

AAU

AMERICAN ANDRAGOGY
UNIVERSITY





UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN

**“INTRODUCCION A LA INGENIERIA AMBIENTAL PARA
LA INDUSTRIA DE PROCESOS”**

DR. CLAUDIO ALFREDO ZAROR ZAROR
PROFESOR TITULAR
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA
FACULTAD DE INGENIERÍA

Concepción – Chile

PREFACIO

La semilla de este texto surgió en 1991, cuando la Asociación de Técnicos en Celulosa y Papel (ATCP-Chile) me invitó a dictar un curso básico sobre control ambiental, destinado a los profesionales de la industria celulósica. Desde entonces, los focos de atención han ido cambiando, en la medida que el país adquiere mayoría de edad en su lucha por preservar su privilegiado entorno natural y lograr un efectivo desarrollo económico-social sustentable. En ese contexto, los desafíos que enfrenta el ingeniero de hoy van más allá de los puramente tecnológicos, obligándolo a mantener un proceso de educación continua.

Esta publicación intenta apoyar tales esfuerzos y resume algunos de los principales temas relevantes para las aplicaciones de ingeniería ambiental en la industria de procesos.

Está dedicada a todos mis estudiantes, colegas y amigos, que me han impulsado a expresar en palabras escritas, horas y horas de clases, charlas, seminarios, ponencias y discusiones sobre diferentes tópicos ambientales, de interés para los ingenieros. Está dedicada a quienes desean tener un devenir profesional que se ajuste a uno de los principios éticos de nuestra carrera: la obligación moral de cuidar el entorno y preservar los recursos naturales, ya que no sólo pertenecen a quienes hoy los disfrutan, sino que también son propiedad de todas las generaciones futuras.

Agradezco a quienes me han brindado su apoyo para hacer esta modesta contribución al proceso educacional de los ingenieros. A mis estudiantes memoristas de la carrera de Ingeniería Civil Química, por sus aportes en áreas temáticas nuevas. A mis colegas de la industria y de los servicios públicos, cuyas interrogantes me han obligado a seguir estudiando e investigando. Al Dr. Oscar Parra y a sus colaboradores del Centro EULA, con quienes he compartido discusiones, seminarios, auditorías y estudios de impacto ambiental, que han enriquecido mi percepción de los problemas ambientales. A los Profesores Roberto Melo, José Paz, Astoldo Solís (QEPD) y al resto de mis colegas y amigos del Laboratorio de Productos Forestales, quienes me cobijaron bajo su alero cuando crucé el océano en mi retorno a casa. A Lisette y Ricardo por sus sugerencias, correcciones y diagramaciones, que han permitido darle legibilidad al mosaico caótico de tópicos de las versiones originales.

Finalmente, mis agradecimientos a Patty, por su amor y amistad incondicional, su permanente motivación, y su apoyo profesional, que me han permitido concluir esta tarea.

Prof. Claudio A. Zaror Z.
Concepción, Diciembre de 2000

Dedicado a mis hijos,

Claudio Rodrigo y Sebastián Andrés

ÍNDICE

	Página
CAPÍTULO 1) INTRODUCCIÓN.....	1-1
1.1) OBJETIVO.....	1-1
1.2) EL PROBLEMA.....	1-3
1.3) DESARROLLO SUSTENTABLE.....	1-6
1.4) NUEVOS CONCEPTOS EN CONTROL AMBIENTAL.....	1-9
BIBLIOGRAFÍA.....	1-10
CAPÍTULO 2) EL ENTORNO NATURAL.....	2-1
2.1) LA TIERRA.....	2-1
2.2) LA VIDA.....	2-6
2.3) LA ENERGÍA EN LOS ECOSISTEMAS.....	2-8
2.4) EQUILIBRIOS EN UN ECOSISTEMA.....	2-13
2.5) LOS CICLOS BIOGEOQUÍMICOS.....	2-17
2.5.1) Ciclo Hídrico.....	2-18
2.5.2) Ciclo del Oxígeno.....	2-19
2.5.3) Ciclo del Carbono.....	2-20
2.5.4) Ciclo del Nitrógeno.....	2-22
2.5.5) Ciclo del Fósforo.....	2-25
2.5.6) Ciclo del Azufre.....	2-26
2.6) NUEVOS CONCEPTOS SOBRE LOS PROCESOS GEOQUÍMICOS: LA HIPÓTESIS DE GAIA.....	2-27
2.7) ALGUNOS CONCEPTOS BÁSICOS DE MICROBIOLOGÍA.....	2-32
2.7.1) Tipos de Microorganismos.....	2-32
2.7.2) La Química de la Vida.....	2-41
BIBLIOGRAFÍA.....	2-52
CAPÍTULO 3) LOS CONTAMINANTES Y EL AMBIENTE.....	3-1
3.1) CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA.....	3-2
3.1.1) Contaminantes Atmosféricos.....	3-2
3.1.2) Cambios Atmosféricos Globales.....	3-13
3.1.3) Transporte y Destino de los Contaminantes Atmosféricos.....	3-19
3.1.4) Modelos de dispersión atmosférica.....	3-20
3.2) CONTAMINACIÓN DEL AGUA.....	3-31
3.2.1) Contaminantes Líquidos.....	3-32
3.2.2) Capacidad de Autodepuración del Medio Hídrico.....	3-36
3.2.3) Modelos de Calidad de Agua.....	3-42
3.3) CONTAMINACIÓN DEL SUELO.....	3-47
3.3.1) Principales Características del Suelo.....	3-47
3.3.2) Contaminación de Suelos.....	3-52

3.3.3) Transporte de los Contaminantes en el suelo.....	3-53
3.4) TOXICIDAD.....	3-55
3.4.1) Absorción y Distribución en el cuerpo.....	3-57
3.4.2) Clasificación de las Respuestas Tóxicas.....	3-59
3.4.3) Modelos Dosis-Respuesta.....	3-62
BIBLIOGRAFÍA.....	3-67
CAPÍTULO 4) ACTIVIDADES GENERADORAS DE RESIDUOS.....	4-1
4.1) UN POCO DE HISTORIA.....	4-1
4.2) REQUERIMIENTOS MATERIALES Y ENERGÉTICOS.....	4-7
4.2.1) Materias Primas Básicas.....	4-7
4.2.2) Requerimientos Energéticos.....	4-8
4.3) FUENTES Y TIPOS DE RESIDUOS.....	4-11
4.3.1) Residuos Sólidos.....	4-11
4.3.2) Residuos Líquidos.....	4-13
4.3.3) Residuos Gaseosos.....	4-15
4.4) TIPOS DE PROCESOS Y TECNOLOGÍAS.....	4-16
4.4.1) Operaciones Unitarias Típicas de la Industria de Procesos....	4-16
4.5) ACTIVIDADES INDUSTRIALES.....	4-19
4.5.1) Industria de Alimentos.....	4-19
4.5.2) Industria de Productos Forestales.....	4-32
4.5.3) Refinación de Petróleo.....	4-36
4.5.4) La Industria del Cobre.....	4-39
BIBLIOGRAFÍA.....	4-43
CAPÍTULO 5) TRATAMIENTO DE RESIDUOS.....	5-1
5.1) MECANISMOS PRESENTES EN LOS TRATAMIENTOS DE RESIDUOS.....	5-1
5.2) TRATAMIENTO DE RESIDUOS LÍQUIDOS.....	5-7
5.2.1) Tratamiento Primario.....	5-14
5.2.2) Tratamiento Secundario.....	5-39
5.2.3) Tratamiento Terciario.....	5-39
5.3) SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS SÓLIDOS.....	5-41
5.3.1) Confinamiento de Residuos Sólidos Industriales.....	5-41
5.3.2) Tratamiento de Residuos Biodegradables.....	5-42
5.3.3) Tratamiento Térmico de Residuos Sólidos.....	5-43
5.3.4) Tratamiento Físico-Químico de Residuos Peligrosos.....	5-46
5.3.5) Estabilización y Solidificación de Residuos Peligrosos.....	5-47
5.4) SISTEMAS DE TRATAMIENTO DE RESIDUOS GASEOSOS.....	5-48
5.4.1) Sistemas para Remoción de Material Particulado.....	5-49
5.4.2) Sistemas para la Remoción de Compuestos Gaseosos.....	5-55
5.4.3) Descarga de los Gases Residuales a la Atmósfera.....	5-59
BIBLIOGRAFÍA.....	5-60
CAPÍTULO 6) PRINCIPIOS DE DISEÑO DE PROCESOS LIMPIOS.....	6-1

