 035 m<sup>3</sup>/hab/año en 1950 a tan solo 4 416 en el 2006, a nivel nacional <sup>[3]</sup>, y es de esperar que en el estado Chiapas se observe el mismo fenómeno, aunado a lo anterior, el constante aumento en la generación de contaminantes que de manera inexorable llegan a todos los cuerpos de agua, esto plantea la urgente necesidad de trabajar en el tratamiento de las aguas residuales municipales; para que se detenga la tendencia negativa de disponibilidad de la misma. Por otro lado las tecnologías con que se cuenta en estos momentos, implican altos costos en cuanto al diseño construcción pero sobre todo la operación, a lo anterior se le suma que para operar estos sistemas se requiere personal en muchas ocasiones altamente capacitado.

Es imperante que se realice investigación en ese sentido para ofrecer sistemas de tratamiento que sean opciones viables y que posean las siguientes características:

1. Capaces de eliminar los contaminantes y cumplir con la normatividad vigente.
2. A costos alcanzables o razonables para la mayoría de las poblaciones usuarias.
3. La continuidad del proceso en cuanto garantizar la operatividad de los mismos.

Esto por que, en una entidad con rezagos históricos en el tratamiento de las aguas residuales de origen municipal y las condiciones socioeconómicas-políticas y de medio ambiente, se pensaría que los sistemas naturales de tratamiento son la opción ideal por las ventajas que ofrecen; sin embargo, los tratamientos naturales en su modalidad de “sistemas de aplicación sobre el terreno”, de acuerdo a estudios sobre la irrigación en el Valle del Mezquital (90,000 Ha) concluyen que esta práctica ha sido de gran beneficio para la región por la grandes cosechas que se levantan gracias al agua y a la materia orgánica y nutrientes que contiene. Los metales que contiene el agua no se absorben en las plantas pero se acumulan en las capas superficiales del suelo, que tiende a salinizarse lentamente. Estos problemas no deben eludirse, sin embargo los más importantes son los de: salud pública ocasionados por la gran cantidad de bacterias fecales y huevos de helmintos que transporta el agua y la calidad de las aguas subterráneas ocasionados por la lixiviación de nitratos y otras sales<sup>[17]</sup>. Por tales motivos no son una opción viable para el tratamiento de las aguas residuales por si solos.

## Bibliografía

1. Iniciativa Latinoamericana y Caribeña para el Desarrollo Sostenible. Indicadores de seguimiento: México 2005.
2. CNA. 2005. Estadísticas del agua en México. 2005. México. 2005. Comisión Nacional del Agua. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales.
3. CONAGUA. 2007. Estadísticas del Agua en México, 2007. Comisión Nacional del Agua. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales.
4. CONAGUA. 2006. Inventario Nacional de Plantas Municipales de potabilización y de Tratamiento de Aguas Residuales en Operación, Comisión Nacional del Agua. Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales.
5. Agenda estadística, Chiapas 2001.
6. CNA. 2004. Lineamientos técnicos para la elaboración de estudios y proyectos de agua potable y alcantarillado. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Octubre 2004.
7. Corbitt, Robert A., Manual de referencia de la Ingeniería Ambiental. Editorial Mc Graw Hill

8. Williams, J., Bahgat. M., May, E., Ford, M. & Bullet, J. 1995. Mineralisation and pathogen removal in gravel bed hydroponic. Constructed wetlands for wastewater treatment. *Wat. Sci. Tech.* Ppg 49-58
9. Manual del Participante “Tratamientos de Aguas Residuales Domésticas e Industriales” UNAM – UNICACH, Marzo 2005.
10. Bastian, R.K., and D.A. Hammer. 1993. The Use of Constructed Wetlands for Wastewater Treatment and Recycling. *In* G.A. Moshiri (ed.), *Constructed Wetlands for Water Quality Improvement*, CRC Press, Boca Raton, FL. Ppg 59-68
11. Apuntes de la primera parte del curso taller, “Criterio de diseño y evaluación de plantas de tratamiento de aguas residuales municipales” junio de 2002
12. Metcalf & Eddy, Inc.: *Wastewater Engineering: Treatment, Disposal, Reuse*, Segunda Ed. Mc Graw Hill. 1979
13. Keily, Gerard, *Ingeniería ambiental, Fundamentos entornos, tecnologías y sistemas de gestión*. Editorial Mc Graw Hill. ppg 669-757.
14. Universidad de Texas, 1993, *Tratamientos naturales para agua residual municipal*, 1993.
15. Monroy O., Cervantes F., Viniegra G., Castilla P., Meraz M., *Biotecnologías para el Tratamiento de las Aguas Residuales de la Ciudad de México*, Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa.
16. United States Office of Water EPA 832-F-99-073. Environmental Protection Agency, Washington, D.C. Septiembre de 1999. Folleto informativo de tecnología de aguas residuales reactores secuenciales por tandas.

17. Gutierrez Ruiz, M., Siebe Ch y Sommer I.(1995) Effects of Land Application of Wastewater From Mexico City Soil Fertility and Heavy Metal Accumulation: a bibliographical review, *Environ Rev.* 3: ppg, 318-330 .
18. Metcalf & Hedí, Ingeniería de aguas residuales, Tratamiento, Vertido y Reutilización, tomo II, editorial Mc Graw Hill. ppg 1051-1150.
19. Nodal Becerra, Elida, (2001) Procesos Biológicos Aplicados al Tratamiento de Agua Residual, *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, Vol. XXII, No. 4.



## V. El manejo de los residuos sólidos no peligrosos

M.I.A. Hugo Alejandro Nájera Aguilar

### Introducción

**H**oy en día, en los centros urbanos del territorio nacional, los problemas en materia ambiental que se presentan son múltiples, y por lo regular están relacionados con la contaminación del aire, carencia de infraestructura para el tratamiento de las aguas servidas, afectación del suelo y de los acuíferos -afectados por malos manejos en los residuos peligrosos y no peligrosos-; sólo por citar algunos de los más importantes. A lo anterior, se suma el inusitado y desordenado crecimiento demográfico registrado en las últimas décadas, que se traduce en una alta demanda de servicios, acompañada del incremento en los niveles de marginación y de un decremento de la calidad de vida; fenómeno urbano que a su vez, presiona los ecosistemas ambientales, afecta la biodiversidad y deteriora los recursos naturales, poniendo en riesgo sobremanera, la calidad de vida de generaciones futuras además de la productividad del suelo y la calidad de los acuíferos.

En el presente trabajo se abordan las etapas que comprende el manejo de uno de los rubros que más trascendencia tiene hoy en día por las repercusiones que causa al ambiente; nos referimos a los residuos sólidos, y en particular, a los catalogados como no peligrosos y que cualquier individuo genera constantemente.

Cada una de las etapas reviste gran importancia y son temas de amplia discusión, en especial la generación, almacenamiento, recolección

y la disposición final, dado a que estas cuatro siempre estarán presentes no importando los volúmenes de basura producidos ni en tamaño de la población. Sin embargo, dado los alcances y objetivos del trabajo, sólo se abordarán los aspectos más trascendentes del manejo de los residuos sólidos no peligrosos, y se hará mayor énfasis en la etapa que más problemas de contaminación ocasiona, como lo es la disposición final. Asimismo, considerando la trascendencia de esta etapa, se comentará de manera general la situación que observan los municipios del estado de Chiapas con respecto a la forma de disponer la basura y el grado de cumplimiento con la normatividad ambiental.

## Antecedentes

Desde las sociedades primitivas hasta las modernas, el hombre ha empleado los recursos de la tierra para vivir y ha dispuesto sus residuos en ella. En las primeras, la generación de residuos no representaba un problema dado a que las poblaciones eran pequeñas, nómadas y con residuos predominantemente de naturaleza orgánica que fácilmente podían reincorporarse al suelo. En las sociedades actuales esto no sucede.

Así, los problemas de disposición de residuos aparecen en el tiempo en que las primeras agrupaciones de personas se hacen sedentarias y comienzan a formar poblados con la consecuente acumulación de basura.

Con el advenimiento de la Revolución Industrial, se incrementa el problema ocasionado por los residuos sólidos ya que se incorporan nuevos materiales, muchos de los cuales no son de naturaleza orgánica, o bien, si lo son pero refractarios. Es así, que acompañado de los beneficios de la tecnología vinieron los problemas ocasionados por los subproductos resultantes, no sólo del producto final, sino también de los generados durante las diferentes etapas de los procesos industriales. De esta manera, la Revolución Industrial significó el inicio de una sociedad tecnificada con crecientes problemas por la generación y disposición de residuos.

Es claro hoy en día, que una de las formas de reducir la cantidad de desechos sólidos a disponer, es limitar el consumo de las materias primas, hacerlas más biodegradables e incrementar las tasas de reci-

claje y revalorización de los residuos. A pesar de la simplicidad de los esquemas, se ha probado que efectuar estos cambios en una sociedad tan tecnificada, es tarea -hasta ahora- muy difícil de llevar a la práctica, con una sociedad cada vez más absorbida por la falsa cultura del “útese y tírese” impulsada por la voracidad del actual sistema del mundo capitalista que prácticamente controla el planeta.

## Residuos sólidos ¿qué son y cómo se clasifican?

Cualquier actividad desarrollada por el hombre, desde sus funciones vitales hasta las más superfluas, producen diversos materiales que no son susceptibles de utilizarse de forma directa en la misma actividad y por tal razón son considerados residuos<sup>[1]</sup>. Existen muchas definiciones de residuos sólidos, todas con el común denominador de percibirlos como materiales indeseables para quien los generó, y con la necesidad de deshacerse de ellos. A continuación se citan algunas de ellas.

De acuerdo con la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos “se entiende por residuo sólido cualquier basura, desperdicio, lodos y otros materiales sólidos generados o resultantes de las actividades industriales, comerciales y de la comunidad. No incluye sólidos o materiales disueltos en las aguas domésticas servidas o cualquier otro contaminante significativo en los recursos hídricos, ni los sedimentos, ni los sólidos suspendidos o disueltos en los efluentes de aguas servidas industriales, ni los materiales disueltos en las aguas de los canales de descarga de la irrigación, ni otros contaminantes comunes en el agua”.

Una definición menos extensa pero igual de completa es la siguiente: “los residuos sólidos son todos los desechos que surgen de las actividades humanas y animales, que normalmente son sólidos y que se desechan como inútiles o no requeridos”<sup>[1]</sup>.

La definición anterior es clara, un material se convierte en desecho una vez que éste no represente valor alguno en el espacio y tiempo donde se haya producido. De esta manera, lo que para algunos es material de desecho, para otros puede significar la materia prima que, a través de un proceso de conversión, pueda revertir su efecto nocivo por un beneficio adicional para las actividades productivas que lo generan.

En lo referente a las definiciones manejadas en el territorio nacional, destacan las siguientes:

La Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA)<sup>[2]</sup> en su Art. 3ro. Frac. XXXI define el término de residuo como “cualquier material generado en los procesos de extracción, beneficio, transformación, producción, consumo, utilización, control o tratamiento cuya calidad no permita usarlo nuevamente en el proceso que lo generó”.

Ahora bien, de acuerdo con la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR), un residuo “es todo material o producto que se desecha, que puede encontrarse en estado sólido o semi-sólido, líquido o gaseoso, estar contenido en recipientes o depósitos, y ser susceptible de valoración o sujetarse a tratamiento o disposición final”.

Por su parte en LGPGIR al igual que en la Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003<sup>[3]</sup>, a partir de lo que hasta antes del año 2003 se conocía como Residuos Sólidos Municipales, se derivaron los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) y los Residuos de Manejo Especial (RME); los primeros son definidos como “los generados en las casas habitación, que resultan de la eliminación de los materiales que utilizan en sus actividades domésticas, de los productos que consumen y de sus envases, embalajes o empaques; los residuos que provienen de cualquier otra actividad dentro de establecimientos o en la vía pública que generen residuos con características domiciliarias, y los resultantes de la limpieza de las vías públicas y lugares públicos”. En tanto que los segundos, son concebidos como “los generados en los procesos productivos, que no reúnen las características para ser considerados como peligrosos o como RSU, o que son producidos por grandes generadores de RSU”.

En cuanto a su clasificación, existen muchas formas de hacerlo; una de las más sencillas es agruparlos según su fuente de generación: domiciliarios, agrícolas, agropecuarios, industriales, de aeropuertos, etcétera. Ahora bien, toda esta gama de residuos sólidos pueden quedar integrados en dos grandes grupos: residuos sólidos peligrosos y no peligrosos. Estos últimos, la LGPGIR los clasifica en RSU y RME. Asimismo, la Ley en su Art. 18 subclasifica a los RSU en orgánicos e inorgánicos con objeto de facilitar su separación primaria y secundaria, de conformidad con los programas estatales y municipales que se establezcan.

Por su parte los RME de acuerdo con el Art. 19 de esta Ley, quedan subclasificados en diez fracciones, donde quedan comprendidos los residuos de las rocas o los productos de su descomposición; los de servicios de salud, con excepción de los biológico-infecciosos; los de actividades agrícolas, pesqueras, silvícolas, forestales, avícolas y ganaderas; los de servicios de transporte; los lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales; los de centros comerciales; los de construcción y demolición en general; y los residuos tecnológicos provenientes de las industrias.

## Efectos de los residuos sólidos en el medio ambiente

El manejo de los residuos sólidos en general, representa un problema común para todas las poblaciones y cuya magnitud está directamente relacionada con las cantidades de residuos producidos; a mayor generación, mayor complejidad del problema. Por ejemplo, la generación de residuos sólidos urbanos depende de la población y del proceso de urbanización. En América Latina, en 1975, la población urbana ascendía a 192,026,000 (61%) y en el 2005 a 420,768,000 (77%)<sup>[4]</sup>. O sea, en 30 años la población que requería servicios de limpieza urbana creció más del 110%. En este aspecto, México no es la excepción. De acuerdo al Instituto Nacional de Ecología, de los 103,263,388 habitantes registrados en el año 2005<sup>[5]</sup>, la población urbana ascendió a más del 70% y por lo tanto, se requiere de esquemas para dotar a las poblaciones de servicios apropiados de limpieza urbana, para alcanzar una gestión integral adecuada en el manejo de los residuos sólidos.

Desafortunadamente, la problemática que envuelve el manejo de los residuos sólidos se ha agudizado en las últimas décadas, y es a partir del inicio de los años 90, cuando las autoridades competentes comienzan a tomar cartas en el asunto al percatarse de la magnitud y consecuencias que trae consigo el manejo inadecuado de los residuos. Los cuales, día a día adquieren mayor importancia, con una generación ascendente como consecuencia del crecimiento demográfico acelerado, de los cambios de hábito de consumo, de un mejor nivel de vida, así como de un desarrollo industrial. Hasta hace unos 50 años la generación de residuos por persona era de 0.300 Kg/hab/día, mientras que para el año 2004 era de 0.900

Kg/hab-día<sup>[6]</sup>, y para el año 2006 se estima una generación de 0.679 Kg/hab/día para zonas rurales y 1.339 Kg/hab/día en zonas urbanas<sup>[7]</sup>. Pero el problema no radica solamente en la cantidad, sino también en la calidad o composición, que pasó de ser densa y casi completamente orgánica a voluminosa, menos biodegradable y con porcentajes ascendentes de materiales tóxicos. Todo ello ha contribuido a una contaminación creciente del medio ambiente y al deterioro de los recursos naturales.

Sin lugar a dudas, el impacto mayor por el manejo de los residuos sólidos se tiene en la etapa de disposición final, cuya práctica común en el territorio nacional ha sido los denominados Tiraderos a Cielo Abierto (TCA), donde los residuos se depositan sobre el suelo sin control alguno, generando por este hecho una serie de agresivos efectos hacia el hombre y el medio en el que se desarrolla. En primer término se tiene la decadencia del paisaje; el impacto estético no es sólo del sitio en sí, sino que además diversos objetos ligeros contenidos en los residuos sólidos son esparcidos por el viento, afectando áreas vecinas. El aire se contamina cuando los incendios se producen, el humo afecta la visibilidad y provoca irritaciones nasales, así también, se suman las afectaciones pulmonares por los malos olores generados durante la descomposición bajo condiciones predominantemente anaerobias, de la materia orgánica presente.

La contaminación de las aguas tanto superficiales como subterráneas es la afectación más seria y menos reconocida por el vertido de la basura al suelo, ocurre por el proceso de formación de un líquido llamado lixiviado, el cual se produce durante la descomposición de los desechos y por efecto del paso del agua de lluvia a través de ellos. Algunos autores<sup>[8]</sup> definen al lixiviado como el agua de lluvia que pasa a través del sitio de disposición final (SDF) además del líquido que se genera en la degradación de los desechos dentro de un relleno sanitario. Otros autores<sup>[9]</sup> definen a estos líquidos como aguas residuales complejas generadas cuando el contenido de humedad o de agua de los residuos sólidos en un relleno sanitario, es mucho mayor a su capacidad de campo.

Los lixiviados provienen de desechos muy heterogéneos en composición y arrastran todo tipo de contaminantes, muchos de ellos en concentraciones elevadas, por lo que es catalogado como uno de los más complejos y difíciles de tratar<sup>[10]</sup>, al contener desde concentraciones ele-

vadas de contaminantes orgánicos e inorgánicos incluyendo ácidos húmicos, nitrógeno amoniacal y metales pesados, hasta sales inorgánicas<sup>[8,11]</sup>.

Asimismo, no hay que olvidar que un SDF no controlado resulta ser un hábitat ideal para el desarrollo y proliferación de cierta fauna nociva para el hombre, como son: moscas, mosquitos, cucarachas y ratas; todos ellos vectores biológicos, transmisores de una serie de enfermedades, por lo que representan un peligro a la salud pública.

Por otro lado, la presencia de pepenadores en estos sitios, procurando obtener algunos materiales que le sean de cierta utilidad, para reusarlos o comercializarlos, ocurriendo todo ello en condiciones de insalubridad y vergonzosa marginación, le da a la problemática ambiental antes descrita, un sesgo social pocas veces considerado en los programas tendientes a mejorar la gestión para el manejo de la basura. Con las actividades de pepena y segregación practicadas por estos grupos, se recuperan diversos materiales, como son: plásticos, papel, cartón, vidrio, latas y fierro, con tasas verdaderamente marginales.

De lo anterior se desprende la necesidad de implantar sistemas de manejo que reduzcan los impactos antes citados. Estos sistemas involucran todas las actividades asociadas con la gestión de los residuos sólidos dentro de la sociedad; desde la generación, almacenamiento in situ, recolección, transferencia y transporte, recuperación y/o tratamiento, hasta la disposición final<sup>[1]</sup>.

## Normatividad aplicable

El Comité Consultivo Nacional de Normalización para la Protección Ambiental, se divide en VIII subcomités. El subcomité III trata la Normatividad relacionada con los Residuos Municipales, Materiales y Residuos Peligrosos. Como se mencionó en párrafos anteriores, los Residuos Municipales hoy en día son manejados bajo los términos de RSU y RME.

En lo referente a la normatividad existente para el manejo de los RSU, se resumen los siguientes puntos.

El artículo 115 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos otorga el poder a los municipios para manejar de forma autónoma sus residuos sólidos urbanos.

Por su parte, en la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA)<sup>[12]</sup> en su Capítulo IV “Prevención y Control de Contaminación del Suelo” se establecen los siguientes artículos al respecto:

Art. 134. Prevención y control de la contaminación del suelo por residuos.

Art. 135. Ordenación urbana, servicio de limpia y sitios de disposición final.

Art. 137. Autorización del funcionamiento de sistemas de recolección, transporte, tratamiento y disposición final de los residuos sólidos urbanos (RSU) y residuos de manejo especial (RSM).

Art. 139. Contaminación por lixiviados.

Art. 140. Disposición de residuos de lenta degradación.

Mientras que la Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR) en su artículo 10 estipula que los municipios tienen a su cargo la Gestión Integral de los RSU y RME. Esta Ley dentro del artículo 5 define a esta actividad como las acciones que desarrolla la autoridad municipal para manejar y gestionar adecuadamente los RSU y RME de su comunidad. De igual manera, en dicho artículo el Manejo Integral de los Residuos es concebido como la parte técnica de la gestión integral e incluye a todos los aspectos relacionados con los RSU y RME.

En suma, la LGPGIR reglamenta las disposiciones de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos en lo que se refiere a la protección al ambiente, en materia de prevención y gestión de los residuos, y establece bases para: principios de valorización, responsabilidad compartida, manejo integral, criterios de gestión integral, mecanismos de coordinación entre entidades, mercado de subproductos, participación de la sociedad, creación de sistemas de información referentes a gestión de RSU y RME, prevención de la contaminación de sitios, fortalecimiento de la innovación tecnológica, establecimiento de medidas de control y seguridad, entre otras<sup>[13]</sup>.

Ahora bien, la actividad de disposición final, etapa donde ocurren los procesos de estabilización y transformación de los residuos sólidos dentro de los SDF, con la consecuente generación de los subproductos de mayor riesgo -biogás y lixiviados-<sup>[14,15]</sup>, se encuentra regulada por la Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003 la cual

establece las “Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un SDF de RSU y RME”. De acuerdo con esta Norma, los rellenos sanitarios se categorizan según la cantidad de RSU y RSM que reciben diariamente, tanto de domicilios, comercios e industrias (no peligrosos), como de los servicios de limpieza de calles y lugares públicos. La norma fue publicada el 20 de octubre de 2004 y entró en vigor a partir del 19 de diciembre del mismo año.

Por otro lado, también existen Normas Mexicanas cuyo objetivo es el de estandarizar procedimientos tales como: NMX-AA-15-1985 Muestreo-Método de cuarteo, NMX-AA-19-1985 Determinación del peso volumétrico “*in situ*”, NMX-AA-22-1985 Selección y cuantificación de subproductos, NMX-AA-61-1985 Determinación de la generación, entre las principales.

## Etapas del manejo de los residuos sólidos

Para evitar los efectos negativos de los RSU y RME en la salud de la población y en el medio ambiente, debe brindarse una gestión y manejo integral de los residuos. Este último, tal y como se estableció en el apartado 5, trata la parte técnica de la gestión integral e incluye a todos los aspectos relacionados con los RSU y RME<sup>[13]</sup>, en otras palabras, el manejo de los residuos sólidos puede definirse como “la disciplina asociada con el control de la generación, almacenamiento, recolección, transferencia y transporte, procesamiento y disposición final de residuos sólidos de una manera que sea acorde con los mejores principios de salud pública, economía, ingeniería, conservación, estética y otras consideraciones ambientales”. Cada una de las etapas funcionales que forman el sistema de manejo de residuos sólidos está íntimamente relacionada con las otras, como se muestra en la figura 1.

En la figura 1 puede observarse que el flujo seguido por las flechas que relacionan las cajas en oscuro, son los esquemas de manejo de residuos sólidos que comúnmente han operado en el territorio nacional, lo que ha tenido efectos nada favorables para el ser humano y en general para los seres vivos. Dentro de las principales consecuencias se tienen:

mayor explotación de recursos naturales para la síntesis de nuevas materias primas, saturación de los SDF con materiales orgánicos de baja biodegradabilidad, reducción en la vida útil de los SDF, mayor afectación al suelo, aire y cuerpos de agua por la emanación de lixiviados y biogás, entre los principales.

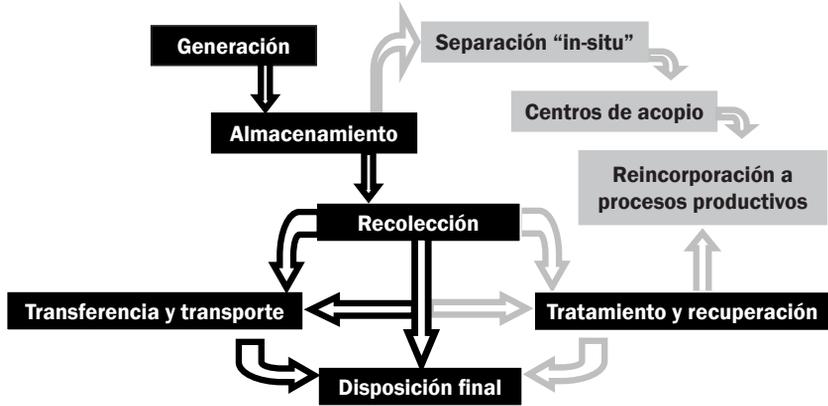


Figura 1. Diagrama simplificado del manejo de los residuos sólidos. (Fuente: Adaptado de Tchobanoglous *et al.*, 1994)

En los últimos años -aunque lentamente- estos esquemas se han ido modificando para algunas ciudades, en gran parte por las nuevas políticas de los tres órdenes de gobierno, que se han percatado de la magnitud del problema por el manejo inadecuado de los residuos sólidos, especialmente en su disposición final. Se ha impulsado la valorización y separación de subproductos -en algunos casos desde la misma fuente-, actividades de reciclaje desde la etapa de recolección, instalación de mayores centros de acopio, y la conducción de subproductos hasta los procesos productivos, es decir, se ha seguido el flujo de materiales indicado por las flechas de color gris, con lo que se disminuye en parte, las consecuencias adversas arriba mencionadas.

Hay mucho de qué hablar en cada una de las etapas del manejo de residuos sólidos, pero el objetivo del trabajo no es profundizar en cada una de ellas, por lo que a continuación solo se abordará su definición e importancia dentro del sistema.

## Generación

La generación constituye la primera etapa del manejo de los residuos sólidos, en la que todo individuo participa de manera directa desde el momento en que se producen materiales indeseables o no requeridos, y por lo mismo, son desechados. En otras palabras, la generación hace referencia a la cantidad de desechos producidos por unidad de fuente generadora en un período de tiempo dado.

Las unidades con las cuales se representa la generación, están en función del origen de los desechos. Por ejemplo, la generación de residuos de procedencia domiciliaria, se expresa en Kg/hab-día. Expresión que puede ser aplicable a los residuos comerciales, o bien, la de Kg/# clientes. Mientras que la generación de origen industrial, se expresa en Kg/unidad de producción o Kg/m<sup>2</sup>.

Ahora bien, las tasas de generación para los RSU y RME se ven afectadas por diversos factores, como son: localización geográfica, estación del año, frecuencia de recolección, poder adquisitivo de la población, operación de pepena y reciclaje, legislación, características de la población, entre los principales.