6.1) EL CONCEPTO DE PROCESOS LIMPIOS.....	6-1
6.2) DISEÑO DE PROCESOS LIMPIOS.....	6-4
6.3) LA EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL COMO HERRAMIENTA DE DISEÑO.....	6-5
6.3.1) Producción Limpia en Procesos Existentes.....	6-7
6.4) ESTRATEGIAS PARA LA REDUCCIÓN DE LAS EMISIONES DE RESIDUOS INDUSTRIALES.....	6-11
6.4.1) Reducción de Residuos.....	6-11
6.4.2) Medidas Prácticas para la Reducción de los Residuos.....	6-14
6.4.3) Segregación de Residuos.....	6-17
6.5) MEDIDAS DE CONSERVACIÓN DE AGUA.....	6-23
6.6) CONSIDERACIONES ECONÓMICAS.....	6-32
BIBLIOGRAFÍA.....	6-35
CAPÍTULO 7) EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL.....	7-1
7.1) LA EIA Y EL DISEÑO DE PROCESOS LIMPIOS.....	7-2
7.2) METODOLOGÍAS PARA LA EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL.....	7-6
7.2.1) Identificación de los Aspectos Ambientales del Proyecto.....	7-6
7.2.2) Factores Ambientales.....	7-8
7.2.3) Identificación de los Factores Ambientales Afectados.....	7-13
7.2.4) Valoración de los Impactos Ambientales.....	7-14
7.2.5) Medidas de Mitigación.....	7-23
7.3) EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL COMO REQUISITO LEGAL.....	7-24
7.3.1) Proyectos o Actividades que deben someterse al SEIA.....	7-24
7.3.2) Causales para la Elaboración de un EIA.....	7-28
7.3.3) Contenidos de los Estudios de Impacto Ambiental.....	7-32
7.3.4) Otras Consideraciones Legales.....	7-36
BIBLIOGRAFÍA.....	7-38
CAPÍTULO 8) SISTEMAS DE GESTIÓN AMBIENTAL.....	8-1
8.1) INTRODUCCIÓN.....	8-1
8.2) DESARROLLO E IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMAS DE GESTIÓN AMBIENTAL.....	8-10
8.2.1) Definiciones.....	8-10
8.2.2) Principios y Elementos del Sistema de Gestión Ambiental...	8-11
8.2.3) Compromiso y Política.....	8-13
8.2.4) Planificación.....	8-16
8.2.5) Implementación.....	8-23
8.2.6) Medición y Evaluación.....	8-31
8.2.7) Revisión y Mejoramiento.....	8-33
8.2.8) Mejoramiento Continuo.....	8-34
8.3) EVALUACION DEL DESEMPEÑO AMBIENTAL	8-35
8.3.1) Planificación	8-35
8.3.2) Implementación.....	8-35

8.3.3) Revisión y Mejoramiento.....	8-37
8.3.4) Indicadores de Desempeño Ambiental.....	8-37
8.4) SISTEMA DE GESTIÓN DE SEGURIDAD Y SALUD OCUPACIONAL.....	8-44
BIBLIOGRAFÍA.....	8-47
CAPÍTULO 9) INTRODUCCIÓN A LA AUDITORÍA AMBIENTAL.....	9-1
9.1) INTRODUCCIÓN.....	9-1
9.2) TIPOS DE AUDITORÍAS AMBIENTALES.....	9-1
9.3) CONTENIDOS DE UNA AUDITORÍA AMBIENTAL.....	9-4
9.4) METODOLOGÍA DE AUDITORÍA AMBIENTAL.....	9-6
9.4.1) Actividades Previas: Planificación de la Auditoría.....	9-7
9.4.2) Actividades en Terreno.....	9-10
9.4.3) Actividades Finales: Informe Final y Plan de Seguimiento	9-12
9.5) AUDITORIA DE RESIDUOS.....	9-13
9.6) UN EJEMPLO DE AUDITORIA.....	9-16
9.7) LISTAS DE VERIFICACION PARA AUDITORIAS PRELIMINARES...	9-22
BIBLIOGRAFÍA.....	9-29
CAPITULO 10) ANALISIS DEL CICLO DE VIDA.....	10-1
10.1) INTRODUCCION.....	10-1
10.2) METODOLOGIA DEL ANALISIS DEL CICLO DE VIDA.....	10-7
10.3) DEFINICION DE OBJETIVOS Y ALCANCES.....	10-7
10.4) ANALISIS DE INVENTARIO.....	10-8
10.5) EVALUACION DE IMPACTO AMBIENTAL DEL CICLO DE VIDA....	10-12
10.5.1) Clasificación.....	10-13
10.5.2) Caracterización.....	10-14
10.6) VALORACION.....	10-20
10.7) UN EJEMPLO: ANALISIS DE INVENTARIO DE LA PRODUCCION DE CELULOSA KRAFT BLANCA.....	10-20
BIBLIOGRAFIA.....	10-27
CAPITULO 11) PRINCIPIOS DE ANÁLISIS DE RIESGOS PARA LA INDUSTRIA DE PROCESOS.....	11-1
11.1) INTRODUCCIÓN.....	11-1
11.2) ANÁLISIS DE RIESGOS COMO HERRAMIENTA DE DISEÑO Y GESTIÓN.....	11-5
11.3) TÉCNICAS DE IDENTIFICACIÓN DE PELIGROS.....	11-11
11.3.1) Métodos Comparativos para la Identificación de Peligros.	11-16
11.3.2) Análisis de Peligro y Operatividad (Hazop).....	11-17
11.3.3) Análisis ¿Qué Sucedería Sí?.....	11-23
11.3.4) Análisis de Modalidades de Fallas y sus Efectos.....	11-24
11.3.5) Análisis Arbol de Fallas.....	11-27
11.3.6) Análisis del Arbol de Sucesos.....	11-31
11.3.7) Índices de Riesgo: Índice Dow de Fuego y Explosión.....	11-34
11.4) ANÁLISIS DE CONSECUENCIAS.....	11-37

11.4.1) Análisis Preliminar de Consecuencias.....	11-37
11.4.2) Análisis de Consecuencias: Casos Específicos.....	11-40
11.4.3) Vulnerabilidad de Personas e Instalaciones.....	11-47
11.5) PROBABILIDAD DE OCURRENCIA.....	11-53
11.5.1) Utilización del Análisis de Arbol de Fallas.....	11-56
11.5.2) Errores Humanos.....	11-57
11.6) LISTAS DE COMPROBACION PARA IDENTIFICACION DE PELIGROS.....	11-60
11.7) EJEMPLO DE CATEGORIZACION DE RIESGOS Y MEDIDAS DE PREVENCION EN UNA PLANTA DE CELULOS KRAFT.....	11-66
GLOSARIO.....	11-76
BIBLIOGRAFÍA.....	11-77
 PALABRAS FINALES	

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1) OBJETIVO

La actividad productiva es uno de los pilares fundamentales del desarrollo económico. Sin embargo, los residuos generados y el excesivo consumo de recursos naturales, pueden constituirse en agentes de deterioro del medio ambiente, restando sustentabilidad al crecimiento económico. Como consecuencia de ello, la dimensión ambiental ha adquirido mayor importancia en el diseño de procesos, en la toma de decisiones de inversión y en la gestión productiva.