Para determinar la cantidad generada de ellos, pueden emplearse diferentes métodos:

- Análisis de conteo de carga
- Análisis peso volumen
- Análisis de balance de materiales
- Muestreo simple estratificado

Los dos primeros, presentan la desventaja de que se analiza sólo lo que se recoge, es decir, los residuos que llegan al sitio de disposición final. Por lo tanto, con estos dos métodos no se analiza lo que realmente se genera. Sin embargo, son métodos que se adecuan a las necesidades de la legislación en el País, dado que la cantidad de residuos sólidos a la que hace referencia la Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMAR-NAT-2003 dentro de las cuatro categorías con las cuales clasifica a los Rellenos Sanitarios, se refiere a la cantidad de basura que se recibe en el SDF y no la que se genere en el lugar de estudio.

El tercer método tiene más aplicación en industrias, donde puede tenerse un mejor control de las entradas y salidas del proceso. Por último, el cuarto método es el que más aplicación ha tenido, y se encuentra regido por la Norma Técnica NMX-AA-61-1985 -Determinación de la generación de residuos sólidos-.

## Almacenamiento y reducción en la fuente

Se refiere a la acción de almacenar temporalmente en el punto de generación la basura producida en tanto se entrega al servicio de recolección. En el caso de casas-habitación, los recipientes de almacenamiento son pequeños y su capacidad puede variar desde los 10 hasta 100 litros aproximadamente. De igual manera, el material de los recipientes es diverso, predominado las bolsas de polietileno y los botes de plástico rígido.

Para puntos de mayor generación tales como mercados, panteones, restaurantes, plazas comerciales, entre otros, se disponen desde tambos de 200 litros de capacidad -de plástico o metálico- hasta cajas metálicas contenedoras (fig. 2). Durante esta etapa, se ven involucrados aspectos de salud pública y estética, en cuanto al manejo en la fuente y el procesamiento “*in situ*”.

El manejo en la fuente involucra todas las actividades asociadas con el manejo de los residuos sólidos hasta que se depositan en recipientes utilizados para su almacenamiento antes de su recolección.

En el procesamiento “*in situ*”, lo que se persigue es la reducción del volumen de los materiales, alterar su forma física y la recuperación de subproductos que puedan ser reincorporados a los sistemas de producción.



Figura 2. Contenedor metálico para una fuente de alta generación (panteón mpal. SCLC).

De acuerdo con algunos autores<sup>[16]</sup>, según el lugar, el almacenamiento puede ser del tipo domiciliario, institucional o industrial.

## Recolección

Esta actividad consiste en retirar los residuos sólidos de las diferentes fuentes de generación y trasladarlos a puntos de concentración donde se vacía el contenido de los vehículos de recolección, como pueden ser una estación de transferencia (ET) o el SDF; la primera, puede acompañarse de actividades de segregación de subproductos para posteriormente trasladar los residuos descartados para su reciclaje, al SDF del lugar. En el territorio estatal opera únicamente una ET.

La recolección de residuos sólidos en áreas urbanas es una tarea difícil y compleja, debido a que la generación de los RSU y RME es un proceso difuso que tiene lugar en cada casa, edificio de departamentos y en cada instalación comercial e industrial, así como en las calles, parques, panteones y mercados. Adicionalmente, el crecimiento desordenado de la población y en zonas con topografías del terreno poco accesibles, con caminos de terracería en mal estado, pendientes pronunciadas, un solo sentido, etc., ha complicado la tarea de recolección.

Los problemas logísticos asociados a la recolección se hacen cada vez más complejos debido a que los patrones de generación se vuelven más difusos y a que la cantidad total de residuos sólidos se incrementa.

Aunque estos problemas han existido siempre en alguna medida, ahora resultan más críticos debido a los altos costos de los combustibles y la mano de obra. De la cantidad total del presupuesto asignado al Sistema de Aseo Urbano -recolección, transporte y disposición final-, se gasta alrededor del 50% en la operación de recolección cuando en el servicio se incluye transferencia; el 75% sin transferencia y, del 90% cuando la disposición final se realiza en un tiradero a cielo abierto (TCA)<sup>[17]</sup>. Este hecho es muy importante ya que una pequeña mejora en la operación de recolección puede representar un ahorro sustancial en los costos totales del manejo de los RSU y RME.

Existen diferentes tipos de servicios de recolección: el de acera, recolección de callejuela, llevar y traer, el de llevar, el que se le proporciona a comercios e industrias, etc. Con respecto a este último, es muy difícil definir cualquier tipo de servicio que sea representativo, debido al hecho de que la recolección de residuos sólidos industriales depende de la localidad y del tipo de industria. Por lo general, se utilizan grandes contenedores con aditamentos para moverlos y/o compactadores estacionarios.

En los servicios comerciales en los cuales se utilizan contenedores con ruedas, los contenedores cargados se llevan manualmente al vehículo de recolección y se vacían también manualmente. Debido al gran peso involucrado, otra forma es la recolección directa. Cuando se utilizan contenedores muy grandes, toda la operación se realiza por medios mecánicos.

**Sistemas de recolección.** Los sistemas de recolección de residuos sólidos pueden clasificarse desde muchos puntos de vista, tales como modo de operación, equipo utilizado, y tipos de desechos recolectados. Tchobanoglous *et al.*<sup>[1]</sup> clasifican a los sistemas de recolección según su forma de operación en dos categorías: sistemas de transporte de contenedores y sistemas de contenedores estacionarios. El primero se refiere a los sistemas de recolección en los cuales los contenedores utilizados para almacenar los desechos se transportan al sitio de disposición, se vacían y se devuelven a su ubicación original o a alguna otra. Estos sistemas son ideales para la remoción de desechos producidos en fuentes de alta tasa de generación, debido al tamaño relativamente grande de los contenedores utilizados. Una de las ventajas de los sistemas de

transporte de contenedores es su flexibilidad, ya que están disponibles en muchas formas y tamaños para todo tipo de desecho.

Los sistemas de recolección en los cuales los contenedores o recipientes utilizados para almacenar los desechos permanecen todo el tiempo en el punto de generación, con excepción de los viajes cortos ocasionales que realizan al vehículo de recolección, se conoce como sistema de contenedores estacionarios. Los cuales, pueden ser utilizados para la recolección de todo tipo de desechos. Estos sistemas pueden variar según el tipo y la cantidad de desechos que se requiere manejar, así como por el número de puntos de generación. Existen dos tipos principales: sistemas de carga mecánica y sistemas de carga manual.

De acuerdo con la SEMARNAT y la GTZ<sup>[7]</sup>, dentro de la recolección pueden distinguirse tres grupos:

- El barrido o limpieza de la vía pública
- La domiciliaria o recolección directa en casas, comercios, etcétera
- La especializada

Los dos primeros grupos queda claro qué tipo de residuos se recolectan. La tercera hace referencia a residuos inadecuados para trasladar al SDF; por ejemplo, escombros, electrodomésticos, mobiliario, etcétera, así como los RME, que generalmente carecen de programas específicos y terminan en terrenos baldíos, barrancas y derechos de vías.

**Rutas de recolección.** Son los puntos de generación que recorre un vehículo para recolectar los residuos sólidos. En el diseño de rutas deben considerarse ciertos factores dentro de los cuales destacan los siguientes:

1. Identificación de políticas y reglas relacionadas con la recolección (métodos, puntos de recolección y frecuencias).
2. Coordinación de equipo y condiciones existentes (tales como el tamaño de la cuadrilla y el tipo de vehículo).
3. Cuando sea posible, las rutas se deben diseñar de forma tal que empiecen y terminen cerca de calles o avenidas con buena circulación, utilizando las barreras físicas como fronteras de ruta.
4. Topografía. En áreas de topografía irregular, las rutas deben empezar en la parte más alta e ir recolectando hacia la parte más baja, para evitar que el vehículo cargado suba cuestas pronunciadas.

5. Fin de ruta. El último punto de recolección de la ruta debe de estar localizado lo más cerca posible de la estación de transferencia o del SDF.
6. Densidad del tráfico. Los residuos que se recolectan en zonas de mucho congestionamiento vehicular, deben cubrirse lo más temprano posible en el día, o bien, mediante recolección nocturna.
7. Fuentes de alta generación. El servicio de recolección en zonas de alta generación de residuos debe proporcionarse durante la primera parte del día.
8. Fuentes de poca densidad de población y poca generación. En lo posible, se debe considerar el servicio en un viaje, o al menos el mismo día.

### Estaciones de transferencia (ET)

El empleo de ET no es nada nuevo; cuando se establecieron los primeros sistemas de recolección de residuos sólidos, las ET eran una necesidad, ya que el servicio se prestaba en pequeños vehículos de tracción animal, por lo que era necesario un lugar donde estos vehículos depositaran sus residuos de manera temporal, para transferirlos posteriormente a vehículos de mayor capacidad y trasportarlos fuera de la población. Con el advenimiento de los vehículos automotores las ET cayeron en desuso. Actualmente, el crecimiento desordenado de las poblaciones, la carencia de espacio para ubicar sitios de tratamiento y disposición final de residuos cercanos a las poblaciones y los aumentos en los costos de adquisición de los vehículos de recolección, gasolina, lubricantes y mano de obra, ocasionan que en muchos casos el empleo de ET sea una necesidad.

El objetivo central de una ET es el de incrementar la eficiencia global del servicio de recolección de residuos sólidos, y puede definirse como el conjunto de instalaciones y equipos donde se lleva a cabo el transbordo de los residuos sólidos, de vehículos recolectores de menor capacidad a camiones de mayor capacidad de carga, conocidos como vehículos de transferencia. A través de éstos últimos, se efectúa el transporte final de la basura de la ET hasta el sitio de disposición final.

Con la operación adecuada de la ET, no solamente se logra reducir el tiempo ocioso de mano de obra, sino también los costos y tiempos de transporte de los residuos sólidos. Estos ahorros se deben básicamente a las causas siguientes:

- El tiempo improductivo de transporte de los camiones de recolección se reduce, debido a que ya no tienen que viajar hasta su destino final, con lo cual se obtiene un ahorro en los costos unitarios de operación.
- Al reducirse el kilometraje recorrido por los vehículos de recolección, se origina un ahorro en los costos de operación.
- Los costos de mantenimiento de la flotilla de camiones recolectores se reducen, debido a que las unidades que la integran, ya no transitarán más hasta el SDF, lugar en donde por lo general sufren daños las suspensiones, muelles, ejes y llantas, acentuándose dichos daños en época de lluvias.

Además de las ventajas anteriores, una ET ofrece las siguientes:

- Una mayor regularidad en el servicio de recolección de los residuos sólidos, por un mayor control ejercido sobre las unidades, así como por la disminución de la ocurrencia de desperfectos mecánicos de menor grado
- Al transitar únicamente los camiones de transferencia hasta el SDF, se reduce la contaminación atmosférica ocasionada por los gases de combustión interna de las unidades.
- Se reducen las afectaciones a la salud pública al minimizarse la generación de olores ofensivos, acarreo de moscas y la anulación de dispersión de residuos en las unidades recolectoras cargadas, al no transitar más hasta el SDF.

Las ET pueden ser de tres tipos: descarga directa, indirecta y combinada. En la primera, los residuos sólidos de los vehículos recolectores son transbordados mediante vaciado por gravedad a los camiones descubiertos, cuya capacidad varía de 25 a 60 m<sup>3</sup>. En la segunda, los residuos antes de ser descargados a los vehículos de mayor capacidad, son colocados en áreas de clasificación para la recuperación de subpro-

ductos. Mientras que la combinada, es el resultado de una mezcla de las primeras. En la figura 3 puede verse los componentes de una ET de descarga directa.

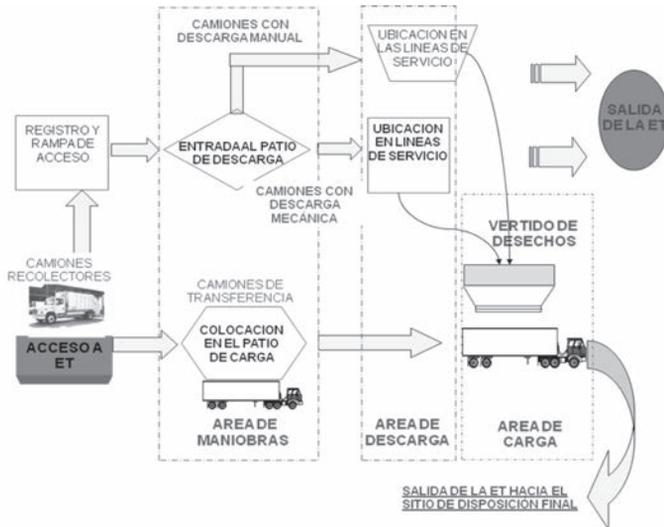


Figura 3. Componentes de una ET de descarga directa.

## Tratamiento y recuperación

Existen diferentes opciones de recuperación y tratamiento de residuos sólidos, tales como la trituración, compactación, la incineración, el composteo, el vermicomposteo, entre otros. En este apartado se tratarán las principales características de algunos de ellos.

**Compactación.** Las compactadoras pueden reducir el volumen original de los residuos hasta un 70%, solamente se pueden utilizar para una pequeña proporción de los residuos sólidos generados. Aunque el uso de estos equipos reduce el volumen en bruto de los residuos que hay que manejar, el peso, por supuesto, sigue igual.

La compactación es muy importante en instalaciones comerciales. Como la mayoría de los procesos son muy específicos de cada industria, no se ha hecho ningún intento de documentación respecto a los múltiples procesos que se utilizan.

**Trituración.** Es un proceso unitario por el que se reduce mecánicamente el tamaño de los materiales residuales recogidos. Se utiliza el término trituración para describir las operaciones mecánicas de reducción de tamaño. El objetivo de la reducción de tamaño es obtener un producto final que sea razonablemente uniforme y considerablemente reducido en tamaño comparándolo con su forma original. Hay que resaltar que la reducción en tamaño no implica necesariamente una reducción en volumen. En algunas situaciones, el volumen total del material puede ser mayor que el volumen original después de la reducción en tamaño.

El equipo utilizado para la reducción de tamaño incluye trituradoras para vidrio, madera, plásticos, etcétera. Uno de los equipos más comunes utilizados para reducir el tamaño de los residuos sólidos en el molino de martillos.

Hoy en día, esta operación representa una opción muy atractiva para la gente involucrada con las actividades de reciclaje, dado que con ella se reducen los costos en almacenamiento y transporte de los subproductos segregados.

**Incineración.** La incineración puede definirse como el proceso térmico de los residuos sólidos mediante oxidación química en presencia de oxígeno, donde puede reducirse el volumen de los residuos (alrededor del 90%) y su peso (en 75%) con la posibilidad de recuperar energía.

La incineración de los sólidos no es en realidad una forma de eliminarlos, porque la mayor parte de las sustancias sólidas contienen elementos combustibles que dejan cenizas residuales. Dentro de los principios básicos que rigen la combustión de los residuos sólidos se encuentran los siguientes:

- Exceso de aire
- Utilización mínima de aire de inyección inferior
- Utilización adecuada del aire secundario
- Temperatura
- Volumen suficiente de combustión
- Tiempo de permanencia

La operación de un incinerador provoca la producción de diversas emisiones gaseosas y partículas, muchas de las cuales se piensa que

pueden tener graves impactos sobre la salud, a pesar de que la contaminación sigue siendo una preocupación importante en la implantación de este tipo de sistemas, se pueden cumplir los requisitos más estrictos sobre control de contaminación atmosférica, sin embargo, el costo de la tecnología es aún elevado.

Entre las emisiones de contaminantes de los incineradores de residuos sólidos reguladas en Estados Unidos, otros países de Europa y en México con la Norma Oficial Mexicana NOM-098-SEMAR-NAT-2002<sup>[18]</sup>, se cuentan el CO, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, partículas, los metales, los gases ácidos, las dioxinas y furanos.

**Composteo.** Uno de los procesos de conversión biológica más populares e importantes es el composteo, y se concibe como aquél en el cual la materia orgánica alcanza su estabilidad bajo condiciones controladas y en un menor tiempo que el requerido bajo condiciones no controladas<sup>[19]</sup>. La degradación es llevada a cabo por el metabolismo catabólico de una serie sucesiva de microorganismos, abarcando desde bacterias mesofílicas y termofílicas hasta hongos mesofílicos. El desarrollo de este proceso permite la destrucción de microorganismos patógenos, lo cual es de gran importancia, pudiéndose manejar cualquier desecho de naturaleza orgánica; el producto final puede emplearse como mejorador de suelos<sup>[16,20]</sup> o material de cobertura en rellenos sanitarios<sup>[21]</sup>.

Durante el proceso de composteo, están activos diversos microorganismos aerobios facultativos y obligados. El proceso se caracteriza por la presencia de temperaturas altas con la consecuente remoción de patógenos, ausencia de olores, y estabilización más rápida de los desechos<sup>[22]</sup>.

El composteo aerobio funciona en ambas regiones de temperatura, entre 30 y 38°C en la etapa mesofílica y en el rango de 50 y 60°C en la fase termofílica<sup>[1]</sup>.

Respecto a la tecnología empleada en el proceso, existen 3 métodos: el de hilera, el de pila estática aireada y el de biorreactor; los dos primeros se realizan a cielo abierto, y el de bioreactor es un sistema cerrado donde el proceso se desarrolla dentro de un digestor.

Como en todo proceso, se tendrán factores que deberán controlarse para el buen funcionamiento del sistema. En el composteo se tienen dos tipos de factores: los ambientales y los relacionados al sustrato. En

el grupo de los primeros, se encuentran la disponibilidad de oxígeno, temperatura, contenido de humedad y pH, mientras que en los segundos, la naturaleza del mismo, su porosidad y tamaño, y la disponibilidad de nutrientes.

Abordar cada uno de estos factores es amplio, por lo cual solo se menciona la importancia de los más relevantes.

**Disponibilidad de oxígeno.** Este factor durante el proceso es de primordial importancia, ya que el composteo es una oxidación biológica, en la cual es usado por los microorganismos como receptor terminal de electrones para la respiración aerobia, y la oxidación de varios tipos de sustancias presentes en los materiales<sup>[23]</sup>.

Las necesidades de oxígeno dependen de la composición de los desechos, de su naturaleza y estructura, así como del tamaño de partícula. Por ejemplo, una combinación de desechos altamente biodegradables con una población microbiana vigorosa demanda una cantidad mucho mayor de oxígeno que una combinación de materiales refractarios con poblaciones poco densas<sup>[16]</sup>.

Aunque en teoría se sabe que la cantidad de oxígeno requerido es determinado por la cantidad de carbono a ser oxidado, es imposible llegar a una cantidad precisa de oxígeno requerido sobre las bases del contenido de carbono en los desechos, ya que una fracción desconocida de carbono se convierte a material celular y otra de naturaleza refractaria permanece inaccesible para los microorganismos<sup>[19]</sup>.

**Contenido de humedad.** El contenido de humedad permisible y la disponibilidad de oxígeno se encuentran estrechamente interrelacionados<sup>[16]</sup>. Cuando el agua excede al valor permisible, el aire contenido entre los intersticios de los desechos se ve desplazado por las partículas de agua, presentándose zonas anaerobias, lo que propicia un descenso de temperatura y la producción de olores ofensivos<sup>[24]</sup>.

Aunque el contenido de humedad óptimo en el composteo varíe y esencialmente dependa del estado físico y del tamaño de las partículas<sup>[23]</sup>, se considera un rango entre 50 a 60%<sup>[1]</sup>.

**Temperatura.** Durante el proceso se pueden observar 4 etapas: mesofílica, termofílica, enfriamiento y maduración, con un perfil típico como el mostrado en la figura 4<sup>[25]</sup>.

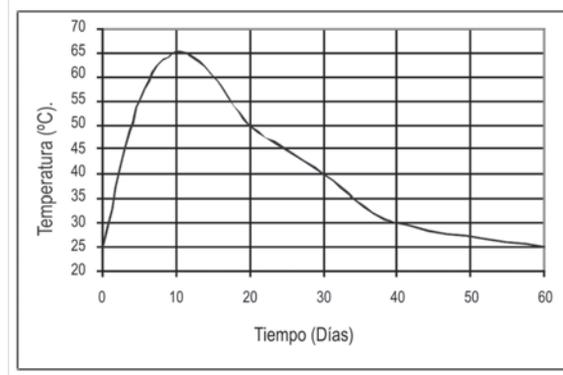


Figura 4. Curva típica del perfil de temperatura durante el proceso de composteo.

La etapa mesofílica ( $<40^{\circ}$ ) es promovida por la disponibilidad inicial de nutrientes, donde los microorganismos participantes presentan una gran actividad reflejándose en el carácter exponencial del incremento de temperatura<sup>[19]</sup> con una duración de 24 a 72 hrs. Al pasar el umbral de  $40\text{-}45^{\circ}\text{C}$ , los microorganismos mesofílicos, dejan de participar activamente, dando paso a los microorganismos responsables de la fase termofílica.

Dependiendo del sistema empleado y de la naturaleza de los desechos, el período termofílico ( $50\text{-}65^{\circ}\text{C}$ ) puede persistir de una a tres semanas y luego comenzar a declinar gradualmente hasta alcanzar la temperatura ambiente. Durante este período es necesario alcanzar temperaturas altas para la destrucción de patógenos. De acuerdo con la EPA, la pila debe exponerse a temperaturas de  $55^{\circ}$  durante 48 horas para destruir la microflora patógena<sup>[1]</sup>.

Cuando los materiales de fácil degradación (azúcares, almidones, otros) han sido composteados, los materiales refractarios prevalecen, y la actividad microbiana disminuye acompañada del descenso en la temperatura, lo que señala el inicio de la etapa de enfriamiento<sup>[19]</sup>. Las temperaturas registradas durante este período permiten el desarrollo de eumicetos y actinomicetos, los cuales son los principales descomponedores de polímeros de cadena larga, celulosa y lignina<sup>[26]</sup>. La finalización de esta etapa se presenta cuando la temperatura de la pila se aproxima a la del ambiente o la iguala<sup>[27]</sup>.

Después de la etapa de enfriamiento o estabilización inicia la fase de maduración. La cual se asocia con el potencial de crecimiento de las plantas o la fitotoxicidad<sup>[28]</sup>.

**Relación carbono-nitrógeno (C/N).** De los requerimientos nutricionales para los microorganismos, la relación carbono-nitrógeno contenida en los desechos es el factor más importante. Los microorganismos al utilizar los compuestos orgánicos como fuente de energía, convierten 2/3 partes de carbono a dióxido de carbono. El carbono remanente pasa a formar parte de la pared o membrana celular, protoplasma y productos de almacenamiento. Respecto al nitrógeno, los microorganismos lo emplean únicamente en la formación de nuevas células, por ello, durante el proceso de composteo los microorganismos requieren mucho más carbono que nitrógeno<sup>[19]</sup>, lo que explica el descenso en la relación C/N a lo largo del proceso.

Para que los microorganismos puedan utilizar correctamente la combinación de nutrientes, estos deben encontrarse en proporciones adecuadas. Por lo regular, muchos autores consideran 25 partes de carbono por 1 de nitrógeno<sup>[1,16]</sup> o 30 partes de carbono por 1 de nitrógeno<sup>[24]</sup>. A estas proporciones se les conoce como la relación óptima de nutrientes en el proceso de composteo.

En general, materiales que son verdes y húmedos tienden a contener mucho nitrógeno, y aquellos que son cafés y secos presentan un alto contenido de carbono. En la tabla 1 se citan algunos de ellos.

Tabla 1. Materiales con alto contenido de carbono y materiales ricos en nitrógeno<sup>[29]</sup>.

<b>Materiales con alto contenido de carbono</b>	<b>Relación C/N</b>	<b>Materiales con alto contenido de nitrógeno</b>	<b>Relación C/N</b>
Hojas de otoño	30-80:1	Residuos vegetales	15-20:1
Paja	40-100:1	Residuos de café	20:1
Trozos de madera y aserrín	100-500:1	Recortes de hierbas	15-25:1
Corteza	100-130:1	Estiércol	5-25:1
Papel de periódico o cartón	560:1		

## Disposición final

La disposición final se entiende como la última actividad en la cual los residuos son descargados en forma definitiva; los principales métodos son los siguientes:

1. Vertido a corrientes de agua o al mar
2. Tiraderos a cielo abierto
3. Relleno sanitario

La disposición de los residuos a cuerpos de agua es inaceptable ambientalmente debido al desequilibrio ecológico que se produce, sobre todo por la generación excesiva de nutrientes y carga orgánica aportada al agua, dando lugar a la eutroficación de los cuerpos de agua.

Los tiraderos a cielo abierto, aunque no es un método de disposición adecuado, es el más utilizado en los municipios del país, además, es el método más antiguo para la disposición de los residuos sólidos urbanos. Cuando la basura se acumula en un lugar como éste, sin haber recibido tratamiento alguno, originan muchas afectaciones al entorno y representan un riesgo de salud pública. Las principales repercusiones de esta práctica de disposición inadecuada, ya fueron comentadas anteriormente.

De los métodos citados, el único ambientalmente aceptable, es el relleno sanitario, ya que diseñado, construido y operado en forma correcta, los impactos al entorno y los riesgos a la salud, se reducen casi en su totalidad.

La necesidad de atender la disposición final de los residuos sólidos es un asunto que no puede seguir postergándose, ya que según indicadores de la Organización Panamericana de la Salud/Organización Mundial de la Salud, válidos para la región de América Latina, es paradójicamente la actividad a la que, por un lado, se le destinan menos recursos humanos y económicos, mientras que, por otro lado, es la que implica un mayor daño a la salud pública y un alto riesgo ambiental.

Así, el relleno sanitario se concibe como un conjunto de instalaciones utilizadas para la disposición segura y fiable a largo plazo de los residuos sólidos, diseñadas, construidas y operadas con el fin de minimizar los im-

pactos ambientales y efectos negativos que ésta pudiera tener sobre la salud pública. En el relleno sanitario se utilizan principios de ingeniería para lograr el confinamiento adecuado de los residuos sólidos.

En términos generales, la técnica del relleno sanitario consiste en depositar la basura por capas sobre una superficie impermeabilizada, distribuyéndola y compactándola con maquinaria pesada, para reducir su volumen y maximizar así la vida útil del relleno. Diariamente se aplica una capa de material inerte que sirve de cubierta, sobre la celda diaria de basura, preferentemente material del sitio, con lo que se evita la proliferación de vectores sanitarios y de malos olores.

La descomposición de los residuos genera subproductos que pueden salir ya sea en forma de líquidos o gases; los primeros, también llamados lixiviados, deben ser adecuadamente manipulados, para evitar que contaminen el medio ambiente; los segundos o comúnmente denominados biogás, constituye un interesante recurso energético si es que se canaliza y explota apropiadamente.