En Chile, la industria se desenvuelve en un marco legal ambiental que se acerca cada vez más al de los países de mayor desarrollo económico. La Ley 19.300 (Ley de Bases del Medio Ambiente) establece el requerimiento de evaluación de impacto ambiental a todos aquellos proyectos que pueden tener efectos negativos sobre el medio ambiente, la salud y la seguridad de las personas. Ello se suma a la especificación de estándares de calidad ambiental y normas de emisión para los residuos. Más aún, la globalización de los mercados y la fuerte competencia internacional, obligan a nuestro sector exportador a lograr niveles de desempeño ambiental compatibles con los requerimientos de las naciones líderes. Como consecuencia de ello, conceptos tales como: sistemas de gestión ambiental, auditorías ambientales, evaluación de desempeño ambiental, análisis de ciclo de vida y etiquetado ecológico, entre otros, adquieren cada vez mayor relevancia.

Las nuevas estrategias para reducir el impacto ambiental derivado de la actividad industrial, **se basan en un enfoque integral preventivo**, que privilegia una mayor eficiencia de utilización de los recursos materiales y energéticos, incrementando simultáneamente la productividad y la competitividad. Ello involucra la introducción de medidas tecnológicas y de gestión que permiten reducir los consumos de materiales y energía, prevenir la generación de residuos en su fuente misma, y reducir los riesgos operacionales y otros posibles aspectos ambientales adversos, a través de todo el ciclo de producción.

Esto representa un gran desafío para aquellos ingenieros y otros profesionales que están involucrados en el diseño y operación de procesos productivos, cuya responsabilidad es compatibilizar las exigencias ambientales y los requerimientos de calidad, seguridad, productividad y rentabilidad. Las herramientas conceptuales para cumplir esos objetivos trascienden los límites de la formación convencional de los ingenieros, y su introducción en los programas de estudio se encuentra en plena evolución. Dicha tarea es ardua debido a la naturaleza multidisciplinaria del problema, la que se visualiza claramente en la definición del

concepto de *medio ambiente*¹:

Medio ambiente: *Es el sistema global constituido por elementos naturales y artificiales de naturaleza física, química o biológica, socioculturales y sus interacciones, en permanente modificación por la acción humana o natural, que rige y condiciona la existencia y desarrollo de la vida en sus múltiples manifestaciones.*

Esta publicación intenta hacer un aporte en aquellos aspectos de ingeniería ambiental, relevantes a la función profesional del ingeniero de proceso.

Aquí usamos el término "**ingeniería ambiental**" para definir: *el área de la ingeniería encargada de controlar y reducir el impacto ambiental de la actividad humana, a través del diseño y la aplicación de medidas tecnológicas y de gestión.* En rigor, esta definición es aplicable a todas las especialidades de la ingeniería, ya que las consideraciones ambientales constituyen una parte integral de dicha profesión.

El autor reconoce la imposibilidad de cubrir en un solo texto la amplia extensión de tópicos relevantes y enfatiza el carácter introductorio de éste. Los diferentes temas se presentan agrupados en las tres áreas siguientes:

- **Conceptos básicos de ciencias ambientales:** Estos se abordan en los capítulos 2, 3 y 4, donde se presenta un amplio rango de conceptos fundamentales, necesarios para comprender la relación entre el hombre y su entorno natural, y los problemas ambientales que enfrentamos.
- **Aspectos tecnológicos en ingeniería ambiental:** El capítulo 5 describe los diferentes sistemas de tratamiento de residuos líquidos, gaseosos y sólidos. Ello se complementa con el capítulo 6, que introduce los principios sobre los que se basa el diseño de procesos limpios y el control ambiental preventivo.
- **Aspectos de gestión en ingeniería ambiental:** Esto constituye un componente clave del control ambiental moderno. El capítulo 7 revisa las herramientas básicas para evaluar el impacto ambiental de un proyecto, en el contexto del diseño de procesos limpios. Los capítulos 8, 9 y 10 describen diferentes tópicos sobre la implementación de sistemas de gestión ambiental, auditorías ambientales y análisis de ciclo de vida, respectivamente. Finalmente, el capítulo 11 introduce las principales metodologías utilizadas en el análisis de riesgos operacionales.

Se espera que el lector obtenga una visión general de estos temas, recibiendo adecuada orientación para su profundización en referencias especializadas.

¹ Definición según la Ley 19300, "Ley de Bases del Medio Ambiente", publicada en el Diario Oficial el 9 de Marzo de 1994, Chile.

1.2) EL PROBLEMA

Es importante comenzar un texto de esta naturaleza planteando la pregunta:

¿Cual es el problema ambiental que genera la actividad humana?

El Hombre ha modificado drásticamente su entorno, desde la aparición misma de la sociedad humana. Por muchos milenios, nuestros antepasados lucharon constantemente por sobrevivir y crecer. Una lucha que, en términos generales, fue exitosa, ya que el *Homo sapiens* logró constituirse en la especie dominante en el planeta. Como resultado de este proceso, el entorno natural ha sufrido grandes alteraciones, donde millones de hectáreas de bosques fueron reemplazados por terrenos agrícolas, por ciudades, y también por desiertos.

Los seres humanos tenemos una larga lista de necesidades fundamentales que deben ser cubiertas para mantener nuestra factibilidad de existencia. En lo básico, necesitamos alimentarnos, protegernos del frío, de la lluvia, de las enfermedades y de las fieras; necesitamos, además, energía para preparar nuestros alimentos, y para iluminarnos en la oscuridad de la noche. Como entes sociales, necesitamos comunicarnos, relacionarnos, almacenar nuestras memorias y aprendizajes, satisfacer nuestras necesidades culturales, transportarnos, etc, etc etc.

Necesitamos

.....la lista (y su complejidad) crece y crece, en la medida que pensamos en el hombre moderno, en un mundo habitado por más de 6 mil millones de seres humanos, con ciudades de 20 millones de personas. Una parte importante de la actividad humana se destina a satisfacer estas necesidades, marcando el sello de nuestra Historia y de nuestro desarrollo como especie. También ha significado una drástica transformación de nuestro entorno.

Recientemente, el paso del progreso se ha acelerado, con un crecimiento exponencial de la población y del ritmo de explotación de los recursos naturales, adquiriendo ribetes dramáticos en los últimos 100 años. El crecimiento de la población humana conlleva a un incremento en la demanda de energía, alimentos y otros bienes de consumo. Durante el siglo XX, la población mundial se multiplicó por cuatro, superando los 5 mil millones de habitantes, mientras que el volumen de producción global a comienzos del nuevo milenio es 20 veces mayor que en 1900. En la actualidad, el consumo de combustibles fósiles es 30 veces superior al de ese entonces, aumentando aceleradamente en las últimas décadas. A ello hay que agregar que el consumo de agua ha crecido proporcionalmente al aumento de la población y de la producción agrícola e industrial, lo que ha impuesto una fuerte presión sobre los frágiles recursos hídricos del planeta.

Para comprender la dimensión del proceso productivo y su complejidad, bastaría con mirar a nuestro alrededor y evaluar lo que hay detrás de cada objeto que consideramos imprescindible para nuestro desenvolvimiento diario. ¿De qué

están hechos? ¿Cuáles fueron las fuentes originales de materias primas? ¿De qué lugar del mundo provienen? ¿Cuáles fueron los procesos que permitieron su fabricación? ¿Cuánta energía se requirió y de donde se obtuvo? ¿Cuántas manos y especialidades? ¿Cuántas decisiones de inversión? ¿Cuánta coordinación entre los diferentes agentes que tomaron parte en el proceso productivo? ¿Cuántos residuos se generaron a lo largo de ese proceso? ¿Cuántos accidentes?.

La actividad productiva implica la utilización de recursos materiales y energéticos, con el objetivo de generar bienes y servicios que satisfagan alguna necesidad humana actual o potencial. Tal como se ilustra en la Figura 1.1, los recursos naturales (materiales y energéticos) y humanos, son utilizados en una larga cadena de transformaciones. Su consumo desmedido o irracional puede afectar la calidad de vida y el estado de conservación del medio natural, cuestionando seriamente la sustentabilidad de la actividad productiva. Los recursos renovables y no renovables esenciales para la existencia del hombre en la Tierra están amenazados por nuestro propio desarrollo como especie.

A nivel mundial, hoy enfrentamos serios problemas de abastecimiento de agua y carencia de suelo agrícola en muchas regiones, destrucción masiva de bosques, erosión y desertificación, reducción de la disponibilidad de petróleo y de algunos minerales básicos, y explotación irracional de los recursos marinos y forestales. Esto se ve agravado por los cambios climáticos globales que afectan drásticamente el ciclo hidrológico. Al respecto, parece haber suficiente evidencia que demuestra la contribución de la acción humana en tales procesos naturales.

Además, en todo el ciclo de producción, incluyendo la manufactura, el transporte y el consumo del producto final, se generan residuos (materiales y energéticos) que al ser emitidos a los medios receptores (aguas, aire, suelo), entran en una compleja cadena de transformaciones físicas, químicas y biológicas naturales. Los residuos regresan, directa o indirectamente al entorno natural y pueden, en el peor de los casos, provocar serios desequilibrios en el ecosistema y/o afectar negativamente la salud y seguridad de las personas. En este sentido, la contaminación es una de las consecuencias más evidentes de la actividad humana, tanto industrial como doméstica. En un sentido amplio, se puede definir como ² :

Contaminación: *La presencia en el ambiente de sustancias, elementos, energía o combinación de ellos, cuya presencia en el ambiente, en ciertos niveles, concentraciones o períodos de tiempo, pueda constituir un riesgo a la salud de las personas, a la calidad de vida de la población, a la preservación de la naturaleza o a la conservación del patrimonio ambiental.*

Gran parte de los esfuerzos actuales de control ambiental están destinados a combatir la contaminación provocada por la acción humana. La reducción de emisiones de residuos sólidos, líquidos y gaseosos, de origen industrial, urbano-doméstico y agrícola, constituyen un objetivo primario en tal sentido y representa

² Adaptada de la Ley 19.300, artículo 2º.

uno de los pilares de la normativa ambiental. A ello se suma la urgencia por proteger los escasos recursos hídricos, los recursos marinos y forestales, los suelos con potencial de uso agrícola, y la biodiversidad.

Es importante destacar que los accidentes ocurridos durante el procesamiento, almacenamiento y/o transporte de materiales peligrosos, han sido responsables de serios daños a las personas, a la infraestructura y al medio natural, ya que esos eventos pueden liberar en forma no controlada, energía y sustancias tóxicas, patogénicas, corrosivas, radiactivas, combustibles y/o explosivas.

Los impactos ambientales adversos, a escala mundial y local, pueden constituirse en un factor limitante al desarrollo futuro. En algunos casos, los efectos son evidentes e incuestionables; por ejemplo, la contaminación atmosférica debido al uso de combustibles fósiles, la contaminación de importantes cuerpos de agua debido a vertidos industriales y domésticos, la disposición de residuos sólidos en las grandes ciudades, los accidentes de las plantas nucleares, la depredación de recursos forestales en los bosques tropicales, el avance de la desertificación, el volcamiento de barcos petroleros en el océano, las emanaciones de gases venenosos debido a accidentes en la industria química, las explosiones ocurridas durante el transporte de combustibles, etc.

Existen otros efectos ambientales, sin embargo, que se manifiestan acumulativamente y con mayor lentitud, por lo que son más difíciles de cuantificar y controlar. La destrucción de la capa de ozono y el calentamiento global de la atmósfera son fenómenos recientes que caen dentro de esa categoría y que han alarmado a la comunidad científica y política.