Una forma de clasificar a los rellenos sanitarios está relacionada con la forma de operación de los mismos, en este caso se tienen 3 tipos: el de zanja o trinchera, el de área y el combinado; el primero, es aplicable cuando el nivel freático en el sitio no está cercano a la superficie, los espesores de suelo son de fácil excavación y el mismo material de excavación se aprovecha como cubierta diaria; el segundo, es recomendado para superficies relativamente planas o en aquellas donde no sea factible excavar, o bien, el nivel de aguas freáticas se encuentre muy cercano a la superficie; finalmente, el tercer tipo, como su nombre lo dice, es una combinación de los dos primeros. Lógicamente, cualquiera de estos rellenos sanitarios, demandan obras de control como son los sistemas de impermeabilización -naturales o sintéticos- para el control de lixiviados y pozos de venteo para el control del biogás.

## El manejo de los residuos sólidos en el territorio nacional y estatal

En las últimas décadas, el problema de la explosión demográfica y el desarrollo tecnológico en el país, ha estimulado un cambio en los hábitos de consumo de la población con la falsa cultura del consumismo, inci-

diendo en la generación de grandes cantidades de residuos sólidos en los asentamientos humanos, lo que ha rebasado la capacidad de la naturaleza para neutralizar los problemas de contaminación ambiental.

Al igual que sucede con la mayor parte de las localidades del país, en el estado de Chiapas, el manejo de los residuos sólidos no peligrosos generalmente involucra las etapas de generación, almacenamiento, recolección y disposición final, excepto en algunas ciudades por arriba de los 100 mil habitantes, en las cuales se cuenta con ET. En el caso del estado de Chiapas, únicamente la ciudad de Tuxtla Gutiérrez cuenta con una ET.

A continuación se abordan aspectos generales observados en cada una de estas etapas y que se repite en menor o mayor escala en los municipios del territorio nacional y en prácticamente la totalidad de los municipios de la entidad, esto de acuerdo con información generada por el extinto Instituto de Historia Natural y Ecología (IHNE, 2004), ahora Secretaría de Medio Ambiente, Desarrollo Urbano y Vivienda (SEMADUVI).

Así, las extintas dependencias estatales en materia ambiental -Secretaría de Ecología, Recursos Naturales y Pesca (SERNyP) y el IHNE-, entre los años de 1995-2001 realizaron estudios de generación en las 18 cabeceras municipales principales del estado, tomando como referencia la metodología establecida en la Norma Mexicana NMX-AA-61-1985. Asimismo, efectuaron estudios de macro ruteo y micro ruteo para el mejoramiento de los sistemas de recolección en seis ciudades del estado.

De igual manera, en otras ciudades a partir del 2001 se realizaron estudios de macro localización de sitios para la disposición final de los residuos sólidos y cursos de capacitación en el área.

Por otro lado, a partir del año 2003 se realizaron diagnósticos en materia de residuos sólidos para ciertas regiones del estado, así como evaluaciones técnicas de ubicación conforme a la normatividad ambiental aplicable.

Los datos y resultados más relevantes de toda esta serie de estudios realizados en el Estado, pueden resumirse como sigue.

- La generación per cápita domiciliar oscila entre 0.3989 y 0.9417 Kg/hab-día.

- La generación per-cápita total promedio en el estado hacia el año 2003 era de 0.8769 Kg/hab-día, mientras que para el año 2007 de acuerdo con lo proyectado, se encuentra en 1.04 Kg/hab-día.
- Considerando la generación per cápita promedio del año 2003 y la población en el Estado, la cantidad de basura estimada era de 3,645 ton/día, mientras que para el 2007 puede alcanzar cerca de las 4,700 ton/día.
- El peso volumétrico promedio de los residuos sólidos es de aproximadamente 197 Kg/m<sup>3</sup>. Dato importante para calcular el número de unidades de recolección necesarias así como la capacidad de equipos contenedores.
- En cuanto a la composición de los residuos domiciliarios, la materia orgánica sigue siendo en principal subproducto, con una aportación del 57.7%.

En lo relacionado al servicio de recolección y transporte se destaca lo siguiente:

- En la mayoría de las localidades, el número de unidades disponibles para la recolección no son suficientes ni adecuadas. Aunque en las principales ciudades se cuenta con un trazo de rutas de recolección, con prioridad hacia las zonas de alta tasa de generación.
- El estado actual de las unidades de recolección van en su mayoría de regular a malas, producto de la ausencia de programas de mantenimiento preventivo y correctivo, a lo se suma las condiciones poco adecuadas de los caminos y las largas distancias que los vehículos recorren hasta llegar al SDF.
- La frecuencia de recolección es en promedio de 2 veces/semana, sin embargo, en muchas localidades de la Entidad se ofrece 1 vez/semana, e incluso, el servicio llega a ser mensual o hasta bimestral, lo que favorece la creación de tiraderos clandestinos.
- Por lo general, el personal de las cuadrillas de recolección no se encuentra capacitado y no cuenta con el equipo de protección personal mínimo ni con servicios médicos.

- Las áreas encargadas del servicio de limpia municipal no cuentan con la infraestructura suficiente para la prestación del servicio, con excepción de las principales ciudades como es el caso de Tuxtla Gutiérrez.
- Arriba del 50% de las localidades evaluadas, no cuentan con centros de acopio o de reciclaje.
- Únicamente en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez se cuenta con una ET, en la que además se efectúan actividades de recuperación de subproductos. Mientras que otras ciudades como San Cristóbal de Las Casas, carecen de este tipo de instalaciones, cuando ya son necesarias.

En cuanto a la situación de la disposición final, la práctica común continúan siendo los tiraderos a cielo abierto (fig. 5), con más del 96% de los sitios operando como tales. En el apartado siguiente se comenta más ampliamente la situación de la disposición final de los residuos sólidos en el territorio estatal.



Figura 5. Tiradero a cielo abierto con actividades de “pepena”.

## La disposición final de los residuos sólidos

La disposición final de los RSU y RME en nuestro País se encuentra regulada por la Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003, la cual dicta a que prácticamente todos los sitios operen como rellenos

sanitarios, clasificándolos en 4 categorías en función de las toneladas de basura que el SDF reciba: categoría A para mayor a 100 ton/día; B entre 50 y 100 ton/día; C entre 10 y menos de 50 ton/día; y finalmente, categoría D si recibe menos de 10 ton/día. De tal manera, que de los 118 municipios del estado, el 2.5% pertenecen a la categoría A, alrededor del 1.7% a la B, cerca del 21% a la C, y el resto cae dentro de la categoría D.

Desafortunadamente, la disposición final predominante de los RSU y RME en el territorio estatal y en general, en el País, se lleva a cabo mediante tiraderos a cielo abierto (TCA), donde los residuos se depositan sobre el suelo sin control alguno, generando por este hecho una serie de agresivos efectos hacia el hombre y los elementos ambientales en el que se desarrolla, al afectar la calidad del aire, la calidad paisajística del sitio, el impacto hacia el suelo y subsuelo, además de la posible afectación a los recursos hídricos tanto superficiales como subterráneos.

De acuerdo con Orta, *et al.*<sup>[14]</sup>, en términos generales, los impactos de mayor riesgo son representados por los lixiviados y el biogás, subproductos de los procesos de estabilización y transformación que sufren los residuos sólidos dentro del SDF. De estos subproductos, considerando los volúmenes de generación de residuos y las condiciones de nuestra región, los lixiviados representan la afectación más seria y por lo regular menos reconocida al ser líquidos potencial y altamente contaminantes de las corrientes líquidas. El lixiviado se genera como resultado de la percolación del agua y de otros líquidos a través de cualquier desecho. Así, el lixiviado puede definirse como el líquido que es producido cuando el agua u otro líquido entra en contacto con los desechos<sup>[30]</sup>.

Cabe mencionar, que tanto el biogás como los lixiviados se producen tanto en rellenos sanitarios como en sitios controlados y no controlados, con la única y gran diferencia de que en estos últimos, los subproductos quedan fuera de control con las repercusiones antes mencionadas. Lo que no sucede cuando un SDF opera como relleno sanitario conforme a la norma.

## Rellenos sanitarios en el territorio nacional y tratamiento de subproductos

Los rellenos sanitarios que operan en el territorio nacional son pocos si se considera la totalidad de ciudades con las que cuenta el País, aunado a lo anterior, no todos dan cumplimiento con los lineamientos principales contemplados en la Norma, específicamente los relacionados con los sistemas de impermeabilización. Por ejemplo, hasta el año 2007, en el País existían alrededor de 67 rellenos sanitarios de los cuales únicamente 10 contaban con lagunas de evaporación. En el resto, los lixiviados escurren libremente pudiendo contaminar cuerpos de agua de los alrededores, como son los casos siguientes: en el relleno sanitario de Culiacán, Sinaloa, los líquidos fluyen hasta alcanzar el arroyo “La Loma” afluente del río “Humaya”. Otro caso se tiene con el SDF de la ciudad de Chapala, Jalisco, de donde escurren los lixiviados hacia un riachuelo que llega a la presa San Nicolás de Ibarra, localizado a 2 Km del sitio, y cuya agua es utilizada para regar sembradíos de maíz, jitomate, chícharos y ejotes, entre los principales. Problemas similares se tienen con los rellenos sanitarios de Tlaquepaque y Tonalá en el estado de Jalisco e Islas Mujeres en Quintana Roo<sup>[31]</sup>.

Dentro de los rellenos sanitarios que cuentan con laguna para la evaporación de los lixiviados y recirculación de los mismos a estratos de basura y plataformas de celdas, se tienen al de las ciudades de Mérida, Durango, Nuevo Laredo, Puebla, León, Aguascalientes, Monterrey, rellenos del Distrito Federal y del estado de México -Tlanepantla, Bordo Poniente, Tecamac, entre los principales-. La acción de utilizar la evaporación y recirculación de los lixiviados como sistema de tratamiento, se encuentra en discusión dada la generación de aerosoles y de otros compuestos peligrosos con la subsecuente exposición de los trabajadores, además de otros impactos negativos tales como posibles daños a la vegetación<sup>[32]</sup>. Por ello es necesario proporcionar tratamientos adecuados a los lixiviados, como los utilizados en las aguas residuales convencionales -sistemas biológicos o fisicoquímicos-.

Del total de rellenos sanitarios existentes en el país, únicamente los de Tlanepantla -estado de México- y de Bordo Poniente -Distrito Fede-

ral- cuentan además de lagunas de evaporación de lixiviados y sistemas de recirculación, con otros sistemas de tratamiento. El primero, emplea un serpentín de seis Km de longitud para acelerar la evaporación en los lixiviados; el segundo, utiliza un proceso fisicoquímico -la única planta de tratamiento de lixiviados en Latinoamérica- para tratar los lixivios maduros que se producen en la zona conocida como primera etapa del relleno que comprende una superficie de 70 Ha.

En lo relacionado con el manejo de Biogás, prácticamente en la totalidad de los rellenos antes mencionados, no se lleva a cabo el aprovechamiento del mismo, excepto en rellenos como los de Monterrey y Aguascalientes. En otros, únicamente se quema -como el de Tecamac, Estado de México-, mientras que en la mayoría solo se ventea.

### La disposición final de los RSU y RME en el estado de Chiapas

Concretamente para el caso del estado de Chiapas, se estima que el 96.32% de las cabeceras municipales depositan su basura en TCA sin tomar en cuenta las condiciones mínimas necesarias para localización y operación de los sitios destinados como tales. El 3.68% restante, lo disponen en entierros, denominados técnicamente como rellenos de cubierta<sup>[33]</sup>, dentro de los cuales se encuentran los SDF de San Cristóbal de las Casas, Palenque, Tapachula y Tuxtla Gutiérrez. Aunque este último, a partir del mes de Mayo del 2008, comenzó a operar como relleno sanitario categoría A, por lo que representa uno de los dos rellenos sanitarios que actualmente se registran en la entidad.

El tratamiento que en este relleno sanitario se le brinda a los principales subproductos -biogás y lixiviados-, cae dentro de la práctica común de lo que se hace en el país, esto es, los lixiviados se recolectan en una laguna de evaporación para posteriormente realizar regados periódicos a los cuerpos de basura en la celda -proceso de recirculación-, en tanto que para el biogás, solo se cuenta con pozos verticales para el venteo de los mismos.

## Acciones realizadas en el territorio estatal y alternativas de tratamiento en la disposición final de los RSU y RME

Hasta el año 2007, se habían presentado para su evaluación ante el extinto IHNE, cerca 20 estudios de Diseños de Rellenos Sanitarios para igual número de localidades, algunos de los cuales ya fueron evaluados y resueltos por lo que las autoridades de esos municipios se encuentran en la fase de gestión de los recursos, o bien, en el mejor de los casos, en la fase de construcción de la obra civil. Por lo cual se espera, que en los próximos meses otros SDF se sumen al cumplimiento de la norma para operar como rellenos sanitarios.

Referente a investigaciones enfocadas a la disposición final de los residuos sólidos en el estado, hasta la fecha son contadas. Por ejemplo, Nájera *et al.*<sup>[34]</sup> llevaron a cabo el proyecto PROY-C03-070-CHIS-2005 financiado por el Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Chiapas (COCyTECH) a través de los Fondos Mixtos (FOMIX), donde se conocieron las condiciones reales de operación de los SDF de RSU y RME de las ciudades de Tuxtla Gutiérrez y San Cristóbal de las Casas, constatándose que de los principales problemas ambientales que enfrentan estos lugares, es la generación de lixiviados y su nulo tratamiento. Precisamente por la problemática que envuelve la generación de este líquido, el Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez en colaboración con el laboratorio de monitoreo ambiental del Instituto de Historia Natural y Ecología, realizaron en los años 2005 y 2006 muestreos mensuales -3 en el año 2005 y 12 en 2006- para la caracterización de los lixiviados que se producen en el SDF de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez.

### Comentarios finales

En el manejo de los RSU y RME -conocidos en el léxico común como basura-, convergen varios factores que lo convierten en una de las grandes problemáticas ambientales a las cuales el hombre se enfrenta en la actualidad. Por un lado, se tiene la adquisición de la falsa cultura del consumismo, lo que aunado a la explosión demográfica, ha favorecido una generación de residuos sólidos en constante aumento con cifras

nunca antes vistas, a lo que se suma la variabilidad en su composición, de constituyentes menos biodegradables y más tóxicos; por otro lado, la falta de infraestructura para hacer frente a los servicios de recolección y en especial de disposición final, a lo que podríamos adicionarle la disponibilidad cada vez más estrecha de terrenos para tales fines, así como sitios hoy en “operación” y con una vida útil agotada, con problemas de contaminación y en la mayoría de las ocasiones, hasta de índole social.

Ante este panorama poco alentador, es indudable que todos somos responsables y por consecuencia, la tarea es de todos. No sólo de las autoridades gubernamentales en materia ambiental, ni sólo de los Ayuntamientos, todos podemos y debemos cooperar, comenzando con el primer y gran paso desde la separación de subproductos en la fuente de generación, así también como en lo relacionado a un cambio en nuestros hábitos de consumo.

Por su parte, el papel fundamental de las autoridades gubernamentales radicará en dotar de mayor y mejor infraestructura a los departamentos de limpia y de recolección de residuos, así como en las actividades relacionadas con la disposición final, con la creación de verdaderos rellenos sanitarios y la consideración dentro de sus programas de trabajo de la rehabilitación de los tiraderos a cielo abierto. De igual manera, deberán impulsarse seriamente programas de reciclaje, programas de educación ambiental, creación de mayores centros de acopio, entre otros. Finalmente, la autoridad reguladora en la materia deberá exigir que se cumpla con la normatividad ambiental establecida, de tal manera que se reduzcan las afectaciones al entorno, y por consiguiente, menores problemas de salud pública y un mejor uso de los recursos.



## Bibliografía

1. Tchobanoglous, G., Theisen, H., y Vigil, S. 1994. "Gestión Integral de Residuos Sólidos". Ed. Mc Graw-Hill/Interamericana de España, S.A. Vol. II. pp. 774-775.
2. Ley General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (LGPGIR)
3. Norma Oficial Mexicana NOM-083-SEMARNAT-2003. "Especificaciones de protección ambiental para la selección del sitio, diseño, construcción, operación, monitoreo, clausura y obras complementarias de un Sitio de Disposición Final de Residuos Sólidos Urbanos y de Manejo Especial". 20 de Octubre de 2004.
4. Boletín Demográfico No. 63, 2002. América Latina: Población total, urbana y rural.
5. II conteo de población y vivienda 2005 – INEGI.
6. Diagnóstico básico para la gestión integral de residuos (2006). SEMARNAT-INE.
7. Una propuesta para la gestión ambiental municipal de los residuos sólidos (2006). SEMARNAT – GTZ.

8. Wiszniowski, J., Robert, D., Gorska, J., Miksch, K., Weber, J. 2006. Landfill leachate treatment methods: A review. *Environ Chem Lett*.
9. Wang, F., Smith, D., & El-din, M. 2003. Application of advanced oxidation methods for landfill leachate treatment – A review. *Environmental Eng. Sci.* 2: 413-427.
10. Luna, Y., Ota, E., Vilches, L., Vale, J., Querol, X., Fernández, C. 2007. Use of zeolitised cal fly ash for landfill leachate treatment: A pilot plant study. *Waste Management*. 27. 1877-1883.
11. Lopes, J., y Peralta, P. 2005. Use of advanced oxidation processes to improve the biodegradability of mature landfill leachates. *Journal of Hazardous Materials*. B123. 181-186.
12. Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA)
13. SEMARNAT – GTZ. Guía para la interpretación y cumplimiento de la NOM-083-SEMARNAT-2003 (2005).
14. Orta, L., Monje, R., Rojas, V. (1999). Manejo de los lixiviados y el biogás procedentes de rellenos sanitarios en México. *Ingeniería y Ciencias Ambientales*. 42. 13-21.
15. Nivala, J., Hoss, M., Cross, C., Wallace, S. & Parkin, G. (2007). Treatment of landfill leachate using an aerated, horizontal subsurface-flow constructed wetland. *Science of the total Environment*. 380. 19-27.
16. Díaz, L., Savage, G., Eggerth, L., y Golueke, C. (1996). “Solid Waste Management for Economically Developing Countries”. ISWA. California, USA. pp. 141, 142, 152, 158.
17. SEDESOL. Manual para la rehabilitación y clausura de tiraderos a cielo abierto.

19. Norma Oficial Mexicana NOM-098-SEMARNAT-2002 “Protección ambiental – Incineración de residuos, especificaciones de operación y límites de emisión de contaminantes”.
20. Díaz, L., Savage, G., Eggerth, L., y Golueke, C. 1993. “Composting and Recycling Municipal Solid Waste”. Lewis Publishers. pp. 135-137.
21. Bravo, A. 1996. “Técnicas y Aplicaciones del Cultivo de la Lombriz Roja Californiana (*Eisenia Foetida*)”. Lombricultura: Compost-Lombrices. <http://www.ven.net/~adnel/eisenia.htm>. pp. 1-7.
22. Biocycle Journal of Waste Recycling 1986. Garbage Compost for Landfill Cover. Vol. 27, No 3, pp. 50.
23. Golueke, C. 1989. The Rationale For Composting. “The Biocycle guide to Composting Municipal Wastes”. The JG Press, Inc. pp 1-5.
24. De Bertoldi, M., Vallini, G., y Pera, A. 1983. The Biology of Composting: A Review. *Waste Management and Research*. Vol. 1, No 2, 157-176.
25. Flintoff, F. (1984). Management of Solid Wastes in Developing Countries. World Health Organization. Regional Office For South-East Asia. pp. 152-155.
26. Gray, K., Sherman, K., y Biddlestone, A. 1971. “A Review of Composting, Part I”. *Process Biochem.*, pp. 32-36. Citado por: RABBANI, K. R. JINDAL, R. KUBOTA, H. (1983). *Environmental Sanitation Reviews (ENSIC)*. No 10/11 October. Bangkok, Thailand.
27. Dunlap, C., y Chiang, L. 1980. Cellulose degradation: A common link. In *Utilization and Recycle of Agricultural Wastes and Residues* (M. L. Shuler, Ed.) C.R.C. Press Inc., Boca Raton, Florida, U.S.A. p. 19.
28. Mooijman, K. y Lustenhoumer 1987. Maturity Assesment in Food Waste Compost. *BioCycle Journal of Waste Recycling*. Vol. 28, No 2, pp. 34-35.

29. Iannotti, D., Pang, T., Toth, B., Elwell, D., Keener, H., y Hoitink, H. (1993). A quantitative respirometric method for monitoring compost stability. *Compost Science and Utilization*. 1(3):52-65. Citado por: HUE, N. V. & LIU, J. (1995). Predicting Compost Stability. "Compost Science and Utilization". Honolulu, Hawaii. Vol. 3, No 2, pp. 8-15.
30. The Composter (1997). How to Compost. What is Compost?. Passive Method. <http://digitalseed.com/composter/howtocompostt.htr>.
31. Bagchi, A. 1990. Design, construction and monitoring of Sanitary Landfill. Wiley (Editorial).
32. Rojas Valencia 2007. Instituto de Ingeniería, UNAM, Coordinación de Ingeniería Ambiental.
33. Gray, D., Pollard, S., Spence, L., Smith, & Gronow, J. (2005). Spray irrigation of landfill leachate: Estimating potential exposures to workers and bystanders using a modified air box model and generalized source term. *Environmental Pollution*. 133. 587-599.
34. Instituto de Historia Natural y Ecología –IHNE– (2004). Diagnóstico de la generación, manejo, recolección y disposición final de residuos sólidos. pp. 15, 23-24.
35. Nájera, A., Escobar C., y Vera, T. (2007). Diagnóstico ambiental de los SDF de RSU y de ME de las ciudades de Tuxtla Gutiérrez y San Cristóbal de Las Casas. Informe Técnico. PROY-C03-070, CHIS-2005-COCyTECH.

## VI. Sensores de fibra óptica: *aplicaciones en áreas de la ingeniería ambiental*

Dr. Rubén Alejandro Vázquez Sánchez

### Introducción

#### La fibra óptica en sistemas de comunicación

Las comunicaciones ópticas han estado con nosotros mucho más tiempo del que creíamos, tal vez, el ejemplo más claro es cuando debido a la necesidad de comunicarse, el hombre empleó las manos o brazos como una señal de expresión; en donde el movimiento de las manos representó una modulación, el sol como la fuente de luz y los ojos como el receptor. Con el transcurso del tiempo y debido a las necesidades de comunicación remota, se empezaron a utilizar señales de humo, antorchas, espejos para reflejar la luz del sol y tener una comunicación codificada entre torres de vigilancia en el caso de griegos y fenicios, los clásicos heliógrafos que fueron empleados primeramente por el ejército en la década de 1850 los cuales utilizaban un espejo con un diámetro entre 3 y 12 pulgadas que dirigía la luz del sol codificada en clave Morse hacia un punto fijo situado a una distancia que dependía de la intensidad de la luz del sol y de la visibilidad (hasta 90 millas en días soleados). En la década de 1870, el científico británico John Tyndall observó que la luz podía ser guiada dentro de un material transparente y utilizando un haz de luz y el flujo de agua que provenía desde un contenedor hacia otro; él demostró que la luz seguía un camino específico experimentando la reflexión total

interna en la interfase agua-aire. Este experimento marcó el inicio en la investigación sobre la posibilidad de transmitir luz en forma guiada<sup>[1,2]</sup>.

En 1880, Alexander Graham Bell construyó un sistema de teléfono óptico al que llamó fotófono que enviaba señales vocales a cortas distancias por medio de la luz. El sistema estaba conformado por un arreglo de lentes que enfocaban la luz del sol hacia una placa reflectante de vidrio bañada en plata. Cuando una persona hablaba sobre la placa de vidrio, esta vibraba y provocaba que la luz reflejada se modulara en intensidad siendo después enviada hacia un espejo parabólico reflectante a través de una serie de lentes. La luz reflejada por el espejo parabólico se hacía incidir sobre una fotorresistencia muy sensible de selenio la cual variaba su resistencia de acuerdo a la cantidad de luz que le incidía. De esta forma, utilizando un instrumento de teléfono y una batería el sistema fue capaz de reproducir la voz<sup>[2,3]</sup>. Una principal desventaja inmediata que se presentaba es que este instrumento sólo funcionaba de día (un día soleado) pudiéndose cubrir una distancia en un rango de hasta 200 m. Posteriormente, la fuente de luz fue remplazada por una bombilla eléctrica incrementando la distancia hasta 2 km, pero debido a la cantidad de piezas del sistema necesarios para realizar la comunicación y a la falta de una fuente de luz intensa, la idea se detuvo y Bell concluyó que la atmósfera no transmitía luz de manera igual a como los alambres pueden transportar electricidad<sup>[2]</sup>.

Un inconveniente que se tenía en estos métodos de comunicación óptica es el medio de transporte (aire) en el que se propagaba la señal, y los fenómenos tales como la nieve, lluvia, tormentas, niebla, etcétera, lo hacían inoperable, además de la inhabilidad para esquivar obstáculos tales como árboles, edificios, montañas existentes entre el transmisor y el receptor. Debido a esto, las investigaciones empezaron a centrarse más en el medio de transporte de la luz. En el año de 1888 ya se utilizaban barras o tubos de vidrio con curvaturas para poder iluminar cavidades del cuerpo humano (una revisión dental por ejemplo) y se empezaron a investigar sistemas para guiar imágenes en un intento temprano de la televisión. Pero no fue sino hasta 1954 cuando se comprobó que si una fibra de vidrio o plástico se recubría con un revestimiento transparente de índice de refracción más bajo, la superficie de reflexión estaría libre de contaminación y se evitaría la fuga de luz. Con esta base, A. C. S.

van Heel, Kapany y H. H. Hopkins produjeron el primer endoscopio de fibra óptica. En esta época, los primeros experimentos llevaron al desarrollo de fibras ópticas de vidrio con revestimiento que tenían una atenuación de menos de 1 dB/m, las cuales eran útiles para aplicaciones médicas, pero no para aplicaciones en la industria de las telecomunicaciones. Con la aparición del LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) en 1958, se volvió a considerar el uso de las fibras ópticas en las telecomunicaciones como alternativas o sustitutos de los sistemas ya existentes.