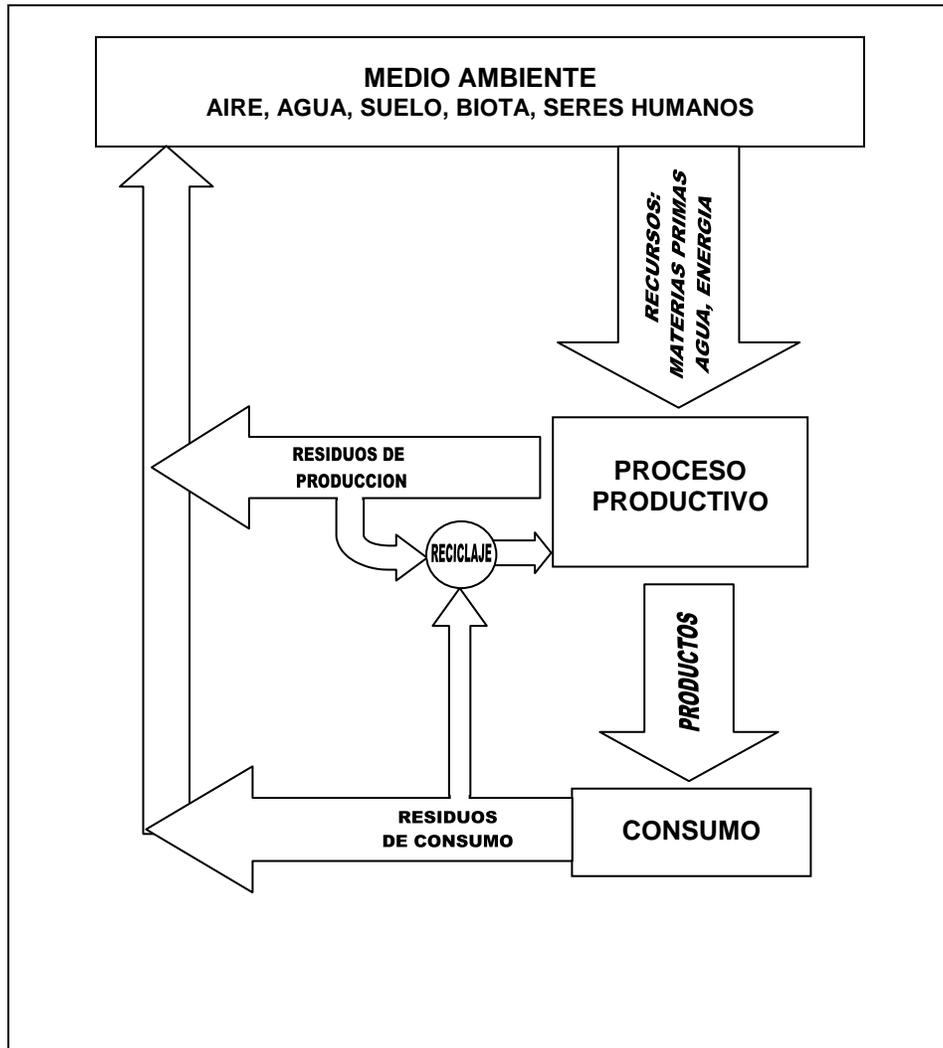


FIGURA 1.1: CICLO PRODUCTIVO

1.3) DESARROLLO SUSTENTABLE

Desarrollo Sustentable³: *El proceso de mejoramiento sostenido y equitativo de la calidad de vida de las personas, fundado en medidas apropiadas de conservación y protección del medio ambiente, de manera de no comprometer las expectativas de las generaciones futuras.*

Desde hace varias décadas ha existido una creciente preocupación por el impacto de la actividad humana sobre el medio ambiente, en su calidad de receptor de los residuos de las actividades humanas y de proveedor de los recursos materiales y energéticos requeridos. En Junio de 1992, se celebró en Rio de Janeiro (Brasil) la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y Desarrollo, con el fin de acordar los principios básicos de conducta para lograr un adecuado complemento entre el desarrollo socioeconómico y la sustentabilidad ambiental, garantizando la viabilidad e integridad de la Tierra como hogar del hombre y de todos los seres vivos. Entre los acuerdos, destaca un vasto programa de acción destinado a minimizar el daño ambiental y garantizar la sustentabilidad de los procesos de desarrollo. Dicho programa, conocido como la Agenda 21, consta de 40 capítulos que se ilustran en la Tabla 1.1.

Estos principios, que incluyen objetivos y acciones específicas, han constituido la base para el desarrollo de la institucionalidad ambiental en muchos países. Tal es el caso de la Política Ambiental chilena, oficializada a fines del siglo XX, donde se formaliza *el compromiso de promover la sustentabilidad ambiental del proceso de desarrollo económico, poniendo énfasis en el mejoramiento de la calidad de vida de la población, en la equidad social y en la protección del patrimonio ambiental.*

³ Definición según la Ley 19.300, artículo 2º.

TABLA 1.1 : CONTENIDO DE LA AGENDA 21

<p>I) Dimensiones sociales y económicas</p> <ol style="list-style-type: none">1. Preámbulo2. Cooperación internacional para acelerar el desarrollo sustentable3. Lucha contra la pobreza4. Evolución de las modalidades de consumo5. Dinámica demográfica y sustentabilidad6. Protección y fomento de la salud humana7. Fomento del desarrollo sustentable de los recursos humanos8. Integración del medio ambiente y el desarrollo en la toma de decisiones <p>II) Conservación y gestión de recursos para el desarrollo</p> <ol style="list-style-type: none">9. Protección de la atmósfera10. Enfoque integrado de la ordenación de los recursos de la tierra11. Lucha contra la deforestación12. Lucha contra la desertificación y la sequía13. Protección de zonas de montaña14. Fomento de la agricultura y del desarrollo rural15. Conservación de la diversidad biológica16. Gestión ecológica de la biotecnología17. Protección de los recursos marinos18. Protección de la calidad de vida y el suministro de los recursos de agua dulce19. Gestión ecológicamente racional de los productos químicos tóxicos20. Gestión ecológicamente racional de los desechos peligrosos21. Gestión ecológicamente racional de los desechos sólidos y aguas servidas22. Gestión segura y ecológicamente racional de los desechos radiactivos <p>III) Fortalecimiento del papel de las partes interesadas</p> <ol style="list-style-type: none">23. Preámbulo24. Medidas mundiales en favor de la mujer para lograr un desarrollo sustentable25. Los niños y jóvenes en el desarrollo sustentable26. Reconocimiento y fortalecimiento del papel de las poblaciones indígenas27. Fortalecimiento del papel de las organizaciones no gubernamentales (ONG)28. Incentivos de las autoridades locales en apoyo de la Agenda 2129. Fortalecimiento del papel de los trabajadores y sus sindicatos30. Fortalecimiento del papel de la industria y comercio31. La comunidad científica y tecnológica32. Fortalecimiento del papel de los agricultores <p>IV) Medios de ejecución</p> <ol style="list-style-type: none">33. Financiamiento34. Transferencia tecnológica35. Ciencias36. Educación37. Cooperación internacional38. Acuerdos internacionales institucionales39. Instrumentos jurídicos internacionales40. Información
--

1.4) LOS NUEVOS CONCEPTOS EN CONTROL AMBIENTAL Y EL DESAFIO PARA LOS INGENIEROS DEL SIGLO XXI

Tradicionalmente, el control ambiental en la industria de procesos, se ha focalizado en el tratamiento de los residuos directos de producción, para cumplir con las normas que regulan su disposición final. Tales residuos industriales han sido considerados como productos (indeseados) de la actividad productiva, los cuales son tratados usando técnicas convencionales para reducir su carga contaminante. Dicho enfoque ha cambiado aceleradamente debido a las crecientes presiones legales y económicas a que la industria de procesos ha estado sometida en los últimos años. Las nuevas estrategias de control ambiental en la industria moderna se basan en una combinación de medidas tendientes, principalmente, a:

- Reducir el consumo de recursos naturales materiales y energéticos.
- Prevenir la generación de residuos.
- Reducir los riesgos operacionales.

La reducción del consumo de materias primas, de energía, de agua y otros recursos, sumada a la recuperación de los residuos, deberían conducir a un importante aumento de la productividad. En muchos casos, ello permite justificar las inversiones adicionales requeridas para modificar los procesos con vistas a un manejo efectivo de los recursos.

En forma creciente, los esfuerzos de prevención y/o minimización de impactos ambientales se realizan tomando en consideración aspectos tecnológicos y de gestión. Ellos son incorporados en todas las fases del ejercicio de diseño, desarrollo del proyecto e implementación industrial, en las diferentes actividades que tienen lugar a través del ciclo de vida de los productos o procesos bajo estudio, desde la extracción de los recursos básicos hasta la disposición final de los residuos finales.

Dentro de este contexto, quienes estamos involucrados profesionalmente en la actividad productiva, debemos contar con las herramientas conceptuales para contribuir a minimizar el impacto ambiental de los procesos productivos. Dicha tarea no es fácil, ya que involucra conceptos de diversas disciplinas, requiriendo de un esfuerzo colectivo de profesionales, provenientes de distintas áreas del saber, quienes deben estar en condiciones de comunicarse coherentemente entre sí, con un vocabulario científico y técnico común.