En 1966, Charles K. Kao y George Hockham, propusieron un principio para la transmisión de información a través de un medio dieléctrico transparente, esto es, utilizar la luz para transmitir información a través de la fibra de sílice. Ellos encontraron que las altas pérdidas en las fibras ópticas eran debidas a las impurezas existentes y no al sílice con el que se fabricaron. Debido a ello, tres investigadores de la Corning Glass en 1970 (Robert Maurer, Donald Keck y Peter Shultz) obtuvieron fibras con valores de atenuación menores a 20 dB/km. A partir de ese momento con mejores formas de fabricación y con el uso de longitudes de onda mayores, se consiguieron fibras que tenían una atenuación de 2 dB/km para luz de 850 nm, pero rápidamente se redujo hasta cerca de 0.5 dB/km para luz de 1300 nm y con el uso de luz a 1550 nm (tercera ventana de telecomunicaciones) se tienen fibras con atenuación menor a 0.23 dB/km<sup>[4]</sup>.

En el mismo año en que la Corning Glass patentó la fibra óptica (1970) los laboratorios Bell en América y un equipo del Instituto Loffe de Física en San Petersburgo fabricaron diodos láser de semiconductor capaces de emitir en onda continua a temperatura ambiente. Con esto último y debido a la obtención de fibras ópticas de vidrio de baja pérdida, a partir de 1975 la tecnología de las telecomunicaciones ópticas ha avanzado a un ritmo vertiginoso y se sigue incrementando a medida que los laboratorios perseveran en su empeño de conseguir sistemas capaces de transmitir más cantidad de información, a mayores velocidades, a mayores distancias y a menores costos.

Como información, una única fibra de vidrio con grosor cercano al de un cabello humano, puede transportar aproximadamente el equivalente a 300 millones de llamadas telefónicas simultáneas.

## La fibra óptica en sistemas de sensores

Siguiendo con el desarrollo de la historia de la fibra óptica, nos podemos dar cuenta que su aparición fue debido a la necesidad de tener un medio de transmisión de información en forma de energía luminosa que pudiera resolver los problemas de las telecomunicaciones, pero debido a las propiedades interesantes que presentaron estas fibras o medios de transmisión, a mediados de la década de 1960 aparece por primera vez el concepto de sensores de fibra óptica, aunque el concepto fue aplicado a sistemas muy rudimentarios de sensores, se obtuvieron las primeras patentes que incluyeron un sensor fotónico de desplazamiento mecánico y un sensor ultrasónico basado en modulación de fase<sup>[5]</sup>. Sin embargo, con mayores esfuerzos de grupos de investigación y con una base más sólida en el conocimiento de las propiedades de la fibra óptica, a mediados de la década de 1970 se inicia la tecnología de los sensores de fibra óptica y desde este tiempo se ha tenido un crecimiento impresionante a tal grado que de investigaciones experimentales ha pasado a aplicaciones prácticas como por ejemplo; aplicaciones en diques, puentes y estructuras en donde se monitorea la tensión dinámica con sensores distribuidos, así como la elongación e inclinación y en algunos casos la corrosión del acero<sup>[6,7]</sup>, sensores acústicos como el hidrófono<sup>[8,40]</sup>, sensores de rotación como el giroscopio<sup>[9]</sup>, de temperatura y tensión<sup>[10-16]</sup>, de humedad relativa<sup>[17]</sup>, de viscosidad, de nivel y opacidad de líquidos<sup>[18]</sup>, de presión<sup>[19-22]</sup>, sensores químicos<sup>[23-27]</sup>, de aceleración<sup>[28,29]</sup>, de vibración<sup>[30]</sup>, sensores que hacen uso de componentes biológicos para sensar una especie de interés llamados biosensores de fibra óptica<sup>[31,32]</sup> los cuales incluyen además aplicaciones en medicina<sup>[33,34]</sup>. Puede seguir haciéndose una lista de las aplicaciones de los sensores de fibra óptica, pero sería interminable, aun así, las aplicaciones arriba mencionadas son de las más conocidas.

Byoung-ho Lee<sup>[35]</sup> hace la clasificación mostrada en la figura 1, de publicaciones tomadas de la XV Conferencia de Sensores de Fibra Óptica (OFS-15: IEEE Catalog Number 02EX533) celebrada en Portland, Oregon, USA en mayo del 2002, de acuerdo al tipo de sensor investigado.

Se puede ver que las áreas más investigadas se establecen en la medición de la tensión y temperatura y las menos investigadas se encuentran en los biosensores. Por lo tanto, esta es una motivación para grupos de investigación en sensores de fibras ópticas que dirigen su mirada hacia la búsqueda de soluciones de problemas del medio ambiente, ya que a partir de los sensores químicos hasta los biosensores forman parte de sus investigaciones.

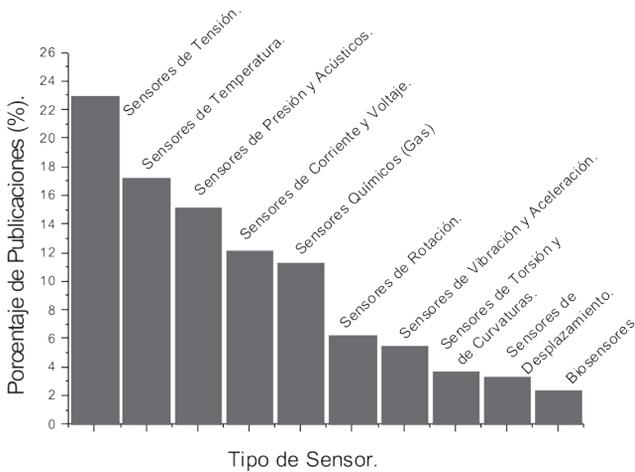


Figura 1. Gráfica que muestra la clasificación tomada de la ref [35] sobre el porcentaje de publicaciones de acuerdo al tipo de sensor investigado.

Una clasificación de los sensores de fibra óptica que se puede realizar es la que va de acuerdo a la tecnología que emplea y esta puede ser: basados en rejillas de Bragg, basados en interferómetros, por reflexión y dispersión, por rotación Faraday, por fluorescencia y luminiscencia, por interferometría de baja coherencia, etcétera. Dentro de estas técnicas las más investigadas y que han tenido éxito comercialmente son las técnicas basadas en rejillas de Bragg y en interferómetros.

Hasta ahora se ha hablado en forma general de la historia de los sensores de fibra óptica, pero uno se puede preguntar ¿por qué, si existe la tecnología más madura de los sensores electrónicos y mecánicos, se realizan investigaciones de sensores de fibras ópticas? La respuesta es

inmediata y es que los sensores de fibras ópticas tienen importantes ventajas sobre los sensores electrónicos y mecánicos: tienen inmunidad a interferencia electromagnética; estos sistemas explotan a la luz como la portadora de la información, son ligeros, son de tamaño pequeño; pueden tener acceso a lugares inaccesibles para los sistemas electrónicos y mecánicos, alta sensibilidad, gran ancho de banda; se puede transportar gran cantidad de información en una sola fibra, se pueden realizar sensores remotos<sup>[1]</sup> y distribuidos, naturaleza pasiva; pueden aplicarse en lugares altamente inflamables en donde los sensores electrónicos estarían descartados, como la fibra es hecha de vidrio es inmune a ciertas sustancias químicas; esto es, puede utilizarse en ciertos tipos de suelos o en atmósferas corrosivas, etcétera, por mencionar algunas. Pero a pesar de estas ventajas, la tecnología de los sensores de fibra óptica tiene una desventaja: su alto costo, aun así, esta tecnología sigue en aumento y esto es debido a que el costo tiende a disminuir a medida que las redes de telecomunicación por fibra óptica crecen.

## La fibra óptica

### Aspectos generales

Una fibra óptica es un medio físico dieléctrico que transporta información en forma de luz, o sea, en ondas electromagnéticas guiadas paralelas al eje de la fibra. Se compone de un núcleo en donde se efectúa la propagación de la luz, una cubierta óptica o revestimiento necesaria para que se lleve a cabo el mecanismo de propagación y uno o más recubrimientos de protección mecánica. La geometría típica se muestra en la figura 2.

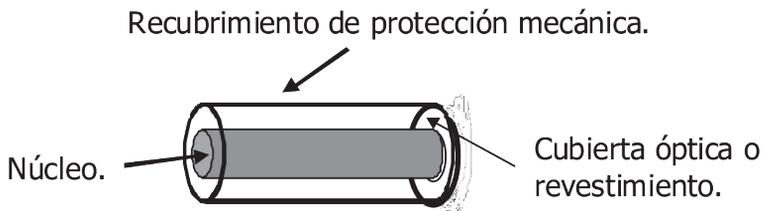


Figura 2. Geometría típica de una fibra óptica.

Uno de los parámetros que es necesario definir cuando se analiza la propagación de la luz en un material es el índice de refracción del mismo y se define como el cociente entre la velocidad de la luz en el vacío y la velocidad de la luz en el material, esto es:

$$n = \frac{c}{v} \quad (1)$$

donde  $c$  es la velocidad de la luz en el vacío y  $v$  es la velocidad de la luz en el material.  $n$  será siempre mayor a 1 a medida que el material o el medio sea más denso,  $n > 1$ .

Las fibras son hechas de vidrio consistiendo de silicio o un silicato ( $\text{SiO}_2$ ). El núcleo debe tener un índice de refracción mayor que el revestimiento, para que exista la propiedad de reflexión interna total. Los óxidos de dopado tales como  $\text{GeO}_2$ ,  $\text{B}_2\text{O}_3$ , y  $\text{P}_2\text{O}_5$  son adicionados al silicio para obtener la diferencia entre los índices de refracción.

Las estructuras de las fibras ópticas se pueden clasificar basadas en el perfil del índice refractivo como: de índice escalonado, de índice gradual y otros perfiles para desplazar o aplanar la dispersión, o basadas en el diámetro del núcleo como: multimodo y monomodo.

En forma general clasificamos a las fibras en:

**Fibras multimodo de índice escalonado:** son aquellas en donde el índice de refracción del núcleo permanece invariable en toda su sección, pero cambia en la interfase núcleo/revestimiento. El diámetro del núcleo varía de 10 a 200  $\mu\text{m}$  y los del revestimiento de 150 a 250  $\mu\text{m}$ .

**Fibras multimodo de índice gradual:** en este tipo de fibras, el índice de refracción del núcleo es variable a lo largo del radio del mismo, siendo máximo en el centro y disminuyendo hacia la periferia. El índice del revestimiento permanece constante. El diámetro del núcleo generalmente es de 50  $\mu\text{m}$  y el del revestimiento de 125  $\mu\text{m}$ .

**Fibras monomodo:** son fibras que transportan un solo modo y son soluciones a problemas como la dispersión modal que existe en las fibras de índice escalonado. El diámetro del núcleo es de alrededor de 5 a 10  $\mu\text{m}$  y el del revestimiento es de 125  $\mu\text{m}$ .

Actualmente se cuentan con otros tipos de fibras como la de plástico que tiene una amplia aplicación en redes de sensores pero no así en

telecomunicaciones y las fibras de cristal fotónico o también llamadas *fibras microestructuradas*. Estas nuevas fibras son hechas enteramente de un tipo de vidrio, no se necesita de dopantes para el guiado de la luz, la región del revestimiento es fabricada con pequeños huecos a lo largo de la longitud entera de la fibra. Según la manera en que se guía la luz, estas fibras se pueden dividir en dos tipos:

- Fibras de núcleo sólido.
- Fibras de núcleo vacío.

Las fibras microestructuradas, figura 3, guían la luz debido a una modificada reflexión interna total. Los huecos actúan como el medio de menor índice de refracción en el revestimiento y es confinada en el núcleo sólido el cual tiene un índice relativamente más alto. A diferencia de las fibras convencionales, las fibras microestructuradas pueden hacerse de un único tipo de material, por ejemplo silicio no dopado. El índice de refracción efectivo del revestimiento puede variar fuertemente como una función de la longitud de onda de la luz guiada por la fibra. Por esta razón, es posible diseñar fibras con propiedades espectralmente únicas no posibles en las fibras ópticas convencionales.

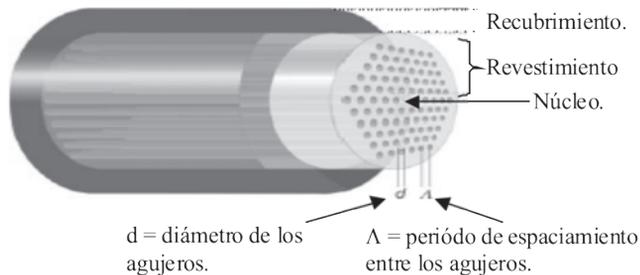


Figura 3. Geometría típica de una fibra óptica microestructurada o de cristal fotónico. La estructura de la fibra está determinada por el diámetro de los agujeros y por el espaciamento entre ellos.

El diámetro externo de estas fibras típicamente es de  $125\ \mu\text{m}$  y el periodo entre los agujeros es de  $10 - 15\ \mu\text{m}$ . La aplicación inmediata de estas fibras es para la generación de fuentes de espectro ancho o gene-

ración del supercontinuo el cual es útil en espectrofotometría y para la fuente de iluminación en redes de sensores. Además, es posible construir sensores de onda evanescente con estos tipos de fibras.

## Teoría de operación

Los principios básicos de operación de una fibra óptica puede entenderse de forma clara aunque no rigurosa utilizando las leyes de la óptica geométrica o de rayos. Pero si se requiere tener un conocimiento más riguroso sobre la propagación de la radiación en el interior de la fibra se pueden recurrir a la resolución de las ecuaciones del campo electromagnético, esto es, las ecuaciones de Maxwell.

Prácticamente el principio que se encuentra detrás del fenómeno de propagación de la señal luminosa en el interior de una fibra es el principio de la reflexión total interna. Es bien sabido que cuando una onda plana o un rayo de luz incide sobre un plano de separación entre dos medios dieléctricos con distinto índice de refracción  $n_1$  y  $n_2$  con  $n_1 < n_2$  tal como aire-vidrio, la onda experimenta dos fenómenos, figura 4:

- El fenómeno de reflexión en donde parte de la onda sufre una reflexión hacia el medio del que procede.
- El fenómeno de refracción en donde parte de la onda atraviesa la interfaz hacia el segundo medio.

Bajo estas condiciones la onda reflejada cumple con la ley de la reflexión:

$$\theta_i = \theta_r \quad (2)$$

el ángulo  $\theta_i$  que forma la onda incidente con la normal a la superficie es igual al ángulo  $\theta_r$  que forma la onda reflejada con la normal. La onda refractada cumple con la ley de la refracción o de Snell:

$$n_1 \text{ sen } \theta_i = n_2 \text{ sen } \theta_2 \quad (3)$$

De la ecuación 3 se puede ver que si  $n_1 < n_2$  entonces  $\theta_2 < \theta_i$  y la onda refractada esta más cerca de la normal al plano de incidencia. Para el

otro caso cuando  $n_1 > n_2$  se tendrá que  $\theta_2 > \theta_1$  y la onda refractada se aleja de la normal al plano de incidencia. Así, si  $\theta_1$  aumenta, lo mismo hará  $\theta_2$  hasta un valor para el cual la onda refractada se propague en forma paralela al plano de incidencia. El ángulo  $\theta_1$  para el cual esto ocurre se llama ángulo crítico  $\theta_c$  y cualquier onda que incida con ángulos mayores al ángulo crítico se reflejará en su totalidad conociendo este fenómeno como *reflexión total interna*. En la figura 5 se puede apreciar esto.

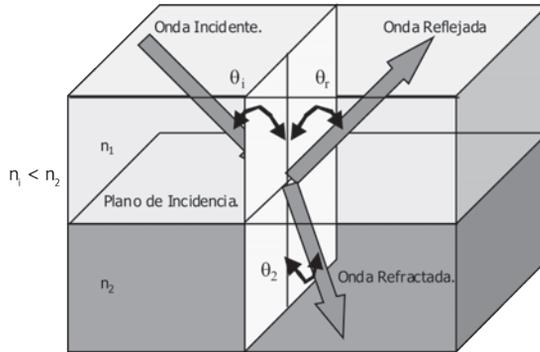


Figura 4. Fenómenos de reflexión y refracción que experimenta una onda al incidir sobre una superficie o plano de incidencia que forman dos medios dieléctricos de distinto índice de refracción. En este caso  $n_1 < n_2$ .

Para el cálculo del ángulo crítico  $\theta_c$ , en la ecuación 3 de Snell se fija a  $\theta_2$  en un valor de  $\pi/2$  y después de reducir la ecuación se llega al siguiente resultado:

$$\begin{aligned} n_1 \operatorname{sen} \theta_c &= n_2 \operatorname{sen} (\pi/2); \\ \theta_c &= \operatorname{arcsen} (n_2/n_1) \end{aligned} \quad (4)$$

debido a que  $n_1 > n_2$  siempre existirá un ángulo crítico y por lo tanto existirá la reflexión total interna.

¿Pero que relación tiene esto con la propagación de la radiación en las fibras ópticas? Pues bien, debido a que el material del núcleo es de mayor índice de refracción que el material del revestimiento, las ondas que

viajan en el interior del núcleo de la fibra inciden en la interfase núcleo–revestimiento a ángulos mayores al ángulo crítico y debido a ello toda o casi toda la energía es reflejada internamente hasta que emerge en el extremo de la fibra. De esta forma el fenómeno de la reflexión total interna permite que toda la energía quede confinada en el núcleo de la fibra.

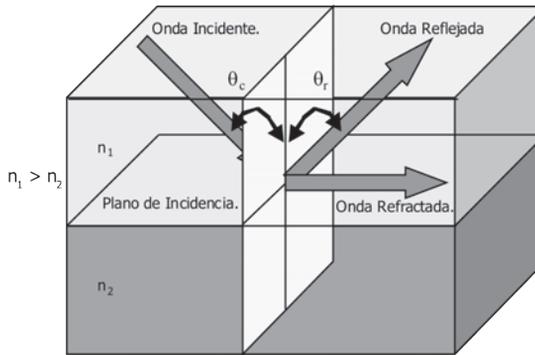


Figura 5. Fenómenos de reflexión total interna que experimenta una onda al incidir con un ángulo  $\theta_c$  sobre una superficie o plano de incidencia que forman dos medios dieléctricos de distinto índice de refracción. En este caso  $n_1 > n_2$ .

Para que se cumpla la reflexión total interna (figura 6) es necesario que la luz que entra en la fibra cumpla con lo siguiente: Los rayos de luz que entran en la fibra deben formar un ángulo con la normal a la superficie de la cara de la fibra (sección transversal) menor al ángulo  $\alpha_{MAX}$  para que el rayo refractado que incide en la interfase núcleo-revestimiento forme un ángulo con la normal a esta interfase mayor a  $\beta_{MIN}$ . De esta forma, la radiación tendrá sucesivas reflexiones en el interior del núcleo de la fibra hasta abandonarla.

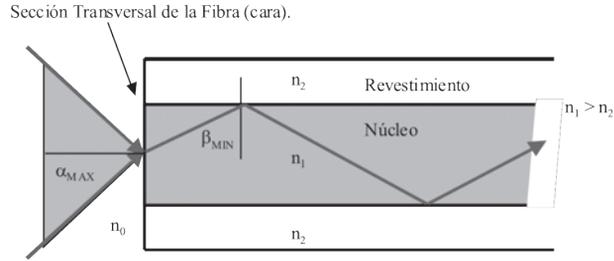


Figura 6. Ángulo límite de entrada y condiciones para que exista la reflexión total interna y por ende la propagación de la luz en el núcleo de la fibra.  $n_0$  es el índice de refracción del aire.

En la figura 6 se puede observar que la energía luminosa que entra en la fibra debe estar contenida en un cono cuya generatriz forma un ángulo  $\alpha_{MAX}$  con el eje de la fibra. Así, se puede definir la apertura numérica o índice de aceptación de luz como:

$$AN = n_1 (2\delta)^{1/2} \quad (5)$$

Donde  $\delta$  es la diferencia relativa de índices de refracción del núcleo y el revestimiento, esto es:

$$\delta = (n_1 - n_2)/n_1 \quad (6)$$

Con esto, mientras más grande sea la diferencia relativa de índices mayor será la apertura numérica, mientras que para materiales más parecidos se necesitará que la fuente proporcione un haz de luz más estrecho para que no existan pérdidas al introducir la radiación luminosa a la fibra.

A pesar de que existe la reflexión interna total en el núcleo de la fibra, parte de la radiación luminosa atraviesa la interfase núcleo-revestimiento y se propaga en el revestimiento en forma de un campo evanescente. La profundidad de penetración  $\Delta y$  de esta energía en el revestimiento es 5 veces la longitud de onda respectiva. Esto se muestra en la figura 7.

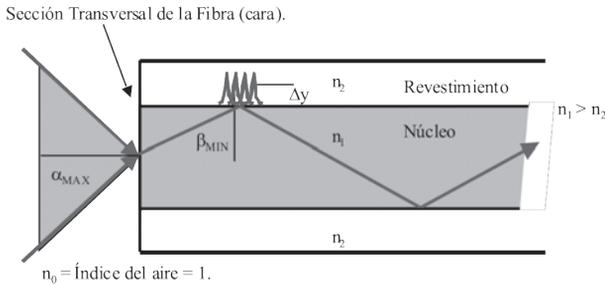


Figura 7. En el punto en donde ocurre la reflexión total interna existe una penetración de la radiación electromagnética en el revestimiento con una profundidad  $\Delta y$ .

La radiación de onda evanescente es muy útil en el área de sensores, ya que es una técnica que se utiliza para la detección de sustancia químicas. Más adelante se hablará en detalle.

Hasta ahora se ha hablado de forma general de las características básicas de la fibra óptica. En realidad, para un conocimiento más detallado es necesario recurrir al análisis de las pérdidas en fibras, la atenuación, la dispersión, etc., parámetros necesarios cuando las fibras ópticas se aplican en sistemas de comunicación. Para el área de sensores, la teoría ya mencionada es suficiente y cuando sea necesario algunas características se detallarán.

## Los sensores de fibra óptica

### Estructuras

Los sensores de fibra óptica (SFO) son sistemas en donde las características de la luz guiada por la fibra pueden ser modificadas en respuesta a la influencia de algún fenómeno físico, químico, biológico, biomédico, etcétera. De esta forma, a grandes rasgos, un sensor de fibra óptica consiste de una fuente de luz constante que es enviada a través de una fibra óptica hacia un punto en donde se va a realizar una medición. En este punto, el parámetro a ser medido o detectado es utilizado para modular alguna de las propiedades de la luz y esta luz modulada es de nuevo enviada por la misma fibra o por otra hacia un detector en donde es demodulada y convertida, generalmente, en una señal eléctrica. En la figura 8 puede verse la estructura general de un sensor de fibra óptica.

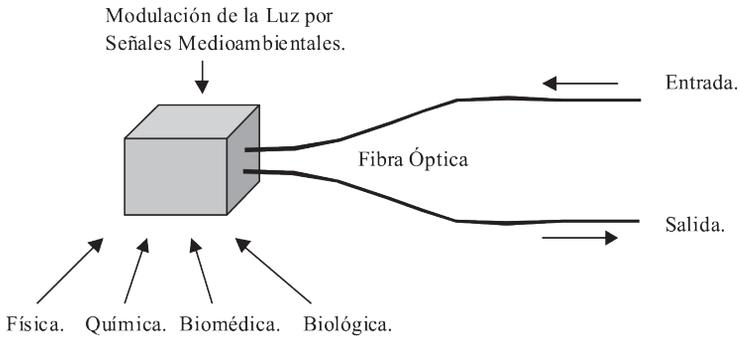


Figura 8. Estructura básica de un sensor de fibra óptica.

La información que la señal medioambiental imprime en la luz puede estar en términos de cambios de intensidad, fase, frecuencia, polarización, contenido espectral o de algún otro parámetro.

Dependiendo de la estructura del sensor y si la fibra óptica interviene directa o indirectamente en la medición del parámetro, los SFO pueden dividirse en dos grupos:

- Sensores extrínsecos.
- Sensores intrínsecos.

**a) Sensores extrínsecos:** Son sensores que utilizan a la fibra óptica sólo como un medio de transporte de la información o datos. La señal medioambiental imprime los cambios en la luz fuera de la fibra óptica. Uno de los arreglos más utilizados es el mostrado en la figura 9. La luz de entrada es transportada por la fibra óptica hacia una micro celda que contiene una muestra química (por ejemplo gas), la luz interactúa con la muestra y es de nuevo enviada hacia una fibra y de allí hacia un fotodetector o a un espectrofotómetro. La fibra de entrada debe estar alineada con la fibra de salida para evitar pérdidas. El parámetro de la luz que se modula es la longitud de onda y seleccionando adecuadamente la longitud de onda de la luz de entrada con la línea de absorción espectral de la muestra, se detecta la cantidad o el tipo de muestra.

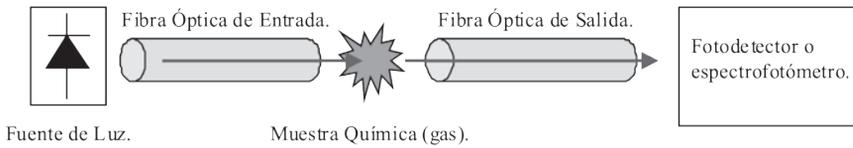


Figura 9. Estructura básica de un sensor extrínseco de fibra óptica utilizado para monitorear una muestra química

Una desventaja que se presenta en aplicaciones reales es que en el punto de medición pueden existir otros gases que provoquen mediciones erróneas. Por ello, esquemas basados también en la modulación de intensidad han sido investigados<sup>[36]</sup>. Con estos arreglos es posible monitorear varios compuestos si se sintoniza la longitud de onda de la luz de entrada a frecuencias ópticas que coincidan con las líneas de absorción espectral de esos compuestos. Esta técnica es conocida como Modulación de Onda Espectral<sup>[37]</sup>.

Una de las ventajas que se tiene al trabajar con sensores de fibras ópticas es que la mayoría de los gases tal como el metano tienen líneas de absorción que se encuentran en el rango del visible al infrarrojo cercano, que es en donde las fibras ópticas trabajan apropiadamente. Fuera de este rango las fibras son casi opacas.

Una modificación que se le hace a este sensor extrínseco es utilizando un agente químico junto a la muestra química que complementa los cambios en las propiedades de la luz. De esta forma la reacción que ocurre entre el agente químico y la muestra química es única y con ello se evita que otras muestras en el medio ambiente interfieran con las mediciones.

Además del monitoreo de sustancias o compuestos químicos, estos sensores tienen aplicación para la detección de vibraciones, desplazamientos, etcétera, cuando se modifican ligeramente. En la figura 10 se muestran estos arreglos.

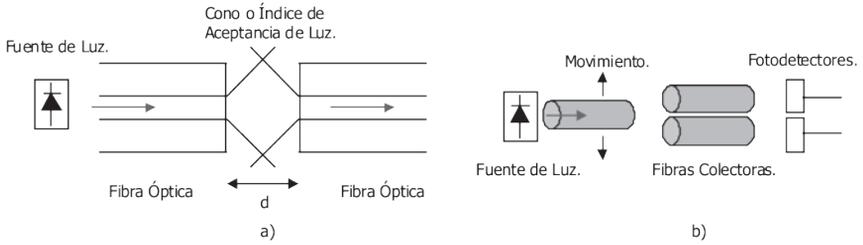


Figura 10. Estructuras de sensores extrínsecos de fibra óptica a) utilizado para monitorear vibraciones cuando  $d$  aumenta o disminuye. b) utilizado para medir desplazamientos cuando la fibra de entrada se mueve hacia arriba o hacia abajo.

La figura 10 a) muestra el arreglo de un sensor de vibraciones. Se utilizan dos fibras ópticas perfectamente alineadas. Como se dijo anteriormente, la cantidad de luz que una fibra óptica puede capturar depende del ángulo de aceptación y, en este caso, de la distancia  $d$ . De esta manera, una modulación de la distancia  $d$  produce una modulación de la intensidad de la luz que captura la segunda fibra en la cual va impresa la información de las vibraciones. La figura 10 b) muestra un sensor de desplazamiento radial que utiliza dos fibras ópticas de salida con una fibra de entrada. La razón de la cantidad de luz capturada por los fotodetectores es una medida de la cantidad de movimiento lineal producido en la fibra de entrada<sup>[38]</sup>.

**b) Sensores intrínsecos:** llamados sensores “todo de fibra”, son arreglos en los cuales la información de la medición se imprime directamente dentro de la fibra óptica, esto es, la luz nunca abandona a la fibra óptica. En las estructuras de estos tipos de sensores se puede hacer una clasificación de acuerdo a la propiedad de la luz que se module:

- Sensores intrínsecos modulados en intensidad.
- Sensores intrínsecos modulados en longitud de onda (rejillas de Bragg).
- Sensores intrínsecos modulados en fase (interferométricos).

Entre los sensores intrínsecos *modulados en intensidad* existen los que utilizan el fenómeno de la reflexión total interna como el arreglo mostrado en la figura 11.

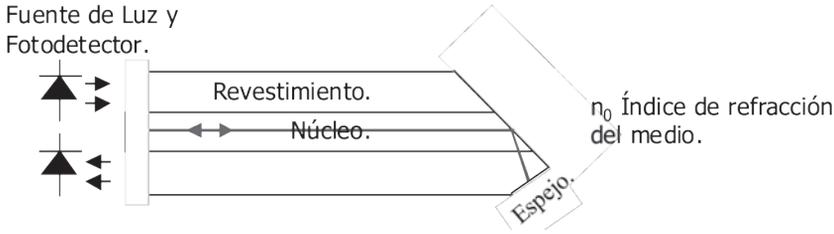


Figura 11. Estructuras de un sensor intrínseco de fibra óptica utilizado para medir índices de refracción o presión<sup>[38]</sup>.

En este caso, el extremo de la fibra óptica se corta formando un ángulo con el eje de la fibra. La luz que viaja en la fibra incide en el extremo cortado y si  $n_0$  es menor que el índice del núcleo, toda la luz es reflejada hacia atrás por el espejo y colectada por el fotodetector. Si  $n_0$  es casi igual al índice del núcleo parte de la luz viaja hacia afuera y parte se refleja por el espejo resultando en una modulación de la intensidad. Estos tipos de sensores pueden ser utilizados para medir índices de refracción y presión en líquidos o algún tipo de gel.

Una variación de esta técnica es la mostrada en la figura 12 con la cual es posible medir niveles de líquidos o simplemente para detectar la presencia o ausencia de los mismos. El extremo de salida de una fibra de núcleo grande (multimodo) es fijado a un prisma de forma tal que cuando el prisma no esté en contacto con el líquido ocurra la reflexión total interna y toda la luz es detectada por el fotodetector. Cuando el líquido entra en contacto con el prisma casi toda la luz sale de la fibra y esto genera una modulación de la intensidad<sup>[38,39]</sup>.

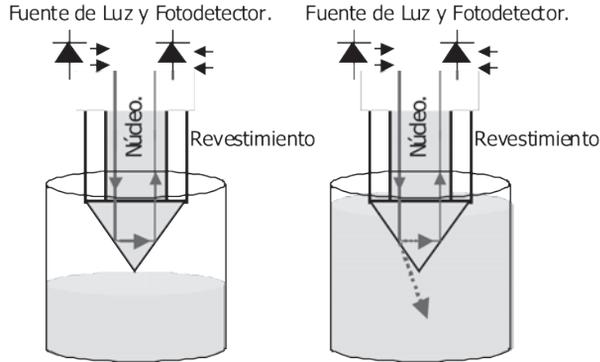


Figura 12. Estructuras de un sensor intrínseco de fibra óptica utilizado para medir la presencia, ausencia o niveles de líquidos<sup>[38]</sup>.

Los sensores basados en microcurvaturas y macrocurvaturas son, también, de modulación de la intensidad. Estos tipos de sensores son los primeros en ser investigados y pueden ser aplicados para medir muchas variables físicas tales como temperatura, presión, desplazamiento, etc., en los sensores basados en microcurvaturas se utilizan, generalmente, dos placas corrugadas que inducen una perturbación mecánica a una fibra multimodo causando una redistribución entre los modos del núcleo y del revestimiento, significando pérdidas de radiación en la fibra, el diseño es el mostrado en la figura 13. Las placas deformadoras deben cumplir un periodo de perturbación mecánico que está relacionado con la diferencia entre los índices de refracción del núcleo y revestimiento y con el diámetro del núcleo. Muchas investigaciones se han realizado con respecto a este sensor y se han aplicado en la medición de flujos, tensión, aceleración, velocidad<sup>[38,41]</sup>.

Una aplicación que se ha realizado es en medicina utilizando ciertos tipos de hidrogel los cuales absorben agua y se hinchan pero no se disuelven en medios acuosos<sup>[42]</sup>. El principal mecanismo de funcionamiento de estos sensores basados en microcurvaturas es en la colocación de este tipo de gel entre las placas deformadoras y la fibra multimodo. De esta forma, cuando el gel detecta un medio acuoso se hincha e induce una perturbación mecánica en la fibra con un periodo igual al de las placas deformadoras. Otras aplicaciones de esta técnica corresponden a la detección de agua y fugas de hidrocarburos.

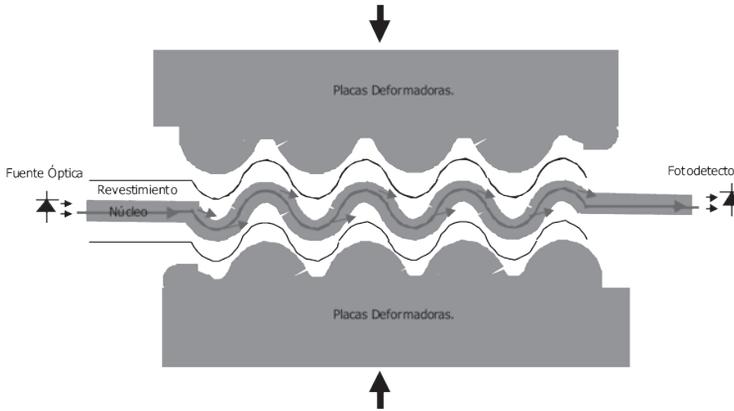


Figura 13. Estructura de un sensor intrínseco de fibra óptica que utiliza las microcurvaturas para medir variables físicas y para detectar presencia o ausencia de líquidos.

Los sensores basados en macrocurvaturas utilizan sistemas que inducen curvaturas grandes (radios del orden de centímetros) en la fibra óptica. De igual forma que los basados en microcurvaturas, son aplicables en la detección o medición de variables físicas.

Dentro de los sensores intrínsecos existen los llamados de onda evanescente los cuales son utilizados en la detección de gases o vapores y la mayoría de ellos utilizan una sustancia química depositada en la parte sensora de la fibra óptica para que tenga una reacción con el gas a medir y que con ello cambien sus propiedades ópticas o estructurales modificando las propiedades ópticas de transmisión de la fibra. En la figura 14 se observa un sensor de onda evanescente que consiste en la modificación del revestimiento de la fibra en la parte sensora. En su lugar se deposita una sustancia química que funciona como un transductor entre el vapor o gas a medir y la señal óptica que viaja en el revestimiento (onda evanescente). La sensibilidad de estos sensores depende de la potencia óptica transferida en el campo evanescente y por la profundidad de penetración de estas ondas en el revestimiento modificado. Si el revestimiento modificado tiene más bajo índice de refracción que el núcleo, entonces se cumple la reflexión total interna y en este caso la respuesta del sensor es gobernada por la modulación de la intensidad causada por la absorción de la luz de la onda evanescente

la cual es guiada a través del revestimiento; esta interacción resulta en la atenuación de la luz guiada por el núcleo. Si el índice de refracción del revestimiento modificado es más grande que el índice del núcleo, parte de la potencia óptica es refractada hacia el revestimiento y parte se refleja. Ambos, la potencia óptica reflejada hacia el núcleo y la refractada hacia el revestimiento, dependen de las propiedades ópticas del revestimiento modificado lo cual cambia con la presencia de vapores orgánicos al ser detectados.

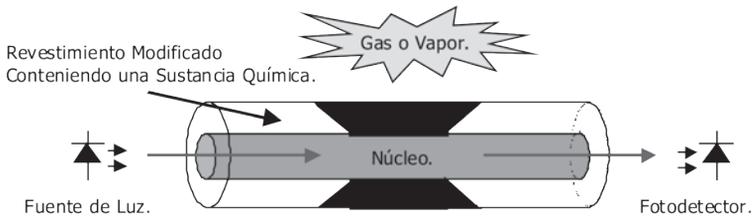


Figura 14. Estructura de un sensor intrínseco de fibra óptica de onda evanescente utilizado para detectar la presencia o ausencia de gases o vapores.

La pérdida de potencia óptica está caracterizado por la absorción de luz de la sustancia química que reemplaza al revestimiento, el número de interacciones entre el núcleo y el revestimiento, el diámetro del núcleo, la apertura numérica de la fibra, entre otros parámetros<sup>[43]</sup>. Otros esquemas de estos tipos de sensores no utilizan sustancia químicas, sino que el revestimiento de la fibra óptica es diseñado de forma tal que en la parte sensora sea sensible a gases específicos. Otras formas consisten en la utilización de fibra estrechadas lo cual hace más frágiles a estos sensores, pero más sensibles. Otra técnica que utiliza el fenómeno de las ondas evanescentes son los sensores en forma de U. Este tipo de sensor utiliza una curvatura de la fibra óptica en la parte del núcleo modificado para tener más sensibilidad<sup>[44]</sup>. De esta forma, la potencia óptica acoplada al campo evanescente se incrementa dependiendo de la curvatura de la fibra. Las fibras en estos casos deben tener un diámetro del núcleo mayor a 1 mm. Una última técnica que ha tenido éxito es la basada en la utilización de fibras de cristal fotónico o fibras microestructuradas. Debido a que en

estas fibras es más fácil alcanzar el campo evanescente y con ello aumentar la sensibilidad, se han realizado investigaciones para aplicarse en la detección de vapores de amonio y otros gases como vapores de acetileno, y para detectar la presencia de CO y CO<sub>2</sub> como ejemplos<sup>[43]</sup>.

Además de los sensores de onda evanescente de transmisión, existen los sensores que están basados en la medición de la señal reflejada y en la medición del tiempo de vida de fluorescencia. En los primeros es utilizado un depósito químico en un extremo de la fibra el cual refleja la luz dependiendo de la sustancia detectada, por lo tanto es posible utilizar un OTDR (Optical Time Domain Reflectometry: Reflectometría Óptica en el Dominio del Tiempo) para medir la señal reflejada y con ello existe la posibilidad de realizar redes de sensores distribuidos. En los segundos se utiliza una sustancia química que emite una fluorescencia cuando esta presente algún gas, como por ejemplo oxígeno<sup>[43]</sup>.

Una clase de sensores intrínsecos son los basados en rejillas de Bragg de fibra óptica. Estos sensores han sido ampliamente investigados y aplicados en distintas áreas que van desde el monitoreo de estructuras hasta aplicaciones médicas. El parámetro que se modula de la luz es la longitud de onda, por lo tanto cualquier pérdida de luz debida a curvaturas en la fibra, a empalmes o a conectores no influye en la información codificada de la medición, como sucede con los sensores basados en modulación de intensidad, explicados anteriormente, en donde una pérdida debida a algún conector se verá reflejado en la información del sensor. Una explicación rápida de estos dispositivos se puede resumir como sigue:

Algunas fibras cambian sus propiedades ópticas permanentemente cuando se exponen a una radiación intensa de un láser operando en la región espectral del azul o el ultravioleta. Este efecto fotosensible lleva a un cambio periódico en el índice de refracción a lo largo de la longitud de la fibra, resultando en la formación de una rejilla de Bragg intra-núcleo cuando las fibras de silicio dopadas con germanio son irradiadas por unos pocos minutos con un haz láser intenso<sup>[43]</sup>.

En su forma más simple una rejilla de Bragg de fibra, consiste de una modulación periódica del índice de refracción del núcleo de una fibra óptica, por lo general monomodo, como se ve en la figura 15. También

se puede ver como un arreglo periódico de placas o películas de dos índices de refracción diferentes, denominados índice de refracción alto  $n_H$  ( $\sim 1.4563$ ) e índice de refracción bajo  $n_L$  ( $\sim 1.456$ )<sup>[46]</sup>.

Estas estructuras uniformes de fibra, donde los frentes de onda son perpendiculares al eje longitudinal de la fibra y las placas de la rejilla son de periodo constante, son consideradas estructuras fundamentales para diferentes tipos de rejillas de Bragg.

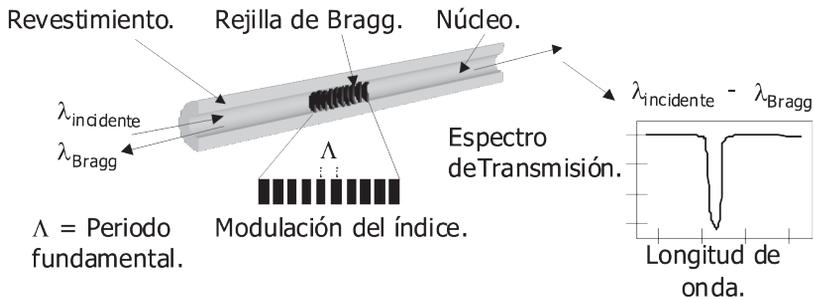


Figura 15. Estructura de una rejilla de Bragg de fibra óptica. Se muestra el espectro de transmisión y la modulación del índice de refracción.

La luz guiada a lo largo del núcleo de la fibra puede ser dispersada por cada placa de la rejilla. Si la condición de Bragg no se satisface, la luz reflejada por cada placa subsecuente, favorece para estar fuera de fase y puede eventualmente cancelarse.

Cuando la condición de Bragg se satisface, las contribuciones de luz reflejada por cada placa de la rejilla se adicionan constructivamente en la dirección hacia atrás formando un pico de reflexión centrado a la longitud de onda definida por los parámetros de la rejilla<sup>[47]</sup>.

Una ecuación que nos da la longitud de onda reflejada con mayor intensidad por la rejilla es la siguiente.

$$\lambda_B = 2 n_{\text{eff}} \Lambda \quad (7)$$

Donde la longitud de onda de la rejilla de Bragg,  $\lambda_B$ , es la longitud de onda central de la luz de entrada que pueda ser reflejada por la rejilla,  $\Lambda$  es el periodo fundamental y  $n_{\text{eff}}$  es el índice de refracción promedio efectivo entre  $n_L$  y  $n_H$ .

Físicamente, un ensamble de películas delgadas que satisfaga la ecuación anterior dará lugar a una alta reflectancia a la longitud de onda especificada por esa ecuación, debido a que los rayos reflejados por cada una de las interfases interfieren constructivamente en la superficie inicial.

Como una explicación simple, parte de la luz que incide sobre una rejilla se refleja y la otra parte se transmite, la rejilla de Bragg tiene una alta reflectancia debido a que las placas tienen un espesor óptico de  $\lambda/4$  y por lo tanto los rayos que se van reflejando en cada superficie se encuentran en fase al salir de la primera interfase<sup>[46]</sup>.

Las características interesantes que presenta este dispositivo hacen que tenga aplicación en las áreas de sensores y en telecomunicaciones. Si nos basamos en la ecuación 7, la longitud de onda de Bragg se modificará si el periodo o el índice de refracción efectivo de la rejilla se modifica. Una forma de actuar sobre el periodo de la rejilla es aumentando, disminuyendo su temperatura, estirando o comprimiéndola. A partir de esto, las rejillas son sensibles a temperatura, tensión y presión. Como dato, una sensibilidad de 1.2 pm (picómetros) se espera para una rejilla centrada a una longitud de onda de Bragg de 1550 nm cuando se le aplica 1  $\mu\epsilon$  (micro tensión), además, una sensibilidad de 13.2 pm por cada °C de aumento de temperatura<sup>[47]</sup>. En el campo de la medición o detección de gases o vapores, se necesita de un traductor entre el gas a medir y la rejilla de Bragg de forma tal que la medición afecte el periodo de la rejilla. Existen muchos tipos de rejillas de Bragg y todos tienen aplicaciones en sensores y telecomunicaciones, entre ellas se encuentran las rejillas inclinadas, las de periodo de espaciado gradual, las rejillas superimpuestas, las cuales, como su nombre lo indica, varias rejillas ocupan el mismo espacio, pero existen las rejillas que tienen más sensibilidad y estas son las rejillas de periodo largo o rejillas de transmisión<sup>[48]</sup>, las cuales, tienen una variación más grande del periodo. Una diferencia principal de estas rejillas en comparación con las rejillas

de Bragg es que la longitud de onda de Bragg es de transmisión y no de reflexión como las anteriores. Las rejillas de periodo largo acoplan la longitud de onda de Bragg en el revestimiento y por ello es más fácil de aplicarlas en las estructuras de sensores de onda evanescente, ya que modificando el revestimiento en donde se acopla la longitud de onda de Bragg es posible modificar la longitud de onda de transmisión.

Una desventaja que se tiene con estos sensores es que la lectura de las mediciones está codificada en términos de longitudes de onda y para el monitoreo se necesitan sistemas interrogadores complejos o instrumentos de alto costo como es el Analizador de Espectros Ópticos (OSA: Optical Spectrum Analyzer), pero a pesar de ello, se han aplicado en la detección de gases por medio de la detección del índice de refracción<sup>[49]</sup> lo cual es útil en aplicaciones biológicas y químicas, además de la aplicación en medicina<sup>[33]</sup> y algunas áreas como es la detección de hidrocarburos<sup>[50]</sup>.

La última clase de sensores que mencionaremos, sin entrar en detalles, son los basados en interferómetros. Estos sensores son arreglos interferométricos de tipo Fabry-Perot, Zagnac, Michelson y Mach - Zehnder. En estos sensores los parámetros que se modulan son la fase, polarización, longitud de onda, frecuencia, etcétera de la señal óptica<sup>[51]</sup>. Los arreglos utilizados son complejos, pero sensibles, es decir, de alta resolución, ya que son ampliamente utilizados en medicina, en biología, química, en áreas donde se miden deformaciones de estructuras, de suelos, para medir vibraciones, aceleraciones, en giroscopios, etcétera.

## Conclusiones

Las aplicaciones de la fibra óptica en sensores forman un área muy prometedora para las técnicas de detección y medición de sustancias tales como gases en la atmósfera, sustancias líquidas en el agua y en el suelo, lo cual da lugar a la solución de problemas de la contaminación presentes hoy en día. Debido a sus interesantes características, los sensores de fibra óptica tienen ventajas sobre los sensores electrónicos y mecánicos. Estas características las hacen aplicables en las áreas ya descritas.

## Bibliografía

1. Gerd Keiser. 2000. *Optical Fiber Communications*, McGraw Hill. Chap. 1.
2. Ray Tricker. 2002. *Optoelectronic and Fiber Optic Technology*, Newnes. Chap. 1.
3. B. Rubio Martínez. 1994. *Introducción a la Ingeniería de la Fibra Óptica*, Addison-Wesley Iberoamericana. Chap. 1.
4. Govind P. Agrawal. 1992. *Fiber-Optic Communications Systems*, JOHN WILEY & SONS, INC. Chap. 1.
5. John Dakin and Brian Culshaw. 1988. *Optical Fiber Sensors: Principles and Components*. Artech House Boston and London. Chap. 1, Vol. I.
6. M. Sklodowski. *Theory of application of fiber optics sensors to settlement monitoring of historical structures*. AMAS Workshop on Smart Materials and Structures SMART'03, 291-299, Jadwisin 2 – 5.
7. Christopher K.Y. Leung, Kai Tai Wan and Liquan Chen. 2008. *A Novel Optical Fiber Sensor for Steel Corrosion in Concrete Structures*. Sensors, 8, 1960-1976.
8. D.J. Hill, P.J. Nash, D.A. Jackson, D.J. Webb, S.F. O'Neill, I. Bennion, and L. Zhang. 1999. *A Fiber Laser Hydrophone Array*. SPIE Vol. 3860.

9. John Dakin and Brian Culshaw. 1988. *Optical Fiber Sensors: Applications, Analysis, and Future Trends*. Artech House Boston and London. Chap. 11, Vol. IV.
10. R. A. Vázquez Sánchez, E. A. Kuzin, B. Ibarra Escamilla. 2004. *Láser de Fibra Óptica Compuesto por Dos Cavidades Acopladas: Aplicación Como Sensor de Fibra Óptica*. Revista Mexicana de Física, 50 (4), 374 – 378.
11. M. May Alarcón, E. A. Kuzin, R. A. Vázquez Sánchez. 2002. *Sensor Láser de Fibra Óptica con una Cavidad de 8.6 km Formada por Dos Rejillas de Bragg Usadas como Espejos*. Revista Mexicana de Física, 48 (5), 434 – 437.
12. M. May Alarcón, E. A. Kuzin, R. A. Vázquez Sánchez. 2003. *Multi-point fiber Bragg grating laser sensor interrogated by the intermodal beating frequency*. Optical Engineering. Vol. 42 (8), 2246 – 2249.
13. M. Song, S. Bae Lee, S. Sam Choi, B. Lee. 1997. *Simultaneous Measurement of Temperature and Strain Using Two Fiber Bragg Gratings Embedded in a Glass Tube*. Optical Fiber Technology 3, 194 – 196.
14. Bai-Ou Guan, Hwa-Yaw, Xiao-Ming Tao, Xiao-Yi Dong. 2000. *Simultaneous Strain and Temperature Measurement Using a Superstructure Fiber Bragg Grating*. IEEE Photonics Technology Letters. Vol. 12, No. 6. 675- 677.
15. O. Hadeler, M. Ibsen and M. N. Zervas. 2001. *Distributed-Feedback Fiber Laser Sensor for Simultaneous Strain and Temperature Measurements Operating in the Radio-Frequency Domain*. Applied Optics, Vol. 40, No. 19, 3169 – 3175.
16. A. D. Kersey and T. A. Berkoff. 1992. *Fiber-Optic Bragg-Grating Differential-Temperature Sensor*. IEEE Photonics Technology Letters. Vol. 4, No. 10. 1183- 1185.

17. Mauro Bacci, Costanza Cucci, Andrea Azelio Mencaglia and Anna Grazia Mignani. 2008. *Innovative Sensors for Environmental Monitoring in Museums*. Sensors, 8, 1984 – 2005.
18. John Dakin and Brian Culshaw. 1988. *Optical Fiber Sensors: Applications, Analysis, and Future Trends*. Artech House Boston and London. Chap. 13, Vol. IV.
19. Hao-Jan Sheng, Ming-Yue Fu, Tzu-Chiang Chen, Wen-Fung Liu, Sheau-Shong Bor. 2004. *A Lateral Pressure Sensor Using a Fiber Bragg Grating*. IEEE Photonics Technology Letters. Vol. 16, No. 4. 1146- 1148.
20. A. Frank, K. Bohnert, K. Haroud, H. Brändle, C. V. Poulsen, J. E. Pedersen and J. Patscheider. 2003. *Distributed Feedback Fiber Laser Sensor for Hydrostatic Pressure*. IEEE Photonics Technology Letters. Vol. 15, No. 12. 1758 - 1760.
22. M. G. Xu, H. Geiger and J. P. Dakin. 1996. *Fibre Grating Pressure Sensor With Enhanced Sensitivity Using a Glass-Bubble Housing*. Electronics Letters. Vol. 32, No. 2, 128 – 129.
23. M. G. Xu, I. Reekie, Y. T. Chow and J. P. Dakin. 1993. *Optical In-Fibre Grating High Pressure Sensor*. Electronics Letters. Vol. 29, No. 4, 398 – 399.
24. K. Cherif, S. Hleli, A. Abdelghani, N. Jaffrezic-Renault and V. Matejec. 2002. *Chemical detection in liquid media with a refractometric sensor based on a multimode optical fibre*. Sensors, 2, 195 – 204.
25. Jaw-Luen Tang and Jien-Neng Wang. 2008. *Chemical Sensing Sensitivity of Long-Period Grating Sensor Enhanced by Colloidal Gold Nanoparticles*. Sensors, 8, 171 – 184.
26. C. Córdoba, Jenny Mera, O. Paredes y J. Benavides. 2004. *Sensor óptico para mediciones de PH obtenido por el método sol-gel con moléculas orgánicas dopadas en matriz vítrea*. Rev. Soc. Quím. Méx. 48, 203-207.