En los próximos capítulos de este texto, se abordan a nivel introductorio, las principales áreas temáticas asociadas a la ingeniería ambiental, en el contexto de la industria de procesos. El autor espera contribuir así, al esfuerzo formativo de los nuevos ingenieros y de aquellos que abandonaron las aulas universitarias hace algún tiempo, pero que no han abandonado su inquietud por el saber.

BIBLIOGRAFÍA RECOMENDADA

Existen centenares de textos que cubren en detalle los diferentes tópicos revisados en este libro. Al final de cada capítulo se incluye una lista muy reducida de textos recomendados, de acuerdo a su disponibilidad en las principales bibliotecas universitarias y librerías chilenas. Aquellos lectores que deseen profundizar los temas cubiertos en cada capítulo pueden consultar dichas referencias.

Entre las referencias de cobertura general, se recomienda los siguientes textos:

TEXTOS GENERALES

- Davis M., Cornwell D., "Introduction to Environmental Engineering". 2ªed. McGraw Hill International Editions, Singapore (1991)
- Henry J.G., Heinke G.W., "Ingeniería Ambiental". 2ª ed. Prentice Hall. México (1996)
- Itsemap Ambiental, "Manual de Contaminación Ambiental". Fundación MAPFRE, Madrid (1994)
- Kelly G., "Environmental Engineering". McGraw Hill International Editions., Singapore (1998)
- Masters G.M., "Introduction to Environmental Engineering and Science", 2ª ed. Prentice-Hall International (UK) Limited, London (1998)
- Ortega R., Rodríguez I., "Manual de Gestión del Medio Ambiente", Fundación MAPFRE, Madrid (1994)
- Seoanez M. "Ecología Industrial". Ed. Mundi-Prensa. Madrid (1995)

Además, se recomienda consultar la páginas *web* de instituciones ambientales u otras, que han puesto a libre disposición del público general valiosos datos sobre diferentes tópicos ambientales, casos de estudio, etc. Al respecto, existe una gran actividad y cada día aparecen nuevos sitios.

Se recomienda consultar los sitios de las agencias ambientales nacionales e internacionales, y centros de investigación ambiental donde existe innumerable información acerca de aspectos legales, problemas ambientales, metodologías de evaluación de impacto ambiental, iniciativas de producción limpia, información ambiental, etc. Muchas de estas direcciones poseen funciones de búsqueda en base a palabras clave, lo que facilita su utilización. En general, en los sitios internacionales las palabras clave deben ser utilizadas en inglés (ej.: environment, cleaner production, waste treatment, pollution prevention, environmental management, environmental auditing, environmental performance, environmental impact assessment, risk assessment, life cycle analysis, environmental sciences, etc.).

A continuación, se entregan algunas direcciones web de instituciones nacionales e internacionales que abordan diferentes aspectos de la problemática ambiental. Muchas de ellas permiten acceso a nuevos sitios más específicos.

Instituciones Chilenas:

CONAMA-CHILE:	www.conama.cl
CENTRO EULA – U. de CONCEPCION	www.eula.cl
CIPMA	www.cipma.cl
IMA-USACH	www.lauca.usach.cl/ima
INTEC	www.intec.cl
CONAF	www.conaf.cl
INE	www.ine.cl
SINIA-CHILE	www.sinia.cl
CIREN	www.ciren.cl
INFOR	www.infor.cl
CONADI	www.conadi.cl
SERNAPESCA	www.sernapesca.cl
CIMM	www.cimm.cl
SERNAGEOMIN	www.sernageomin.cl
MOP	www.mop.cl/utma/
MOP-DGA	www.mop.cl/direcciones/dga/

Instituciones Extranjeras

EPA-EEUU:	www.epa.gov
P.N.U.M.A.	www.unep.org
O.M.S.	www.who.org
AGENCIA EUROPEA MEDIOAMBIENTAL	www.eea.dk
AGENCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA	www.iea.org
DEP. ENERGÍA-EEUU	www.em.doe.gov
BID	www.jadb.org
FAO	www.fao.org
DEP. ENVIRONMENT-AUSTRALIA	www.environment.sa.gov.au
ASTM	www.astm.org
CEPIS	www.cepis.ops-oms.org
WORLD RESOURCES INSTITUTE (WRI)	www.wri.org
SOLID WASTE SYSTEM	www.solidwaste.org
INDUSTRIAL ECOLOGY	www.industrialecology.com
RECYCLER'S WORLD	www.recycle.net
WATER WORLD	www.wwinternational.com
ECOWASTE INDUSTRIES LTD.	www.ecowaste.com/index.htm
POLLUTION ON LINE	www.pollutiononline.com
UNIV. DE NAVARRA	www1.ceit.es/Asignaturas/ecologia/Enlaces/EnlAmb1.htm
ENVIRONMENT CANADA	www.ec.gc.ca
FRESH WATER ECOLOGY AND POLLUTION	www.stemnet.nf.ca
BIODIVERSIDAD BIOLÓGICA	www.biodiv.org
CONSERVATION INTERNATIONAL	www.conservation.org
THE WORLD CONSERVATION UNION	www.iucn.org
INT. INST.SUSTAINABLE DEVELOPMENT	www.iisd.ca
ISO 14000 – CANADA	www.scc.ca/iso14000
AICHE-CCPS	www.aidche.org/ccps

CAPÍTULO 2

EL ENTORNO NATURAL

Para comprender el impacto ambiental de nuestra actividad sobre el medio ambiente, requerimos un conocimiento básico de los diferentes fenómenos físicos, químicos y biológicos, que caracterizan el funcionamiento de la Tierra, además de sus interacciones. En rigor, esta área temática cae dentro del dominio de la ecología¹, integrando conceptos provenientes de la geología, la biología, la bioquímica, la química, la termodinámica y otras ciencias fundamentales, cuya revisión completa es imposible en unas pocas páginas.

En este capítulo, se presentan los principales tópicos y definiciones básicas que permitirán entregar una base introductoria. El lector encontrará varios textos generales en la sección de Referencias Recomendadas, que cubren los diferentes aspectos de las ciencias ambientales con mayor profundidad: Arms (1990), Botkin y Keller (1995), Goudie (1989, 1990), Margalef (1992), Meyer (1996), Miller (1996), Nebel y Wright (1996), Raven (1993), entre otros.

2.1) LA TIERRA

Cuando se estudia la Tierra, es importante tener presente las dimensiones temporales y espaciales que ello implica. Existe consenso dentro de la comunidad científica que Nuestro Hogar, la Tierra, ya contaba con una sólida superficie de rocas hace aproximadamente 4500 millones de años. Por su parte, los fósiles microscópicos más antiguos datan de unos 3500 millones de años, mientras que se ha descubierto fósiles macroscópicos marinos de hace 500 millones de años. Desde ese entonces, la vida se ha propagado hacia la superficie terrestre, donde han aparecido plantas, peces, reptiles, aves y mamíferos, etc. Cuando pensamos que la existencia del *Homo sapiens* sólo data de 40 mil años atrás, nos damos cuenta de nuestro insignificante peso dentro de la historia, a escala geológica. Ello es aún más impactante si se compara con la “edad” del Universo, la que de acuerdo a la teoría de la Gran Explosión (*Big Bang*), sería de 15-20 mil millones de años.