27. Michal Borecki. 2007. *Intelligent Fiber Optic Sensor for Estimating the Concentration of a Mixture-Design and Working Principle*. Sensors, 7, 384 – 399.
28. B. D. Gupta, Navneet K. Sharma. 2002. *Fabrication and characterization of U-shaped fiber-optic pH probes*. Sensors and Actuators B 82, 89-93.
29. M. D. Todd, G. A. Johnson, B. A. Althouse and S. T. Vohra. 1998. *Flexural Beam-Based Fiber Bragg Grating Accelerometers*. IEEE Photonics Technology Letters. Vol. 10, No. 11. 1605 - 1607.
30. T. A. Berkoff and A. D. Kersey. 1996. *Experimental Demonstration of a Fiber Bragg Grating Accelerometer*. IEEE Photonics Technology Letters. Vol. 8, No. 12. 1677 - 1679.
31. Ka On Lee, Kin Seng Chiang and Zhihao Chen. 2001. *Temperature-Insensitive Fiber-Bragg-Grating-Based Vibration Sensor*. Optical Engineering, Vol. 40, No. 11, 2582 – 2585.
32. M. Espinosa Bosch, A. J. Ruiz Sánchez, F. Sánchez Rojas and C. Bosch Ojeda. 2007. *Recent Development in Optical Fiber Biosensors*. Sensors, 7, 797 – 859.
33. M. El-Sherif, Lalitkumar Bansal and Jianming Yuan. *Fiber Optic Sensors for Detection of Toxic and Biological Threats*. Sensors, 7, 3100 – 3118.
34. Günther Wehrle, Percy Nohama, Hypolito José Kalinowski, Pedro Ignacio Torres, and Luiz Carlos Guedes Valente. 2001. *A fibre optic Bragg grating strain sensor for monitoring ventilatory movements*. Measurement Science and Technology. 12, 805 – 809.
35. M. D. Marazuela Lamata. Tesis 1997. *Diseño, Caracterización y Aplicación Analítica de (Bio) Sensores de Fibra Óptica para la Determinación de CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> y Metabólitos de Interés Clínico*. Universidad Complutense de Madrid, Facultad de Ciencias Químicas.

36. Byounggho Lee. 2003. *Review of the Present Status of Optical Fiber Sensors*. *Optical Fiber Technology*, 9, 57 – 79.
37. G. Stewart, C. Tandy, D. Moodie, M. A. Morante, F. Dong. 1998. *Design of a fibre optic multi-point sensor for gas detection*. *Sensor. Actuat. B-Chem*, 51, 227-232.
38. A. Cheung, W. Johnstone, D. Moodie. 2006. *Gas detection based on optical correlation spectroscopy using a single light source*. *Meas. Sci. Tech.*, 17, 1107-1112.
39. E. Udd. 1995. *An Overview of Fiber-Optic Sensors*. *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 66, No. 8, 4015 – 4030.
40. John Dakin and Brian Culshaw. 1988. *Optical Fiber Sensors: Applications, Analysis, and Future Trends*. Artech House Boston and London. Chap. 17, Vol. IV.
41. G. D. Peng and P. L. Chu. 2002. *Fiber Óptic Sensors*. Francis T. S. Yu, Shizhuo Yin. Editores. Marcel Dekker, Inc. Chap. 9.
42. Kjell J. G Asvik. 2002. *Optical Metrology*. John Wiley and Sons, LTD. Chap. 13, 315 – 316.
43. John Dakin and Brian Culshaw. 1988. *Optical Fiber Sensors: Applications, Analysis, and Future Trends*. Artech House Boston and London. Chap. 14, Vol. IV.
44. Cesar Elosua, Ignacio R. Matías, Cándido Barriain, Francisco J. Arregui. 2006. *Volatile Organic Compound Optical Fiber Sensors: A Review*. *Sensors*, 6, 1440 – 1465.
45. B. D. Gupta, Navneet K. Sharma. 2002. *Fabrication and characterization of U-shaped fiber-optic pH probes*. *Sensors and Actuators B*. 82. 89 – 93.

46. Agrawal, G. P. 1995. *Nonlinear Fiber Optics*. Chap. 10, Academic Press, London. (1995).
47. H. H. Cerecedo-Núñez, L. A. Centeno-Sánchez. 1999. *Caracterización de Rejillas de Bragg en Fibra Óptica*. Revista Mexicana de Física. Agosto, 45 (4), 364-369.
48. Andreas Othonos. 1997. *Fiber Bragg Gratings*. Rev. Sci. Instrum. Diciembre. vol. 68, No. 12, 4309-4341.
49. Andreas Othonos, Kyriacos Kalli. 1999. *Fiber Bragg Grating: Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing*. Artech House Boston – London. Chap. 7.
50. Wei Liang, Yanyi Huang, Yong Xu, Reginald K. Lee, Amnon Yariv. 2005. *Highly Sensitive Fiber Bragg Grating Refractive Index Sensors*. Applied Physics Letters 86, 151122,
51. V. V. Spirin, M. G. Shlyagin, S. V. Miridonov, F. J. Mendieta Jimenes, R. M. López Gutiérrez. 2000. *Fiber Bragg Grating Sensor for Petroleum Hydrocarbon Leak Detection*. Optics and Lasers in Engineering, 32, 497 – 503.
52. Alan D. Kersey. 1996. *A Review of Recent Development in Fiber Optic Sensor Technology*. Optical Fiber Technology 2, 291 – 317.

## VII. Aplicaciones ópticas para estudios ambientales

Dr. Carlos Manuel García Lara

### Introducción

**T**odos los objetos que percibimos son posibles de observar gracias a la luz, ya sea emitida por el objeto o reflejada por él. En la época de los griegos, particularmente la escuela pitagórica planteaba que todo objeto visible emite una corriente constante de partículas, como sucede en un atomizador utilizado en perfumes. Por su parte Aristóteles llegó a la conclusión de que la luz viaja en algo parecido a las ondas, como se puede observar en un estanque al arrojar un objeto. No fue sino hasta mediados del siglo XX que logró hallarse una respuesta medianamente completa, resultando en que ambas teorías estaban en lo cierto<sup>[1]</sup>.

Para la caracterización de cualquier elemento o proceso se hace necesario el estudio de las propiedades de estos. Los griegos descubrieron que la luz viaja en línea recta, otro gran descubrimiento fue realizado por Herón de Alejandría, observando que al dirigir un haz de luz con un determinado ángulo hacia un espejo, éste lo refleja al mismo ángulo de incidencia, dando como resultado la regla de que el ángulo de incidencia y el de reflexión son siempre iguales.

Otro fenómeno importante observado fue el de que al colocar un objeto sumergido en agua a un ángulo determinado, éste pareciera que se doblara. En 1621, el matemático Holandés Willebrord Snel Van Royen, explicó este fenómeno a través de la refracción que determina que la luz

al viajar en distintos medios (un ejemplo de este fenómeno se ve cuando se sumerge un lápiz en un vaso con agua: el lápiz parece quebrado), presenta las siguientes características. Si el haz de luz viaja de manera perpendicular, no existe desviación alguna, pero con una ligera inclinación se producirá un pequeño desvío, incrementándose a medida que la inclinación de entrada aumenta, en otras palabras este fenómeno se produce cuando la luz pasa de un medio de propagación a otro con una densidad óptica diferente, sufriendo un cambio de rapidez y un cambio de dirección si no incide perpendicularmente en la superficie. No fue sino hasta 1678, que otro holandés, Christian Huygens elaboró la teoría ondulatoria de la luz, donde presenta una fórmula matemática para las observaciones de Snell y la teoría de que el índice de refracción de un material está determinado por la velocidad con que lo traspasa la luz, partiendo del concepto de que cada punto luminoso de un frente de ondas puede considerarse una nueva fuente de ondas (Principio de Huygens). A partir de esta teoría explicó, en su obra *Traité de la lumière*, la reflexión, refracción y doble refracción de la luz. Por lo que ha mayor índice de refracción más lento será el paso de la luz por dicho medio<sup>[2]</sup>. Dicha teoría quedó definitivamente demostrada por los experimentos de Thomas Young, a principios del siglo XIX. Las lentes, las máquinas fotográficas, el ojo humano y, en general, la mayor parte de los instrumentos ópticos basan su funcionamiento en este fenómeno óptico.

Por otro lado, es sabido que telescopios ordinarios y catalejos pueden haber sido creados mucho antes, pero Hans Lippershey, fabricante alemán de lentes, como se cree, fue el primero en solicitar una patente por su diseño, y hacerlo disponible para el empleo general en 1608. Y aunque Galileo y otros mejoraron dicho instrumento posteriormente, la comprensión de los principios de funcionamiento no se dio sino hasta que Snell, Huygens y otros enunciaron su teoría.

La palabra lente proviene del latín “lentis” que significa “lenteja” con lo que a las lentes ópticas se las denomina así por similitud de forma con la legumbre. Toda lente o combinación de lentes opera de acuerdo con el principio de refracción, toda vez que la superficie de las lentes es curva. Si la lente es convexa (delgada en las orillas y gruesa en medio), los rayos de luz paralelos que llegan a ella a distintos ángulos se desvían

para formar un haz de rayos convergentes que se concentran en un solo punto, por el contrario si la lente es cóncava (orillas gruesas que se curvan en un centro delgado), los rayos se difunden.

A partir de lo anterior se observa el caso de que si la luz viaja de una sustancia que tiene un alto índice de refracción a otra cuyo grado de refracción sea bajo, y si además llega a la superficie interpuesta entre ambas en un ángulo muy oblicuo, la desviación es tal que ni un solo rayo escapa y la reflexión es absoluta. A este fenómeno se le da el nombre de reflexión interna total, cuyo conocimiento en la actualidad ha sido empleado en el desarrollo de fibras ópticas utilizadas para comunicaciones, medicina, sensores, etcétera.

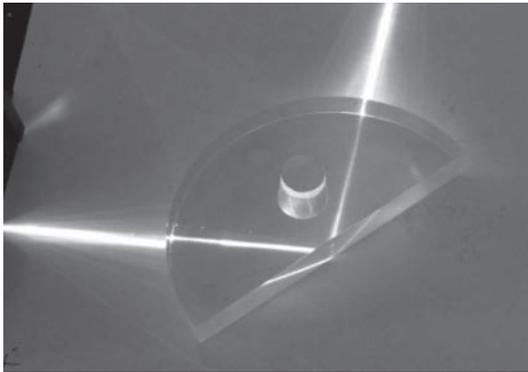


Figura 1. Reflexión interna total, fenómeno que se produce cuando un rayo de luz, atravesando un medio de índice de refracción más grande que el índice de refracción en el que éste se encuentra, se refracta de tal modo que no es capaz de atravesar la superficie entre ambos medios reflejándose completamente<sup>[3]</sup>.

Por otro lado otro fenómeno importante alrededor de la refracción, es que el grado de desviación de la luz dependerá no sólo de la sustancia que atraviese, sino también del color de la luz de la misma. Lo anterior debido a que a cada color está asociada una longitud de onda, lo cual fue observado por Isaac Newton, físico inglés, que descubrió la propiedad básica de que la luz blanca contiene colores.

El experimento que realizó Newton fue pasar un estrecho rayo de luz por un prisma, en un cuarto oscuro, proyectó en un muro los rayos

resultantes, siendo estos una variedad de colores que conocemos como espectro, a continuación hizo pasar los rayos de colores por otro prisma, combinándolos de nueva cuenta, con lo que volvió al rayo original de luz blanca. Así se demostró que la luz blanca es una combinación de todos los colores y que es posible fraccionarla y unificarla a voluntad. Por último Newton aisló cada uno de los colores y demostró que no podían ser modificados.

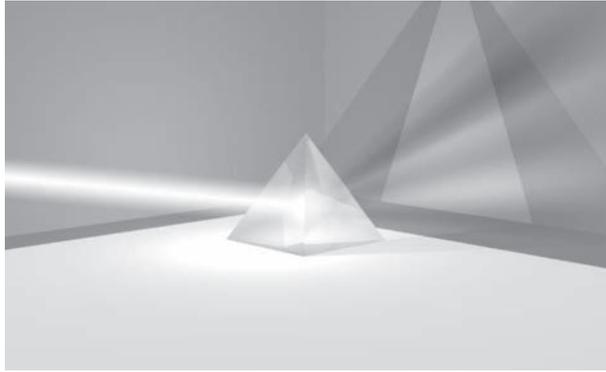


Figura 2. Dispersión de la luz por un prisma, se observa la descomposición de la luz blanca en los diferentes colores del espectro visible<sup>[3]</sup>.

Regresando al debate inicial sobre la naturaleza de la luz como partícula u onda, a principios del siglo XIX, Francesco Grimaldi hizo pasar un rayo de luz por una ranura estrecha donde observó que la luz se dispersaba del otro lado, es decir la luz se esfumaba gradualmente, y no de golpe, fenómeno óptico que nombró difracción de la luz. Este fenómeno se presenta siempre que de la luz emitida por una fuente se separa una fracción interponiendo un cuerpo opaco y esto es lo que da origen a su nombre: división en fracciones.

Hacia 1665, Newton realizaba experimentos tratando de explicar la razón de que las burbujas del jabón, formadas por un líquido incoloro, tuvieran los brillantes colores en su superficie. Considerando que ello podría deberse a la cercanía de las superficies interior y exterior de la burbuja, colocó una lente convexa, muy delgada, sobre una pieza de vidrio. Observando alrededor del punto central de contacto una sucesión

de círculos de colores: negro, azul pálido, blanco, naranja, rojo, verde, amarillo, etc., además si iluminaba el vidrio con una luz de un color definido, obtenía anillos del color de la luz alternados con anillos negros, la distancia de separación entre los anillos dependía del color, por ejemplo anillos azules estaban más cercanos uno del otro que los rojos, este experimento se denominó anillos de Newton, y fueron motivo constante y general de extrañeza hasta 75 años después de su muerte, cuando Thomas Young, científico inglés, partidario de la teoría ondulatoria, dedujo que si la luz se movía de manera similar a las ondas en el agua, tenía que producirse cierta acción recíproca al que sucede al juntarse dos ondas. Si iban al mismo ritmo, se combinarían para formar una onda más grande. Si su movimiento era arrítmico, de tal forma que el máximo de la onda coincidía con el mínimo de la otra, dos ondas de igual intensidad se cancelarían mutuamente.

Young hizo un ingenioso experimento para demostrar su hipótesis. Sabía que si se enfocaba una fuente de luz de un solo color hacia una lámina opaca (en la que se hubieran abierto dos rendijas), la luz que pasaba por la abertura se difundía al reflejarse en la pantalla, según demostró Grimaldi con su experimento de la difracción. Si las dos aberturas estaban lo bastante cercanas, los rayos de luz resultantes se sobreponían en la pantalla.

Lo que Young observó en la pantalla fue una serie de líneas brillantes y oscuras, conocidas actualmente como patrón de interferencia, producidas por la cancelación y refuerzo de las ondas que llegaban en diferentes momentos. Este experimento sirvió de apoyo a la teoría ondulatoria de la luz.

Al hablar de la luz, se puede expresar el fenómeno como longitud de onda o frecuencia, donde la longitud de onda es la distancia entre los máximos de dos ondas y la frecuencia es el número de tales ondas que pasan por cierto punto en un segundo. La relación directa entre la velocidad, longitud de onda y frecuencia de las ondulaciones es que el producto de las dos últimas es igual a la velocidad. En el caso de la luz, la velocidad es constante, cualquiera que sea su medio.

Cuanto mayor sea el número de ondas acumuladas en un segundo, menor será la distancia que tendrán que recorrer y, por lo tanto, menor

será la longitud entre una y otra. Esto explica la relación entre la longitud de onda y la frecuencia: si la frecuencia se duplica, la longitud de onda se reduce a la mitad, y viceversa.

Dado que existen diversas longitudes de onda es fácil relacionar esta variedad a la diversidad de colores que existen. Los experimentos de Young no sólo sirvieron para determinar la relación de la longitud de onda y la frecuencia con el color, sino que explicaron el fenómeno de los anillos de Newton y la variedad de los colores de las burbujas de jabón. En ambos casos es debido a que existen dos superficies reflectoras muy cercanas una de la otra. En ambos, las diferentes longitudes de onda se refuerzan y se anulan mutuamente.

Además, el experimento de Young permitió explicar la difracción, y por qué las sombras no tienen un contorno muy definido. Para comprenderlo es necesario conocer que la luz se propaga en todas direcciones, conocido en la actualidad como incoherencia de la luz.

Otro aspecto importante de la luz es la polarización. Las ondas de luz vibran normalmente en tres dimensiones. No obstante, ciertos materiales traslúcidos tienen curiosos efectos sobre la luz que la atraviesa, las ondas se ven reducidas a una forma bidimensional. Este fenómeno se observó por vez primera en el siglo XVII. El cambio en el movimiento de las ondas de luz se produce debido a la estructura molecular de la sustancia.

Si colocamos dos cristales con la misma estructura molecular frente a frente en una posición, dejarán libre paso a la luz. Pero si uno de ellos cambia de posición, disminuirá la luz hasta que, llegado a determinado punto, no pasará por el segundo. Es por este sencillo principio que los anteojos reducen la luminosidad.

Estas observaciones hicieron predominante a la teoría ondulatoria. Ninguno de los experimentos de la teoría corpuscular habían servido para explicar los fenómenos de interferencia o difracción, que no son sino distintos aspectos del mismo fenómeno.

Para mediados del siglo XIX los investigadores habían deducido las leyes físicas que rigen el comportamiento de la luz, estableciendo definitivamente su carácter ondulatorio, pero sin aclarar básicamente

que es la luz. James Clerk Maxwell, físico escocés, identificó la luz como parte de un vasto y continuo espectro de radiaciones electromagnéticas.

Toda radiación electromagnética, incluida la luz, avanza por un vacío precisamente a la misma velocidad, exactamente 299.792,458 km/s, investigaciones han demostrado la vasta gama del espectro electromagnético, donde hay longitudes kilométricas de onda en el extremo de baja frecuencia de la escala del radio, hasta fracciones de milímetro en el extremo superior, el de los rayos gamma.

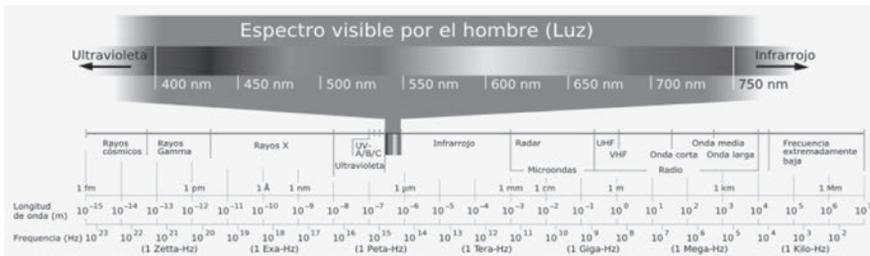


Figura 3. Diagrama del espectro electromagnético, mostrando el tipo, longitud de onda y frecuencia<sup>[3]</sup>.

En 1887 se había observado que una placa de zinc limpia, expuesta a la luz ultravioleta, adquiere una carga positiva. Philipp Eduard Anton von Lenard, físico alemán, explicó en 1900 este efecto. Literalmente, la luz ultravioleta expulsaba electrones de la placa de zinc. Con la pérdida de estas partículas de carga negativa, el zinc adquiriría una carga positiva. Otros investigadores descubrieron muy pronto que el llamado era común en los metales. Además, el número de electrones expulsados en un segundo estaba en proporción con la intensidad de la radiación de la luz, (actualmente, se puede observar este efecto en los sensores de los dispositivos que abren o cierran las puertas automáticamente de centros comerciales, en las cámaras de video que captan y almacenan imágenes del exterior, en los dispositivos de control remoto de los diferentes aparatos eléctricos que se utilizan en la actualidad).

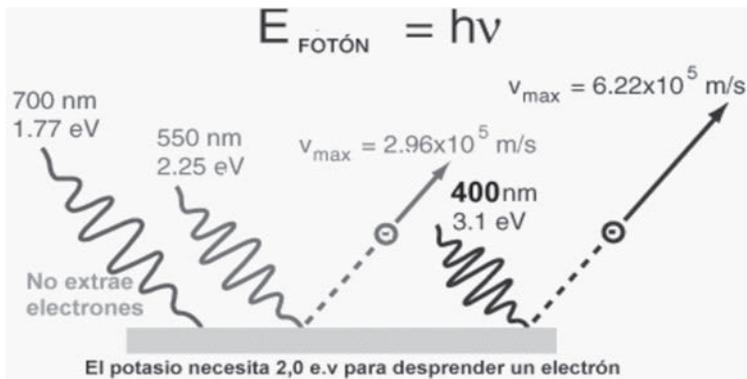


Figura 4. Diagrama del efecto fotoeléctrico. Los fotones incidentes, con diferentes energías, son absorbidos por los electrones del medio dotándoles de energía suficiente para escapar de éste.

Otra observación realizada fue que los electrones expulsados del metal tenían diverso grado de energía, donde la energía máxima de los electrones expulsados no la determinaba la intensidad de la luz, como se esperaría de la teoría ondulatoria, sino que dependía de su longitud de onda. Por lo que un haz de longitud de onda corta expulsaba electrones de alta potencia, mientras que un haz de longitud de onda mayor producía electrones de menor potencia. Así, la intensidad del haz afectaba al número de electrones expulsados por segundo, pero no a su energía máxima.

En 1905, Albert Einstein científico alemán, aplicando la teoría de los cuantos de Max Planck, lanzó el postulado de que la teoría ondulatoria quizá estuviera incompleta, es decir la luz pudiera tener características de una partícula. Einstein elaboró una imagen matemática de cómo era posible que el electrón de un metal absorbiera una pequeñísima fracción de energía de la luz, que nombro cuanto de luz (conocido en la actualidad como fotón), lo que le daría suficiente energía para escapar. Además, si la energía del fotón estuviera en proporción inversa a la longitud de onda, las ondas cortas darían a los electrones expulsados el alto grado de energía observado por Philipp Lenard.

Para 1923, el físico norteamericano Arthur Holly Compton había demostrado que los fotones tienen impulso y, en consecuencia, masa, lo que fortaleció la teoría de Einstein. Si bien desde 1895 se tenían estudios realizados por Wilhelm Conrad Röntgen físico alemán, sobre los rayos X y se había demostrado su índole ondulatoria, también que las partículas tienen gran poder de penetración, lo que permitió usarlos para tomar fotos a través de materias opacas a la luz. Las partículas que formaban los rayos X, y su alta potencia, quedaban explicadas con la teoría de los fotones. Se hicieron otros experimentos que demostraron que cuando la luz y materia actúan recíprocamente, muchos fenómenos sólo pueden explicarse si se considera la luz como porciones aisladas de energía.

A partir de estos fenómenos, que no se podían explicar con la teoría ondulatoria y sí con la corpuscular, surgió la llamada mecánica cuántica, elaborada conjuntamente por algunos de los más grandes físicos modernos como Max Planck, Niels Bohr, Louis de Broglie, Werner Heisenberg, Erwin Schrödinger, Max Born, Einstein, Dirac, Von Neumann, entre otros. La teoría demuestra cómo la radiación electromagnética puede tener características ondulatorias y corpusculares, predominando en ocasiones una y otras veces la otra.

Así pues, la luz no es sino un pequeño fragmento visible del espectro electromagnético. Está formada por ondas, tanto como por partículas, siendo estas dos cualidades aspectos complementarios de una misma realidad.

## Conceptos básicos

A continuación se definen y clasifican los métodos ópticos de análisis y se exponen los principios fundamentales en los que se basan.

Se definen como métodos ópticos de análisis aquellos que miden la radiación electromagnética que emana de la materia o que interacciona con ella. Se incluyen, por lo tanto, todos los campos del espectro electromagnético desde los rayos gamma a las ondas de radio. También se estudian todas las formas de obtención de radiación electromagnética, así como su interacción con la materia, incluyéndose la emisión, la absorción, la dispersión (scattering), la refracción, la dispersión refractiva (dispersión), la

reflexión, las interferencias, la difracción y la polarización, y se describen los métodos basados en cada uno de estos mecanismos.

Resulta adecuado dividir los métodos ópticos de análisis en dos tipos fundamentales, los espectroscópicos y los no espectroscópicos. Los métodos espectroscópicos se basan en la medida de la intensidad y la longitud de onda de la energía radiante. La característica común a todos los métodos espectroscópicos es que se miden espectros y además, que estos espectros son debidos a transiciones entre estados de energía característicos. Por otro lado, los métodos no espectroscópicos no miden espectros ni están relacionados con las transiciones entre estados de energía característicos sino que se basan en una interacción entre la radiación electromagnética y la materia que produce como resultado un cambio en la dirección o en las propiedades físicas de la radiación electromagnética. Los mecanismos específicos de interacción que intervienen en los métodos no espectroscópicos son la refracción, la reflexión, la dispersión refractiva, la dispersión, las interferencias, la difracción y la polarización. Son ejemplos de técnicas no espectroscópicas la refractometría, la difracción de rayos X y la polarimetría. Los métodos ópticos más utilizados son los espectroscópicos y en la mayoría de ellos el mecanismo de interacción se basa en la absorción o emisión de energía. Los métodos espectroscópicos se identifican fácilmente ya que llevan el prefijo espectro<sup>[4]</sup>.

## Métodos ópticos no espectroscópicos

Existen diferentes características por las cuales la energía del sol no llega completamente a la superficie terrestre, algunas de estas características dependen de las propiedades de las sustancias presentes en la atmósfera, las cuales pueden generar procesos de dispersión, absorción y reflexión de radiación solar.

Debido a lo anterior, existe una manera de medir la tendencia de una superficie a reflejar la radiación incidente, conocida como Albedo, la cual es expresada en porcentaje, y expresa la razón de la radiación que cualquier superficie refleja sobre la que incide sobre la misma. Las superficies claras tienen valores de albedo superior a las oscuras, y las brillantes más que las mates. El albedo medio de la tierra es del 30-32%

de la radiación que proviene del sol. En el caso de la atmósfera englobaría a nubes, procesos de difusión y reflexión de la superficie terrestre.

La atmósfera hace que gran parte de la energía de longitudes de onda corta se absorba, pero debido al movimiento de rotación de la Tierra, ésta hace que no se absorba en todas las zonas por igual, es decir la absorción es diferente en los polos que en el ecuador.

En la figura 5, se presentan los principales fenómenos que modifican la radiación de energía procedente del Sol, como nubes, árboles atmósfera, suelo, entre otros.