La Tierra es un planeta elipsoidal de 6730 km de radio medio, que gira alrededor del Sol en un ciclo anual. El eje de la Tierra está inclinado 23,5° respecto de su plano de rotación alrededor del Sol.

¹ Ecología es el estudio de las relaciones entre los organismos y su ambiente.

El término proviene del griego: *oikos* (casa) y *logos* (estudio), y fue propuesto por el biólogo alemán Ernst Haeckel en el siglo XIX. Fue considerada durante mucho tiempo como una subdivisión de la biología; sin embargo, su acelerado desarrollo en las últimas décadas, ha llevado a su consolidación como una disciplina integradora que relaciona procesos físicos y biológicos, y que tiende un puente natural entre las ciencias naturales y las ciencias sociales (E.P. Odum, “Fundamentos de ecología”. Nueva Editorial Interamericana, México. 1986).

Está cubierta por una delgada corteza exterior (litosfera), de 30-40 km de espesor en la zona continental y 6 km en la zona oceánica, que contribuye con menos del 1% de la masa total de la Tierra. La corteza está compuesta por placas tectónicas que se mueven a una velocidad entre 2 y 15 cm/año. Los límites entre estas placas son áreas geológicamente activas, con gran actividad volcánica y sísmica.

La superficie del planeta es irregular, con un 70% de ella cubierta por agua, con una profundidad de hasta 11 km (promedio, 4 km). La superficie restante corresponde a las masas de tierra, cuya altura máxima sobre el nivel del mar alcanza los 8,8 km. Dos tercios de esta masa están situadas sobre el Hemisferio Norte.

La composición de la corteza es muy heterogénea, con un alto contenido de SiO_2 y Al_2O_3 , aún cuando en las zonas más superficiales (capa sedimentaria) hay importantes cantidades de CaO y carbonatos. Bajo la corteza existe una zona de casi 2900 km. de espesor, llamada Manto, que representa el 69% de la masa total del planeta. El manto tiene un alto contenido metálico en estado fluido (magma), con una predominancia de óxidos de Si, Mg, Fe y Al. La zona central de la Tierra, es decir entre 2900 y 6370 km. de profundidad, se denomina el Núcleo y representa alrededor del 30% de la masa del planeta. El Núcleo tiene una temperatura estimada de 2000°C y está compuesto en un 80% por Fe y Ni; el resto por Si y S.

Cuando el magma aflora a la superficie, o cerca de ella, se enfría y cristaliza formando las rocas ígneas. La acción erosiva del viento y el agua, y las variaciones de temperatura destruyen las rocas ígneas y generan sedimentos. Estos sedimentos se acumulan en las profundidades de los océanos y lagos, transformándose en rocas sedimentarias. Cuando las rocas sedimentarias quedan sepultadas a varios kilómetros de profundidad, las altas temperaturas y presiones las transforman en rocas metamórficas. Estas últimas pueden derretirse y, eventualmente, transformándose en rocas ígneas. Los procesos vivientes afectan la composición química de las rocas aportando carbono (ej.: carbonatos, carbón, hidrocarburos).

La vida en la Tierra está confinada a una región relativamente pequeña, llamada Biósfera, que se encuentra en torno a la interfase entre la atmósfera y la superficie (tierra y océano), donde existen condiciones de presión, temperatura y composición química favorables para el desarrollo de la vida.

La Atmósfera

La Tierra está rodeada de una capa gaseosa, llamada atmósfera, cuyo espesor alcanza aproximadamente 200 km. En la atmósfera se distinguen 4 capas, con diferentes perfiles de concentración:

- la tropósfera (0-10 km desde la superficie terrestre): La temperatura desciende con la altura, llegando a alrededor de -60°C a 10 km de altura.
- la estratósfera (10-50 km): El perfil de temperatura experimenta una fuerte

inversión, aumentando hasta cerca de los 0°C. En esta capa el ozono experimenta un nivel máximo de concentración.

- la mesósfera (50-90 km): La temperatura vuelve a descender hasta llegar a valores inferiores a -100°C en su parte superior.
- la termósfera (90-200 km): Aquí la temperatura asciende hasta alcanzar niveles sobre 1.000°C.

La atmósfera contiene, en promedio, 78,1% (en volumen) de N₂, 20,9% de O₂, 0,93% de Argón, 0,033% de CO₂, excluyendo el vapor de agua presente. Este último puede constituir hasta un 7% del volumen total. El resto, menos de 0,02 % del volumen total de la atmósfera, está constituido por una mezcla de gases nobles (Ne, He, Kr, Xe), CH₄, H₂, N₂O, CO, O₃, NH₃, NO₂, NO y SO₂.

Las capas superiores de la atmósfera reciben la radiación solar ultravioleta, dando origen a complejas reacciones químicas en las que participan el O₂, el N₂ y el O₃. Dichas reacciones permiten absorber una gran fracción de la radiación ultravioleta, impidiendo su llegada a la superficie terrestre.

La temperatura global del planeta (del orden de 15°C), está determinada por un delicado balance entre la radiación solar que llega a la Tierra y la energía neta que ella irradia al espacio, tal como se ilustra en la Figura 2.1. Un factor esencial de este balance térmico es la cantidad de energía absorbida por los diferentes componentes de la atmósfera. Dichos compuestos químicos absorben radiación en rangos de longitud de onda característicos para cada uno de ellos. Por esta razón, la composición química de la atmósfera juega un papel determinante en este balance, ya que ésta absorbe parte de la radiación solar y de la energía radiada por la Tierra.

A su vez, la radiación térmica emitida por la superficie terrestre, es absorbida por aquellos gases atmosféricos que absorben ondas largas (CO₂, CH₄, N₂O, H₂O, O₃), y re-emitida hacia la superficie, produciendo un "efecto de invernadero". Estos "gases invernadero" son los que mantienen la temperatura de la Tierra a los niveles que conocemos. Si dichos gases no existieran, la temperatura global de la Tierra sería del orden de -18°C.

La atmósfera es un sistema dinámico que cambia continuamente. A escala global, las masas de aire circulan como resultado de la rotación terrestre y de la radiación solar, dando origen a padrones de vientos, y cinturones de altas y bajas presiones en diferentes latitudes.

El **clima** se refiere a las condiciones atmosféricas (principalmente, temperatura y precipitación) características o representativas en un lugar determinado. En general, se habla de clima cuando nos referimos a períodos largos (varios años), mientras que se habla de condiciones climáticas ("estado del tiempo", "condiciones meteorológicas") para describir las condiciones de la atmósfera en períodos cortos (días, o semanas).

El clima y las condiciones climáticas en diferentes partes de la Tierra depende de las propiedades físicas y la composición química de la atmósfera, y del flujo de energía solar que llega a la superficie terrestre.