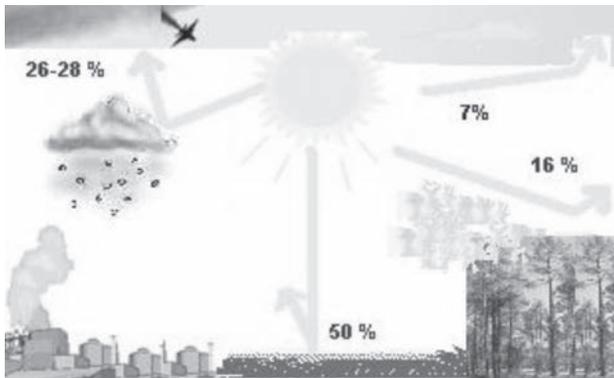


Figura 5. Presentación en porcentajes de algunos de los fenómenos que modifican la radiación solar<sup>[5]</sup>.

Existe un fenómeno que dispersa la radiación proveniente del sol en diferentes direcciones, provocado por las partículas diminutas presentes en la atmósfera, pero sin modificar la longitud de onda, conocido como dispersión atmosférica, la cual puede ser de dos tipos: selectiva y no selectiva.

La dispersión atmosférica selectiva se debe a partículas pequeñas, las cuales dispersarán más las longitudes de onda cortas que las de longitud de onda mayores, lo anterior es conocido como Dispersión Rayleigh.

La dispersión de Rayleigh (en honor a Lord Rayleigh) se debe a partículas mucho menores que la longitud de onda de los fotones dispersados. Ocurre cuando la luz viaja por sólidos y líquidos transparentes, pero se

ve con mayor frecuencia en los gases. La dispersión de Rayleigh de la luz solar en la atmosfera es la principal razón de que el cielo sea azul.

La dispersión atmosférica no selectiva se debe a partículas grandes, de diámetros mayores que la longitud de onda del haz de radiación incidente. Se denomina dispersión por partículas grandes o Dispersión Mie.

En la atmósfera existen gran cantidad de partículas en suspensión que poseen tamaños superiores a las longitudes de onda solares: aerosoles, gotitas de agua, polvo, partículas volcánicas, etc. Gustav Mie, físico alemán, descubrió en 1908, el efecto de dispersión que hoy en día lleva su nombre. Para moléculas o partículas grandes la luz es dispersada, preferentemente, en la misma dirección de incidencia, de forma que, la molécula en suspensión tiende a dispersar la luz en la misma dirección en la que incidió. La dispersión de Mie no depende tanto de la longitud de onda incidente como en la de Rayleigh. Cuando observamos las nubes poco espesas, tipo niebla o neblina, vemos que estas son blancas y no azules, esto es, las partículas acuosas no dispersan la luz selectivamente.

Por lo anterior se deduce que la cantidad de radiación dispersada depende de la longitud de onda de la radiación y del tamaño de las partículas presentes.

En la naturaleza, los colores que conocemos son debidos a la luz blanca proveniente del sol incidiendo sobre los objetos, los cuales reflejan los colores propios de las características de éstos, así un objeto que es iluminado por un haz de luz absorbe todos los colores y refleja el color del espectro correspondiente a la onda emitida por el pigmento que posee en su superficie. Analizando este fenómeno podríamos deducir que los objetos son de todos los colores, menos del color que reflejan.

Los colores que muestra el espectro son la combinación de los colores primarios, que no incluyen el blanco ni el negro, pues éstos se consideran valores. El blanco estaría indicando presencia de luz y el negro ausencia de luz.

Las moléculas gaseosas que componen la atmósfera son capaces de absorber gran parte de la radiación electromagnética procedente del sol, ese es el motivo de que esa radiación no llegue a la superficie de la tierra.

La atmósfera terrestre, deja pasar radiación electromagnética de

baja energía, como la luz visible y las ondas de radio pero no deja pasar la radiación más energética como la radiación UV-B, rayos gamma, rayos X que son radiación de longitud de onda corta.

Otro fenómeno interesante es el de reflexión, el cual se produce siempre que incide radiación en la interfase entre dos materiales de índice de refracción distinto. La calidad de la superficie tiene gran relación con la naturaleza del fenómeno. Así, si la superficie es lisa (como en un espejo) el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión, en cambio, las superficies irregulares dan lugar a reflexiones difusas (cuando no se conserva la imagen, pero se refleja la energía), un tipo de reflexión que tiene poco interés desde el punto de vista óptico. Además, si la superficie de separación es entre un medio dieléctrico y uno conductor, o entre dos medios dieléctricos, la fase de la onda reflejada eventualmente podría invertirse. En general, sea cual sea el ángulo de incidencia y el tipo de superficie, el haz reflejado difiere del haz incidente en la intensidad total, en el estado de polarización y en la fase. Además, si coexisten varias frecuencias, se presentan también, en general, diferencias cromáticas en la radiación reflejada. Ejemplos comunes incluyen la reflexión de la luz, el sonido y las ondas de agua.

En el proceso de reflexión parte de la radiación solar incidente es absorbida por la superficie terrestre y parte es reflejada, éste fenómeno dependerá de las propiedades del medio.

Así, elementos como la hierba, bosques, tierra y agua, reflejan menos del 10 % de la radiación incidente, pero elementos como la nieve fresca pueden reflejar el 80% de la radiación incidente.

La reflectividad de algunas superficies como la arena va del 35 al 45%, el de la vegetación herbácea es del 15 al 25%, el de los bosques de hoja caduca va del 5 al 10%, entre otros.

El sol emite radiación que abarca todo el espectro electromagnético, desde longitudes de ondas largas pertenecientes al infrarrojo, visibles, ultravioletas, rayos X, rayos gamma, radiación cósmica, etc. Parte de la radiación que emite el sol, es absorbida por la atmósfera terrestre, y otra parte, la emite la tierra hacia el espacio.

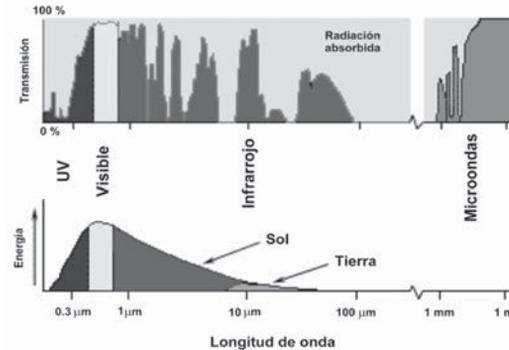


Figura 6. Transmisión y emisión de energía del sol y la tierra a diferentes longitudes de onda<sup>[5]</sup>.

En la figura 6, se representa la energía que emite el sol y la tierra a diferentes longitudes de onda. Se puede observar que la máxima emisión por parte del sol comprende la zona del visible, aunque también emite en gran cantidad en la zona del infrarrojo y en la zona del ultravioleta. Por parte de la tierra se observa que emite principalmente en la zona del infrarrojo térmico.

En la figura 6, en la parte superior de la gráfica se representa la transmisión a través de la atmósfera y se puede observar que la zona de color gris corresponde con la radiación absorbida por parte de la atmósfera, por lo que se hace patente que la radiación correspondiente a la región visible del espectro, se transmite completamente, y por tanto llega a la tierra.

En el análisis de la propagación de la luz en diferentes medios, se observan diferentes características que proporcionan información del medio, así por ejemplo, la refracción es la base de la refractometría, y puede definirse como el cambio de dirección de la radiación al pasar, de un material a otro, y puede atribuirse a las diferencias de velocidad en los dos medios. Siempre que la radiación pasa de un material dieléctrico a otro es parcialmente reflejada y parcialmente refractada (o transmitida), tal como se observa en la figura.

La energía reflejada aumenta cuando la diferencia de velocidad entre los dos medios aumenta, y ésta es a su vez superior cuanto mayor sea la diferencia de densidad entre los dos medios.

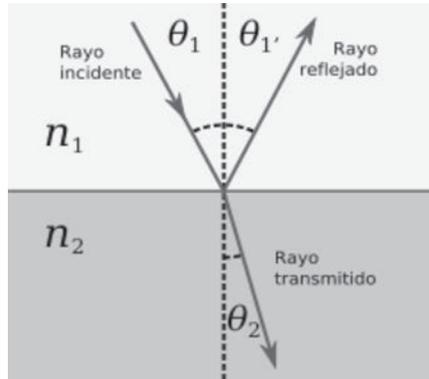


Figura 7. Representación de la ley de Snell, en donde se observa un haz de luz incidiendo a un ángulo  $\theta_1$ , el cual es reflejado al mismo ángulo y transmitido a un ángulo diferente que depende del índice de refracción  $n_2$  del medio<sup>[3]</sup>.

Una ley de refracción útil es la ley de Snell, utilizada para calcular el ángulo de refracción de la luz al atravesar la superficie de separación entre dos medios de índice de refracción distinto.

La ley de Snell representa el producto del índice de refracción por el seno del ángulo de incidencia el cual es constante para cualquier rayo de luz incidiendo sobre la superficie separatriz de dos medios. Aunque la ley de Snell fue formulada para explicar los fenómenos de refracción de la luz se puede aplicar a todo tipo de ondas atravesando una superficie de separación entre dos medios en los que la velocidad de propagación de la onda varíe.

$$n_1 \text{ sen } \theta_1 = n_2 \text{ sen } \theta \quad (1)$$

La razón por la cual los prismas permiten descomponer la luz en función de sus longitudes de onda, radica en que la velocidad de la radiación en un medio determinado depende de su longitud de onda. De la ecuación anterior, puede deducirse que los mejores prismas serán los de materiales de índice de refracción elevados, lo cual se cumple siempre que el material del prisma no absorba las longitudes de onda de interés.

Otro análisis, es realizado según la ley de Malus, así llamada por su descubridor, el físico francés Étienne-Louis Malus, el cual indica que la

intensidad de un rayo de luz polarizado linealmente, que atraviesa un polarizador perfecto equivale al producto de la intensidad de la luz antes de pasar por dicho polarizador y al cuadrado del coseno del ángulo entre el eje del polarizador y el eje de polarización de la luz incidente.

$$I = I_0 \cos^2 \theta_i \quad (2)$$

A partir del conocimiento de la polarización de la luz, surge el polarímetro el cual es un instrumento que sirve para determinar el valor de la desviación de la luz polarizada por un material ópticamente activo (enantiómero). A partir de un rayo de luz, a través de un filtro polarizador obtenemos un rayo de luz polarizado plana, que al pasar por un portamuestras que contiene un enantiómero en disolución, se desvía. Según la orientación relativa entre los ejes de los dos filtros polarizantes, la luz polarizada pasará por el segundo filtro o no. Lo anterior se debe a que el plano de la luz polarizada girará al pasar a través de esta sustancia y, por lo tanto, el segundo prisma deberá ser colocado en una posición ligeramente diferente al primero para observar luz. La diferencia entre la posición del primero y la del segundo indica el poder rotatorio de la muestra analizada y a partir de este valor se pueden calcular diversas características de la sustancia.

Otro instrumento de medición basado en el principio de polarización es el sacarímetro o analizador de penumbra, el cual es un instrumento utilizado para medir la desviación introducida en el eje de vibración de la luz linealmente polarizada al atravesar una sustancia ópticamente activa, ya que el sacarímetro mide la concentración de azúcar y debido a la estructura molecular de esta sustancia, las soluciones rotan el plano de polarización de la luz plana polarizada mientras pasa la luz a través de ellas. La rotación del plano de polarización cuando la luz incidente es vista puede ser a la derecha (sentido horario) o a la izquierda (sentido antihorario).

Otro método de caracterización es basado en la ley de Beer-Lambert, en donde la relación entre la absorción de la luz por una solución diluida o por un gas y la concentración de la fase absorbente viene dada por la ley de Beer, mientras que la relación entre la absorción de la luz

y el camino recorrido por ésta (o sea, el espesor de la cubeta de prueba) viene dada por la ley de Lambert. Por lo cual es conveniente considerar ambas leyes conjuntamente.

Para deducir la ecuación que se busca se postula, en primer lugar, que cada cuanto de luz que penetra en la solución tiene igual oportunidad de ser absorbido. Esto implica que la luz es monocromática. En segundo lugar, se postula que cada molécula de la sustancia que absorbe tiene igual oportunidad de interceptar y absorber un cuanto de luz, cualquiera que sea su situación dentro de la cubeta. Esto implica que la solución es suficientemente diluida para que ninguna molécula quede oculta en la sombra de la otra.

Considerando un haz de luz de intensidad  $I_0$  que penetra en una cubeta llena de una solución de concentración  $c$ . Después de haber atravesado una distancia  $x$  dentro de la cubeta, la luz tendrá una intensidad  $I$ . Cuando haya atravesado una distancia adicional infinitamente pequeña,  $dx$ , la intensidad será  $I+dl$ . (Evidentemente, el incremento  $dl$  es negativo; la luz se debilita al atravesar la célula.) Se tiene

$$\frac{dl}{I} = -kcdx \quad (3)$$

En óptica, la ley de Beer-Lambert, también conocida como ley de Beer o ley de Beer-Lambert-Bouguer es una relación empírica que relaciona la absorción de luz con las propiedades del material atravesado.

En resumen, la ley explica que hay una relación exponencial entre la transmisión de luz a través de una sustancia y la concentración de la sustancia, así como también entre la transmisión y la longitud del cuerpo que la luz atraviesa. Si conocemos  $l$  y  $\alpha$ , la concentración de la sustancia puede ser deducida a partir de la cantidad de luz transmitida.

La ley tiende a no ser válida para concentraciones muy elevadas, especialmente si el material dispersa mucho la luz.

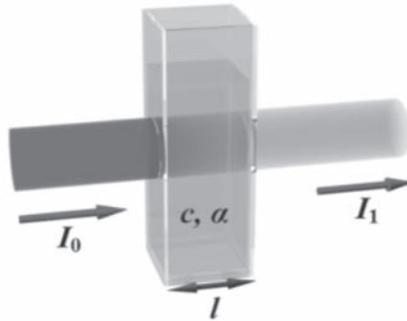


Figura 8. Diagrama de la absorción de un haz de luz atravesando una cubeta de tamaño  $l$ , que contiene un elemento con una concentración  $c$ <sup>[3]</sup>.

El investigador nunca debe admitir a priori que las soluciones con que trabaja obedecen la ley de Beer. Lo que se tiene que hacer siempre es medir la absorbancia de tres o cuatro soluciones patrón de concentración conocida, (y mejor, de un mayor número de estas soluciones) y representar gráficamente los valores leídos de absorbancia en función de la concentración. Idealmente, esta gráfica debe ser una recta que pasa por el origen ( $A=0$  cuando  $c=0$ ). Pero si los propios reactivos puestos para producir el color absorben luz, o si contienen impurezas, la absorbancia  $A$  podrá ser distinta de cero cuando la concentración (puesta) sea cero. Ocurre muchas veces, que este gráfico de calibrado no es rectilíneo más que a concentraciones bajas, curvándose a concentraciones mayores hacia un lado u otro de la recta ideal, dando lugar a desviaciones positivas o negativas. Son varios los factores que pueden originar estas desviaciones de la ley de Beer, siendo los más comunes:

Empleo de luz no monocromática, al deducir la ley de Beer se postuló que cada cuanto de luz tiene igual probabilidad de ser absorbido. Ello no será cierto, en general, si los cuantos de luz que penetran en la solución tienen energías diferentes, esto es, si la luz no es monocromática. Ahora bien, la luz verdaderamente monocromática es un ideal, al que cabe aproximarse, pero que no es posible realizar; la luz que penetra en la solución contiene siempre radiaciones de longitudes de onda diversas comprendidas de un cierto intervalo, siendo este intervalo muy pequeño en unos casos y más amplio en otros<sup>[6]</sup>.

Asociación o disociación de las especies absorbentes de luz. Ocurre a veces que la concentración de las moléculas que realmente absorben luz no es igual a la concentración total de la sustancia que se desea determinar. En tales casos puede suceder que la concentración de la sustancia absorbente no aumente o disminuya proporcionalmente a la concentración total.

## Métodos ópticos espectroscópicos

En gran medida la química de la atmósfera requiere del estudio de la interacción de la luz procedente del sol con las moléculas que conforman las diferentes regiones de la atmósfera.

Los procesos que tienen lugar en la atmósfera son muy variados, aunque los procesos fotoquímicos son los más importantes. La formación de radicales mediante procesos de fotólisis forman una variada gama de éstos, cuya descripción y explicación es precisa para comprender la física y química atmosféricas.

De esta forma la espectroscopía, al igual que la fotoquímica es fundamental para la comprensión de la química atmosférica.

Buena parte de las moléculas de interés atmosférico son moléculas sencillas, oxígeno, nitrógeno, ozono, aunque otras sean más complejas como hidrocarburos o compuestos orgánicos volátiles.

La espectroscopía molecular precisa de la infraestructura de la mecánica cuántica la descripción de la materia y la interacción de la radiación con ella y, en casos, el tratamiento cuántico de la radiación. Las técnicas desarrolladas son muy variadas y algunas de ellas no exentas de sofisticación. En general, las espectroscopías de rotación, vibración rotación y electrónica configuran el mayor porcentaje de cobertura para el estudio y tratamiento de la química atmosférica.

Desde un punto de vista histórico la región del espectro visible es la primera que se conoció y se ha utilizado a partir de las primeras mediciones cuantitativas de la transmisión de la luz efectuadas por Bouguer en 1729. La región infrarroja fue descubierta por Herschel en 1800, pero no fue utilizada con fines analíticos hasta los trabajos de Julius en 1892, y de un modo sistemático hasta la década de 1920. La región ultravioleta

leta fue descubierta por Ritter en 1801 pero no fue utilizada analíticamente hasta la década de 1920, y su desarrollo y uso rutinario no ha tenido lugar hasta 1940. Las demás regiones del espectro se han utilizado analíticamente más recientemente y en general, su uso es mucho menor que la región de los 200nm a los 25 $\mu$ m. Es una excepción la espectroscopía de resonancia magnética nuclear (rmn) en la región de la radiofrecuencia, que ha experimentado un desarrollo extraordinario desde que se efectuaron los primeros experimentos en 1945 y que se ha convertido en uno de los métodos más importantes para la elucidación de estructuras orgánicas.

La espectrofotometría es el método de análisis óptico más usado en las investigaciones biológicas. El espectrofotómetro es un instrumento que permite comparar la radiación absorbida o transmitida por una solución que contiene una cantidad desconocida de soluto, y una que contiene una cantidad conocida de la misma sustancia.

Todas las sustancias pueden absorber energía radiante, aun el vidrio que parece ser completamente transparente absorbe longitud de ondas que pertenecen al espectro visible; el agua absorbe fuertemente en la región del infrarrojo.

La absorción de las radiaciones ultravioleta, visibles e infrarrojas depende de la estructura de las moléculas, y es característica para cada sustancia química.

Cuando la luz atraviesa una sustancia, parte de la energía es absorbida; la energía radiante no puede producir ningún efecto sin ser absorbida.

El color de las sustancias se debe a que éstas absorben ciertas longitudes de onda de la luz blanca que incide sobre ellas y sólo dejan pasar a nuestros ojos aquellas longitudes de onda no absorbidas.

La espectrofotometría proveniente del sol, es decir la radiación ultravioleta-visible usa haces del espectro electromagnético y radiaciones del campo UV de 80 a 400 nm, principalmente de 200 a 400 nm y usa haces de luz visible de 400 a 800 nm, por lo que es de gran utilidad para caracterizar las soluciones en la región ultravioleta y visible del espectro.

Al campo de luz UV de 200 a 400 nm se le conoce también como rango de UV cercano, la espectrofotometría visible solamente usa el rango del campo electromagnético de la luz visible, de 400 a 800 nm.

A este tipo de técnicas se conoce en conjunto como técnicas fisico-bioquímicas, en relación a la espectrofotometría se tiene una ley muy importante, la ecuación de Beer-Lambert.

La ecuación simplificada de la ley de Beer-Lambert comprende a la *mínima* ecuación que relaciona la concentración, la absorbancia de la muestra y el factor de calibración. El factor de calibración relaciona la concentración y la absorbancia de los estándares.

Un modo de aumentar la exactitud de las determinaciones fotométricas, especialmente en los casos en que las soluciones presentan fuerte absorbancia, consiste en comparar la intensidad de la luz que pasa por la solución con la intensidad de un haz de luz de la misma lámpara o foco luminoso, que atraviesa una segunda solución cuya concentración es conocida exactamente y que es un poco menor que la de la muestra que se determina. Esto se puede realizar fácilmente: basta con colocar la segunda solución o solución de referencia en el recorrido del haz luminoso y ajustar el medidor para que dé una lectura del 100 por cien de transmitancia. Entonces se sustituye la solución de referencia por la solución problema y se leen la transmitancia y la absorbancia aparentes.

Sea  $I_0$  la intensidad de la luz antes de pasar por la cubeta. Sean  $I_1$  la intensidad de la luz que emerge de la solución problema e  $I_2$  la de la luz que emerge de la solución de referencia. Sean  $c_1$  y  $c_2$  las concentraciones de ambas soluciones. Se verifica:

$$\log I_1 = \log I_0 - kc_1 \quad (4)$$

$$\log I_2 = \log I_0 - kc_2 \quad (5)$$

Donde  $k$  es el producto de la absorptividad molar por el espesor de la cubeta, igual para ambas soluciones. Resulta evidente que:

$$\log \frac{I_1}{I_2} = k(c_2 - c_1) \quad (6)$$

Así, el espectrofotómetro mide ahora la diferencia entre las dos concentraciones y un error en la medida de esta diferencia dará lugar a un error relativo menor en la medida de  $c_1$ .

En la práctica no se mide nunca  $I_0/I$ , sino que primero se coloca una cubeta con el disolvente puro en la trayectoria del haz, luego se coloca otra cubeta con la solución problema en dicha trayectoria y se comparan las intensidades de los dos haces luminosos emergentes. El  $I_0$  utilizado al aplicar la ley de Beer, es en realidad la intensidad de la luz transmitida por la cubeta que contiene disolvente puro. De esta forma se compensa la luz que se pierde por reflexión en las superficies de las paredes de la cubeta<sup>[7]</sup>.

## Aplicaciones

En la actualidad existen una gran variedad de técnicas de medición de contaminación, las cuales han sido desarrolladas y aplicadas para entender la interacción de emisiones gaseosas en escala local y global. Sin embargo, estas emisiones se diluyen rápidamente en la atmósfera bajo condiciones de flujo no estacionarios, las concentraciones de varios de estos gases son extremadamente bajas, en algunas ocasiones por debajo de niveles de una parte por millón (ppm), lo cual significa un reto tecnológico y científico importante.

Se pueden encontrar una gran variedad de reportes científicos con experimentos para la detección de estos gases. Básicamente, para medir la presencia de ciertos gases en la atmósfera, es importante tomar en cuenta los siguientes parámetros:

- Determinar las fuentes principales de contaminación (tráfico, agricultura e industria)
- El origen de las fuentes de emisión (procesos industriales resultan en diferentes fuentes puntuales)

Mediante el monitoreo del entorno, se pueden optimizar estrategias de control de contaminación por gases, y así reducir las emisiones.

Tradicionalmente, las emisiones de gases son medidas y monitoreadas utilizando métodos químicos de contacto, donde el gas es extraído desde el punto de medición y manipulado para su medición y caracterización, las muestras son sujetas a una reacción química específica, para la detección y concentración de las mismas. Sin embargo, existen diferentes desventajas asociadas con esta técnica<sup>[8]</sup>:

- Debido a las extremadas bajas concentraciones de gas es necesario muestrear por largos periodos de tiempo, dependiendo del tipo de gas de interés en ocasiones horas, antes de obtener una medición aceptable.
- Existen muchas fuentes de error relacionadas a la extracción y manipulación del gas, y en general el proceso será laborioso y tomará mucho tiempo.
- Existen además problemas particulares como en gases que son fácilmente absorbidos en la superficie. Como consecuencia una gran cantidad de este es perdido en el proceso de extracción y manipulación para su estudio, por lo que la cuantificación resulta en una tarea difícil. Afortunadamente, una pequeña cantidad de gases contaminantes son de este tipo, por ejemplo HCl, HF y NH<sub>3</sub>.

Existen diferentes técnicas ópticas para la caracterización, detección y control de gases, a continuación se describen algunas de estas.

Técnica DOAS (espectroscopía de absorción óptica diferencial)

La presencia y el comportamiento de muchos gases traza, presentes en la atmósfera (óxidos de nitrógeno, ozono, óxido de azufre, etc.) se pueden investigar por medio de la espectroscopia de absorción óptica diferencial (DOAS). Así, a través del espectro de absorción específico de cada molécula se puede concluir su presencia y cuantificar la misma.

Los compuestos atmosféricos se han medido, tradicionalmente, empleando técnicas químicas. El ozono se ha medido burbujeando aire a través de una disolución conteniendo ioduro, y el elemento resultante que se forma se mide utilizando técnicas químicas. Pero los métodos químicos están sujetos potencialmente, a muchas interferencias que, en el caso del ozono, por ejemplo, pues son todos aquellos compuestos que interfieren en la oxidación del ioduro, como el SO<sub>2</sub>, que provocará una interferencia negativa, mientras que el NO<sub>2</sub> también interferirá, pero, ahora, positivamente. Así las cosas, debido a que el método no es específico del O<sub>3</sub>, los datos obtenidos con este método de determinación se suelen referir en la literatura como “oxidante”, más que como ozono, aunque sea este último el que contribuye en mayor grado.

Todos los métodos tradicionales, se siguen empleando, hoy día, con más precaución y precisión, aunque se han abierto paso métodos instrumentales, entre los cuales, los espectroscópicos ocupan un lugar muy destacado. El hecho de que las medidas que se llevan a cabo son en el propio medio, la atmósfera, tanto a nivel troposférico como estratosférico, es preciso desarrollar técnicas sofisticadas, que, normalmente, van acompañadas por modelos descriptivos y aproximaciones dinámicas de la propia atmósfera.

La técnica DOAS ocupa un lugar, especialmente destacado, entre las técnicas instrumentales espectroscópicas empleadas en la detección de contaminantes en la atmósfera, reconocida como método de referencia para control de la calidad del aire.  $\text{NO}_2$ ,  $\text{O}_3$  y  $\text{SO}_2$  tienen al DOAS como método de referencia para el control de los contaminantes gaseosos en la atmósfera por la Agencia de Protección ambiental de USA.

En las regiones UV y visible se absorben muchos de los gases de interés atmosférico y ello representa una limitación que nos obliga a distinguir entre cada una de las distintas especies, así como de la absorción del fondo y la dispersión Rayleigh y Míe de los mismos gases y de las partículas presentes en la atmósfera. Esto obliga a una primera restricción que consiste en aplicar la espectroscopía UV-visible a aquellas especies cuya estructura de bandas tiene una anchura de banda de 5 nm o inferior, siendo esta restricción soportada por la técnica denominada DOAS o espectrometría de absorción óptica diferencial.

Una de las ventajas más importantes del DOAS es la elevada sensibilidad cuando los compuestos presentan bandas de absorción estrechas en la región espectral UV-visible.

Es preciso disponer de un espectro de absorción a efectos de calibrado para poder ajustar los espectros DOAS de los compuestos a estudiar. Como en todos los calibrados, deben llevarse a cabo con el mismo instrumento y en las mismas condiciones que vamos a utilizar, aunque, naturalmente siempre que se conviertan resolución y condiciones de medida, podremos emplear espectros aportados en la literatura.

En el proceso de cuantificación es habitual emplear procedimientos de mínimos cuadrados lineales como no lineales para ajustar las intensidades medidas a las de los espectros de referencia escalados, minimizando la absorbancia residual.

De la figura 9, se observa que la fuente de luz utilizada es una fuente de banda ancha, como por ejemplo una lámpara incandescente de iodo cuarzo, o una lámpara de alta presión de Xe, o un láser de banda ancha, o el propio sol a la luna. La luz atraviesa la muestra de aire, en un solo paso o en varios pasos a través de una célula abierta. La luz que ha pasado a través de la muestra alcanza la ventana de entrada de un espectrofotómetro, cuya misión es llevar a cabo una dispersión de la luz, con objeto de poder detectar a partir de la luz dispersada con mayor precisión, al permitir seleccionar longitudes de onda con anchuras de banda más estrechas y hacerlas incidir en el detector, que bien como fotomultiplicador o matrices de fotodiodos (PDA) o con dispositivos de carga acoplados (CCD) permiten cuantificar los fotones de cada longitud de onda que lo alcanzan.

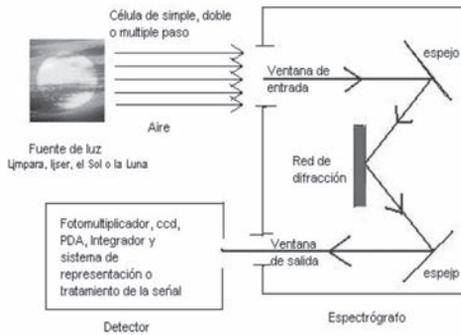


Figura 9. Esquema de un montaje instrumental DOAS.

Si se utiliza la luz del sol o de la luna como fuentes, podemos obtener una medida de la concentración presente en la columna de atmósfera situada sobre el lugar de medida, lo que supone acceder a la concentración integrada a lo largo de la columna de atmósfera. Así se han medido el  $\text{NO}_2$  y el radical nitrato presente en la atmósfera<sup>[9][10]</sup>. Estas medidas tomadas en función del ángulo cenital solar, nos proporciona información sobre la distribución vertical de las especies que absorben, para lo que es necesario situarse en condiciones libre de nubes, ya que, como es de esperar, la presencia de nubes puede aumentar de forma muy importante el camino óptico a través de la atmósfera, donde la dispersión

de Mie por las gotas de agua de las nubes, puede llegar a aumentar el camino óptico en un orden de magnitud.

En el caso de emplear el DOAS en determinaciones horizontales, o de superficie, midiendo la absorción integrada a lo largo de un camino óptico directo y extenso o caminos ópticos doblados, que dan lugar, también a caminos ópticos grandes, con lo que la sensibilidad es elevada, aunque en este último caso, las medidas se efectúan mucho más próximas al lugar de medida.

Los fotomultiplicadores y las matrices de diodos son los elementos más comunes de detección empleados.

Al igual que en la espectroscopia convencional, el prisma de dispersión se utiliza para dispersar la luz que incide en él y cambiando el ángulo, es decir, girando el prisma obtenemos las diferentes longitudes de onda que se enfocan a la ventana de salida y se llevan a incidir al fotomultiplicador. Un PDA tiene la ventaja de que registra todas las longitudes de onda simultáneamente, mejorando la relación señal/ruido, aunque, también, tiene inconvenientes derivados de que la respuesta de los píxeles no es idéntica.

En la tabla 1, se observan los límites de detección para algunos gases atmosféricos de interés obtenidos para longitudes de camino óptico de 5 km y 15 km empleando como detector una matriz de fotodiodos, que típicamente, agrupa a 1024 de ellos.

En el caso del HONO y del NO<sub>3</sub>, es especialmente útil la técnica DOAS, porque hay una amplia variedad de métodos que se han revelado incapaces para su determinación. Como el NO<sub>3</sub> sufre fotólisis muy rápidamente sólo es detectable durante la noche; se emplean las bandas de 623 nm y 662 nm.

También se ha empleado el DOAS para medir el radical OH y los radicales libres BrO, ClO e IO en la atmósfera. Hay una destrucción de ozono a nivel superficial, catalizada por halógeno, creyéndose que el Br es el reactante que destruye en mayor cuantía.

Se ha detectado en la salida del sol en el Ártico y generado en laboratorio a concentraciones de 17 ppt<sup>[11]</sup>. También se ha detectado en el Mar Muerto, en Israel, atribuyéndose a una reacción heterogénea de la sal marina.

Tabla 1. Datos que expresan la eficiencia en la detección de contaminantes de la técnica DOAS.

Compuesto	Longitud 5 km	Longitud 15 km
O <sub>3</sub>	0.17 - 1.4 ppb	0.2 - 0.45 ppb
SO <sub>2</sub>	50 - 100 ppt	16 - 33 ppt
NO <sub>2</sub>	100 -200 ppt	33 - 66 ppt
HCHO	200 - 500 ppt	66 - 166 ppt
HONO	30 - 60 ppt	10 - 20 ppt
NO <sub>3</sub>	1 - 3 ppt	0.33 - 1 ppt
OH	0.06 ppt	
ClO	1 ppt	
BrO	0.5 ppt	
IO	0.4 ppt	

### Técnica TDLAS (Espectroscopía por absorción de un diodo láser sintonizable)

Todos los compuestos orgánicos, y muchos compuestos inorgánicos, presentan una fuerte absorción en la región espectral del infrarrojo (2.5-15  $\mu\text{m}$ ), debido a la resonancia con los modos de vibración rotacional de las moléculas. Se observan picos y bandas específicos, haciendo posible identificar diferentes compuestos químicos, y por lo tanto se hace factible distinguir entre algunas estructuras de isómeros.

El primer diodo semiconductor láser disponible comercialmente, TDLAS para análisis de gases estuvo disponible para uso en laboratorio en 1990. En la actualidad los instrumentos basados en TDLAS comerciales, prácticos y robustos, presentan características de monitoreo y medición continua de pequeñas concentraciones de cierto tipo de gases<sup>[8]</sup>.

La técnica del TDLAS está basada en los principios de espectroscopía y técnicas de detección sensibles. Las moléculas de gas absorben fotones del láser a longitudes de onda específicas de la estructura

de bandas de energía de las especies bajo investigación, y a longitudes de onda ligeramente diferentes a estas líneas de absorción no existe básicamente ninguna absorción (Ley de extinción de Beer-Lambert). Realizando un barrido de longitudes de onda del láser a través de las líneas de absorción del gas bajo análisis, y midiendo específicamente la magnitud de la absorción, se puede deducir la concentración de las moléculas del gas analizado.

Esta técnica es utilizada en investigaciones de ecosistemas y estudios atmosféricos donde se detectan y cuantifican bajas y ultra-bajas concentraciones de gases traza (frecuentemente tóxicos). En estudios de efectos ambientales puede proveer información sobre la fuente, vertedero y transporte de sustancias y puede permitir explorar gases de efecto invernadero.

El efecto que diferentes gases traza tiene sobre la atmosfera, y el clima han sido extensivamente estudiados. Probablemente, el más estudiado es el gas de efecto invernadero  $\text{CO}_2$  y  $\text{O}_3$  destruyendo clorofluorocarbones (CFC). Pero otros gases traza asociados con los efectos antes mencionados son  $\text{CH}_4$  y óxidos de nitrógeno.

En la actualidad, la habilidad para cuantificar pequeñas concentraciones de gases traza, y seguir su evolución desde la fuente a su destino final es la clave de los estudios de nuestro ecosistema y atmosfera. La técnica de correlación Eddy además de resolución temporal alta (menores a ls) son requeridas para el estudio de la biósfera-atmosfera o aire, intercambio de agua de mar, medición de flujo de gas traza.

La técnica de correlación Eddy determina directamente el flujo de trazas atmosféricas a través de un plano paralelo la tierra. Esto representa un transporte instantáneo por arriba o debajo de las especies bajo investigación, interpolando un flujo neto, ideal.

Existen técnicas de campo que miden la temperatura para propósitos meteorológicos y muestreo de gases continuos. Datos micrometeorológicos (dirección y velocidad del viento, temperatura, presión, humedad y otros factores) pueden ser almacenados junto con la señal desde el sensor de gas traza TDLAS, los cuales pueden ser analizados posteriormente.

Una variedad de investigaciones son ubicadas en la atmosfera baja (troposfera y estratosfera), como disminución de O<sub>3</sub>, calentamiento global, cambio climático y calidad del aire, por nombrar los más comunes.

Un incremento significativo para esta tarea son los sensores basados en láseres para monitoreo *in situ* de las concentraciones de una variedad de gases traza, incluyendo CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, NO, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, etc. Los Instrumentos TDLAS son muy sensibles, rápidos, compactos y pueden ser completamente automatizados.

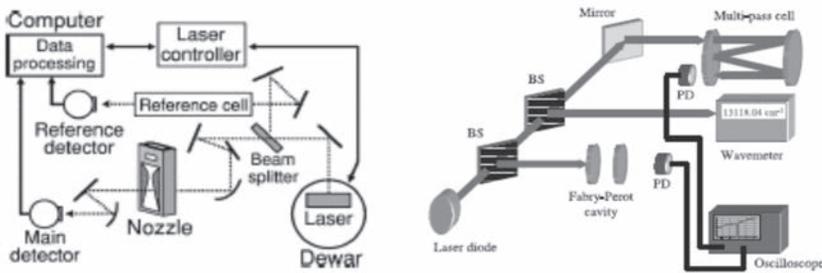


Figura 10. Dos arreglos experimentales que presentan el arreglo instrumental basado en TDLAS.

Un arreglo experimental de un sistema TDLAS puede realizarse colocando una celda de gas como su pieza central. Este muestreo analítico a través de un volumen cerrado permitirá el control de parámetros internos y externos (temperatura ambiente, presión del gas en la celda, etc.). Un Sistema de flujo de gas puede ser analizado mediante modificaciones al arreglo, para lograr dicho flujo a través de la celda, normalmente se utiliza una bomba. Esta configuración constituye un sistema de lazo abierto.

### Técnica FTIR (Espectroscopía infrarroja basada en la transformada de Fourier)

La técnica FTIR es una técnica de medición donde el espectro es obtenido mediante la medición de la coherencia temporal de una fuente de radiación, utilizando mediciones en el dominio del tiempo de la radiación electromagnética o cualquier otro tipo de radiación. Esta técnica



El interferómetro, que sustituye al tradicional monocromador, es la parte esencial de este aparato, pues es el encargado de modular cada frecuencia del infrarrojo con el fin de realizar la transformada de Fourier.

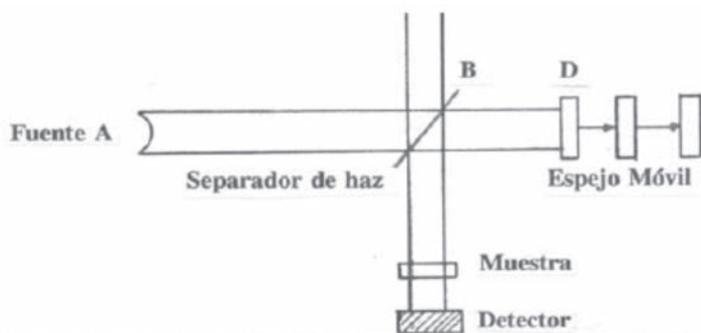


Figura 12. Esquema de un interferómetro<sup>[12]</sup>.

El esquema de un interferómetro se muestra en la figura 12, consta de un divisor de haz B que refleja la radiación infrarroja hacia un espejo fijo C y hacia otro móvil D. Los dos haces reflejados se recombinan de nuevo en el divisor de haz, interfiriendo constructiva o destructivamente según sea el valor de la diferencia de camino óptico entre el divisor y cada uno de los espejos. Por ejemplo, para un desfase  $\delta=0, \lambda, 2\lambda, \dots$  los dos rayos interfieren constructivamente y si  $\delta=\lambda/2, 3\lambda/2, 5\lambda/2, \dots$  destructivamente; así, si se va cambiando el valor del desfase suavemente desde cero; se detecta una señal de intensidad modulada como una función cosenoidal.

La señal de salida del interferómetro se denomina interferograma que es la suma de todas las ondas cosenoidales moduladas.

En espectroscopia infrarroja no existen buenos disolventes que sean transparentes a todas las radiaciones espectrales, lo que entraña una dificultad para determinar con exactitud la absorción de radiación por parte de las moléculas.

Se pueden analizar compuestos en estado sólido, líquido y gaseoso; el recipiente de la muestra será distinto según se presente la misma y ha de estar construido de un material transparente a la radiación, con las indicaciones que se hicieron al hablar de la construcción de los prismas, como redes de dispersión.

La espectroscopia infrarroja tiene aplicaciones en análisis cualitativo y cuantitativo. Su principal utilización ha sido en la identificación de compuestos orgánicos, debido a que no existen, teóricamente, dos compuestos que absorban exactamente en las mismas frecuencias.

También se emplea cada vez más en el análisis cuantitativo por su gran selectividad, lo que posibilita calcular concentraciones de una sustancia en una mezcla compleja sin la realización de separaciones previas. El proceso analítico cuantitativo es similar al de la espectroscopia visible y ultravioleta; sin embargo, las características del material y la sensibilidad del sistema de detección producen resultados más desfavorables. La espectroscopia de infrarrojo, como técnica cuantitativa, tiene su principal aplicación en el análisis de contaminantes atmosféricos provenientes de los procesos industriales.

Por lo que respecta al análisis cualitativo, la identificación de un compuesto se hace a partir del estudio sistemático del espectro correspondiente. Se empieza por identificar los grupos funcionales (enlaces químicos de la molécula); para ello, se utiliza un gráfico de correlación o tabla de grupos funcionales, donde aparecen las frecuencias en  $\text{cm}^{-1}$  a las que es previsible la aparición de las bandas de absorción de cada uno de los grupos funcionales, sin olvidar que los enlaces próximos pueden modificarlas ligeramente. En todos los casos, es importante tener en cuenta que si un espectro no contiene la absorción típica de cierto grupo funcional, la molécula no contiene dicho grupo.

Una vez localizados los grupos constituyentes de la molécula, con el resto de información que se disponga, se establece una hipótesis molecular y se pasa al análisis de la región de la huella dactilar (frecuencias  $< 1.200 \text{ cm}^{-1}$ ) en las que se encuentran las bandas características de cada compuesto. En esta zona, pequeñas diferencias en la estructura y la constitución de las moléculas da lugar a variaciones importantes en los picos de absorción.

La mayoría de los enlaces simples se manifiestan con picos en esta zona, que al tener intensidades parecidas, se produce una fuerte interacción entre enlaces vecinos; lo que da como resultado bandas de combinación, que están en función de la estructura general de la molécula.

Compuestos que normalmente se analizan cualitativamente son: parafinas, aromáticos, olefinas, alcoholes, aldehídos, cetonas, ácidos orgánicos, fenoles, ésteres, éteres, aminas, amidas, anhídridos, etc.

Tabla 2. Intervalo de frecuencias y tipos de vibraciones características de los grupos funcionales<sup>[12]</sup>.

INTERVALO DE FRECUENCIAS (v cm <sup>-1</sup> )	TIPO DE VIBRACION	ENLACE
3500 - 3200	Tensión	O-H, N-H
3300 - 3000	Tensión	=C-H, ≡C-H, Ar-H
3500 - 2500	Tensión	O-H + C-H (Acido)
3000 - 2800	Tensión	CH, -CH-, C-H <sup>δ</sup> , O=C <sup>δ</sup> H
2400 - 2100	Tensión	C=C, C≡N
2000 - 1650	Vibraciones Secundarias	Procedentes del Ar-H deformación (3-4 bandas)
1800 - 1650	Tensión	C=O (ácidos, cetonas, aldehidos, amidas, ésteres)
1675 - 1500	Tensión	C=C, C=N (alifáticos y aromáticos)
1650 - 1550	Deformación	N-H
1475 - 1300	Deformación	C-H
1300 - 1100	Tensión	C-O (éteres)
1300 - 1050	Tensión	C-O (ésteres) (2 bandas)
1000 - 600	Deformación	C=C-H, Ar-H (fuera del plano)

## Técnica DIAL (LIDAR, Absorción diferencial por búsqueda y detección de luz)

LIDAR es un acrónimo para detección y rastreo de luz (Light Detection and Ranging), un sensor activo muy similar al Radar pero que mide la radiación devuelta ya sea por la superficie terrestre o por las partículas que componen la atmosfera cuando se ilumina por una fuente de luz láser. La longitud de onda utilizada en los sensores LIDAR permiten análisis detallados en la observación, sin embargo, el láser no puede penetrar capas espesas como las nubes.

Los sensores lidar se utilizan en forma efectiva para medir la altura de los objetos, tales como la altura relativa de la cubierta vegetal respecto de la superficie del suelo o la profundidad relativa de una capa de agua. El altímetro lidar proporciona información sobre la topografía de la superficie terrestre. No obstante destacan sus aplicaciones en estudios atmosféricos. El lidar multifrecuencia con longitudes de onda en el visible e infrarrojo se utiliza para medir la distribución en altura de los aerosoles y la altura de las nubes. El dispersómetro lidar y el de absorción diferencial pueden ser utilizados para medir las propiedades de las nubes, y el lidar doppler para estimar vientos en 3D en atmósferas claras.

La técnica DIAL (Lidar de Absorción Diferencial) es un ejemplo de una tecnología de teledetección activa, el cual se basa en que puede emitir su propia energía electromagnética a un blanco y luego registrar la interacción que ocurre entre la energía y el blanco. Un sistema DIAL envía pulsaciones controladas de energía láser y luego mide la interacción entre la energía láser y el blanco.

Las ventajas que posee esta técnica es la capacidad de obtener mediciones directas de gases específicos, sin importar la hora del día ni la estación del año. Capacidad de localizar y cuantificar con exactitud las emisiones. La capacidad de controlar la iluminación del blanco. Los sistemas activos tienen mejor ventaja cuando el sol no proporciona de manera suficiente las longitudes de onda deseadas, como por ejemplo partes de la mitad de la onda de los rayos infrarrojos (IR).

Sus desventajas son que requiere una gran cantidad de energía generada para iluminar adecuadamente al blanco. Entre otras desventajas

se encuentran los complejos diseños de sistema, los componentes, la integración y el análisis de los datos.

Existen otras técnicas que pueden ser empleadas en el estudio de contaminantes como la manipulación de micropartículas utilizando pinzas ópticas, el principio de atrapamiento de una micropartícula se basa en las dimensiones de esta, si su diámetro es menor que la longitud de onda del haz láser utilizado se trabaja en el régimen de campos ópticos o Rayleigh, en caso contrario se trabaja en el régimen de rayos ópticos de Mie.

La técnica de barrido en  $z$  para la caracterización óptica no lineal de materiales, utilizada para determinar el signo y la magnitud del coeficiente del índice de refracción no lineal de una muestra moviéndose a lo largo de un haz altamente enfocado.

Lo anterior define el seguimiento que habrá de darle al campo de la óptica en materia ambiental, específicamente en el estudio de la contaminación y en el análisis de los contaminantes.



## Bibliografía

1. Conrad G. Mueller y Mae Rudolph. 1980. *Luz y visión*, Time life books, segunda edición.
2. Eugene Hecht. 1992. McGraw-Hill
3. <http://es.wikipedia.org/>
4. Eugene D. Olsen. 1990. *Métodos ópticos de análisis*, 535 páginas.
5. <http://www.um.es/LEQ/Atmosferas/index.htm>
6. Concepción Pérez Conde. 1996. *Sensores ópticos*, 180 páginas.
7. Harold F. Walton, Frederic Walton Harnold, Jorge Reyes, Enric Cassas, J. Duñach Archs. 1983. *Análisis químico e instrumental moderno*, 391 páginas.
8. Telle, Helmut H., Ángel González Ureña, Robert J. Donovan. 2007. *Laser Chemistry: Spectroscopy, Dynamics and Applications*, Ed. Wiley, 502
9. Noxon, J. F. 1978. *Stratospheric NO<sub>2</sub> in the antartic winter*, Geophys. Res. Lett., 5, 1021-1022.
10. Noxon, J. F. 1979. *Stratospheric NO<sub>2</sub>, Global behavior*, Geophys. Res. Lett., 84, 5067-15076.

11. M. Hausmann, U. Platt. 1994. *Spectroscopic measurement of bromine oxide and ozone in the high arctic during polar sunrise experiment 1992*. J. Geophys. Res. 99, 25.399-25.413
12. Conley, R.T. 1979. *Espectroscopia infrarroja*, Ed. Alhambra, Madrid.
13. Rodríguez, A. 1998. *Sistemas lidar coherentes e incoherentes de baja potencia para la detección de velocidad de blancos sólidos*, Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya, Diciembre.
14. Markus W. Sigrist. 1994. *Air Monitoring by Spectroscopic Techniques*, 531 páginas.
15. Carolyn R. Mercer. 2003. *Optical Metrology for Fluids, Combustion and Solids*, 460 páginas.
16. Seoáñez Calvo Mariano, Irene Angulo Aguado. 1997. *Ingeniería medioambiental aplicada: Resolución de 120 casos prácticos*, 528 páginas.
17. Jens Besenberg, David J. Brassington, David Brassington, Paul C. Simon. 1997. *Instrument Development for Atmospheric Research and Monitoring: Lidar, EUROTRAC*. 394 páginas.
18. Conley, R.T. 1979. *Espectroscopia infrarroja*, Ed. Alhambra, Madrid.
19. Creswell, C.J., Runquist, O.A. y Campbell, M.M. 1979. *Análisis espectral de compuestos orgánicos*, Ed. Diana, México.
20. Skoog, D.A. y West, D.M. 1989. *Análisis Instrumental*, Ed. Mc Graw Hill, México.

## *Rectoría*

Ing. Roberto Domínguez Castellanos  
RECTOR

Mtro. José Francisco Nígenda Pérez  
SECRETARIO GENERAL

C.P. Miriam Matilde Solís Domínguez  
AUDITORA GENERAL

Lic. Adrián Velázquez Megchún  
ABOGADO GENERAL

Mtro. Pascual Ramos García  
DIRECTOR DE PLANEACIÓN

Dr. Amín Andrés Miceli Ruiz  
DIRECTOR ACADÉMICO

Mtro. Jaime Antonio Guillén Albores  
DIRECTOR DE EXTENSIÓN UNIVERSITARIA

CMF. Juan José Ortega Alejandre  
DIRECTOR DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

C.P. Julio César Vázquez Pérez  
DIRECTOR DE ADMINISTRACIÓN

L.R.P. Aurora Evangelina Serrano Roblero  
DIRECTORA DE SERVICIOS ESCOLARES

Ing. Luis Antonio Aceituno Gen  
DIRECTOR DE TECNOLOGÍAS DE INFORMACIÓN

Lic. Noé Fernando Gutiérrez González  
DIRECTOR DE SERVICIOS DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN

## *Dependencias de Educación Superior*

C.D. Jaime Raúl Zebadúa Picone  
DIRECTOR DE LA DES DE ODONTOLOGÍA

Mtra. Érika Judith López Zúñiga  
DIRECTORA DE LA DES DE NUTRICIÓN

Mtro. Martín de Jesús Ovalle Sosa  
DIRECTOR DE LA DES DE PSICOLOGÍA

Dra. Sandra Urania Moreno Andrade  
DIRECTORA DE LA DES DE BIOLOGÍA

Ing. Francisco Félix Domínguez Salazar  
Director de la Des de Ingenierías

Mtro. Carlos Gutiérrez Alfonso  
DIRECTOR DE LA DES DEL CESMECA

Ing. Javier Balboa Garcíaprieto  
DIRECTOR DE LA DES DE OFERTA REGIONALIZADA

Antrop. Julio Alberto Pimentel Tort  
DIRECTOR DE LA DES DE ARTES

Lic. Diego Martín Gámez Espinosa  
COORDINADOR DEL CENTRO DE LENGUAS



**Colección  
Jaguar**



UNICACH

**Estudios Ambientales  
y Riesgos Naturales  
Aportaciones al sureste de México**

Se terminó de imprimir en el mes de agosto de 2009, con un tiraje de 500 ejemplares, en los Talleres de Ediciones de la Noche, Madero núm. 687, 44100, Guadalajara, Jalisco. Teléfono: 33-3825-1301. El diseño tipográfico estuvo a cargo de Salvador López Hernández, la corrección de Karen Dianne Limón Padilla y el cuidado de la edición de la Oficina Editorial de la UNICACH, durante el rectorado del Ing. Roberto Domínguez Castellanos.



*Estudios ambientales y riesgos naturales* ofrece un espacio de entendimiento de asuntos ambientales e inspiración al desarrollo de nuestra sociedad. Está compuesto de siete capítulos sustentados en investigaciones bibliográficas que contraponen diferentes puntos de vista y presentan a la consideración de estudiantes, profesores, especialistas y estudiosos de las ciencias ambientales, temas que nos son interesantes, pero sobre todo actuales e imprescindibles, independientemente del área de conocimiento en la que estemos especializados.

En el contenido se alude a una mancuerna temática de gran actualidad: Medio Ambiente y Riesgos Naturales; se analiza el impacto social y económico de los desastres naturales, ofreciendo un panorama general entorno a la actividad sísmica, alternativas de manejo para disminuir la vulnerabilidad a las plagas forestales de los bosques, la potabilización del agua, tratados alternativos de aguas residuales, manejo de los residuos sólidos y no peligrosos, la fibra óptica y su utilidad en la lucha contra los problemas de contaminación ambiental, entre otros.

La relevancia de este texto, primera aportación de la Coordinación de Ingeniería Ambiental de la Unicach, deriva de la amplia gama de ciencias que han convergido en él con la intención de concientizar la importancia de la interdisciplinariedad en el desarrollo del medio ambiente del cual formamos parte.