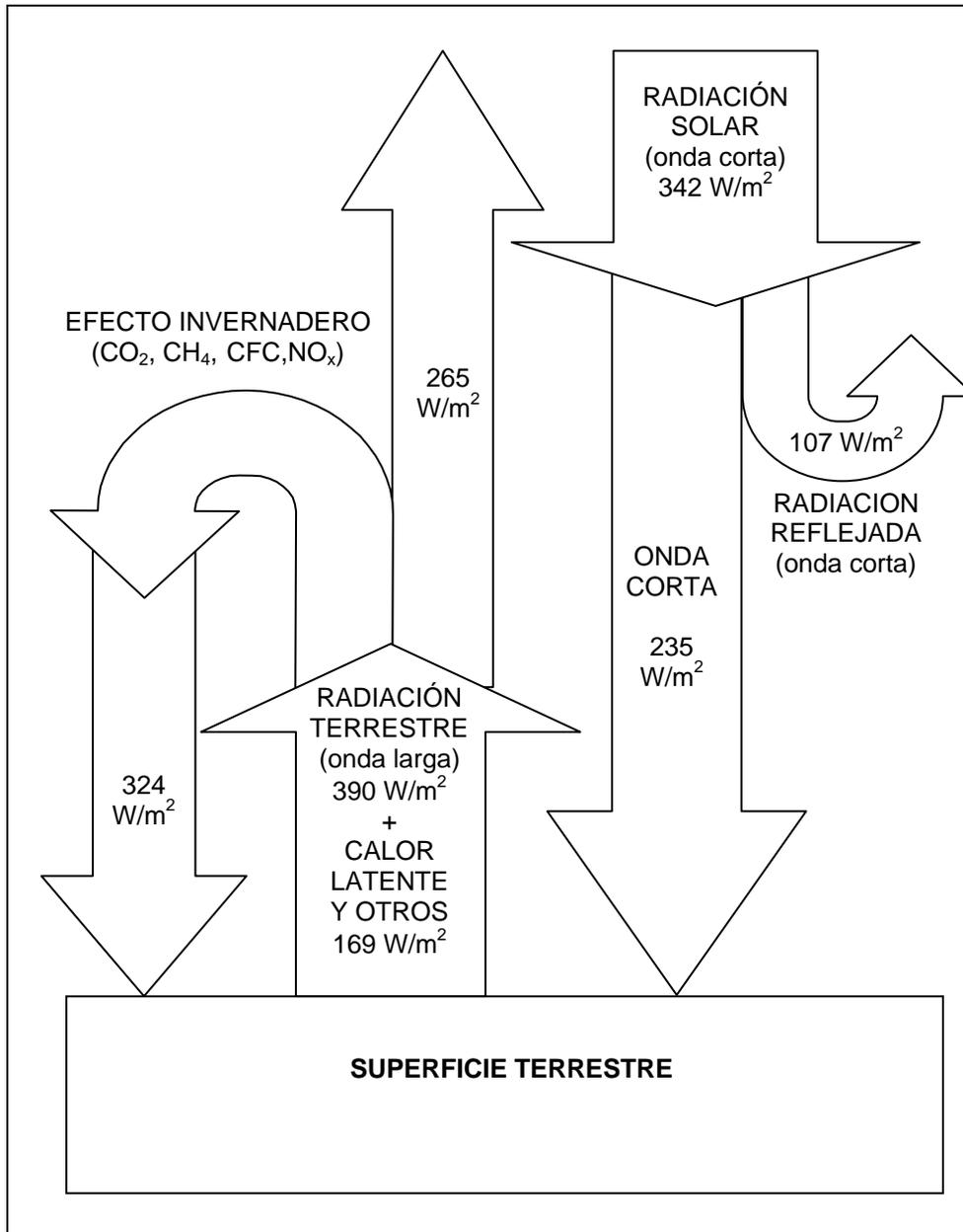


FIGURA 2.1: BALANCE TÉRMICO TERRESTRE

La cantidad de energía solar que alcanza la superficie terrestre varía con la latitud (distancia desde el ecuador), siendo mayor en la zona ecuatorial. Por lo tanto, el aire de la tropósfera está más caliente en el ecuador y más frío en los polos. Sobre el ecuador, el aire caliente posee una baja densidad y se eleva hasta alcanzar suficiente altura, desde donde se mueve en dirección hacia los polos. Al llegar a los polos, las masas de aire se enfrían y fluyen hacia la superficie debido a su mayor densidad. Al alcanzar la superficie de las zonas polares, estas masas de aire frío circulan a baja altura en dirección al ecuador.

En general, existen cinturones de baja presión a lo largo del Ecuador y entre las latitudes 50° y 60° Norte y Sur, como resultado de las columnas de aire ascendentes. Por su parte, existen cinturones de alta presión entre las latitudes 25° y 30° Norte y Sur, donde prevalecen masas de aire descendente. Los principales desiertos de la Tierra están ubicados en aquellas zonas donde existen altas presiones “atrapadas” entre las bajas presiones del cinturón ecuatorial y de los dos cinturones de baja presión.

A medida que avanzan hacia y desde los polos, las masas de aire sufren la acción desviadora de Coriolis, generando patrones de circulación característicos en diferentes regiones². Más aún, existen variaciones (diarias y estacionales) en la distribución de la radiación solar que alcanza la superficie terrestre.

Estos padrones de circulación de las masas de aire en la troposfera tienen un gran efecto sobre la distribución de las precipitaciones sobre la superficie. Los grandes flujos de energía solar en la zona ecuatorial resultan en la evaporación de enormes cantidades de agua desde la superficie, llegando a niveles cercanos a saturación. Cuando estas masas de aire húmedo se elevan y se enfrían, se produce la condensación del vapor de agua, precipitando en las cercanías del ecuador (clima tropical). Una vez que dichas masas de aire se han movido 30° (latitud Norte y Sur en dirección hacia los polos) se ha perdido gran parte de su humedad, lo que explica las bajas precipitaciones que se constatan en esas regiones (clima seco, desértico, semiárido). Al seguir su viaje en dirección a los polos, estas masas de aire cálido comienzan a incrementar sus niveles de humedad, generando precipitaciones a medida que se acercan a las zonas polares (latitudes 60° Norte y Sur). Al llegar a los polos, las masas de aire presentan bajos contenidos de humedad.

Existen diferentes tipos de clima, en base a diferentes criterios de clasificación, entre los cuales figuran: clima tropical, subtropical, subártico, ártico, continental húmedo, desértico, etc. A escala regional, las masas de aire que cruzan los océanos y continentes pueden tener un significativo efecto sobre los padrones estacionales de precipitaciones y temperaturas. A nivel local, las condiciones climáticas (microclimáticas) pueden variar drásticamente de un lugar a otro.

² Para una descripción sencilla y amena acerca del clima y la meteorología se recomienda el texto de M. Medina “Iniciación a la Meteorología” 8ª edición. Editorial Paraninfo. Madrid. (1994).

La temperatura y las precipitaciones juegan un importante papel en determinar las condiciones de vida existentes en una región, por lo que existe una estrecha relación entre el clima y los tipos de especies vivientes. Esto sugiere que si se conoce el clima de una región, se podría predecir que tipo de especies se encuentran allí, y en que cantidad. Para estos efectos, la biosfera se puede dividir en tipos de ecosistemas (llamados biomas) caracterizados por el tipo de clima prevaleciente (ej.: desértico, bosque tropical, praderas)³.

2.2) LA VIDA

La teoría más establecida acerca del desarrollo de la vida en la Tierra supone que existió una evolución gradual a partir de moléculas inorgánicas simples. Todos los seres vivientes de este planeta están compuestos de moléculas orgánicas, es decir, donde la estructura básica está dada por cadenas de carbono. Muchos de estos compuestos orgánicos pueden ser sintetizados a partir de reacciones entre H_2O , NH_3 , CO_2 , CO , CH_4 , H_2S y H_2 . Se cree que todas estas moléculas simples estaban presentes en la atmósfera y en los océanos de la Tierra primitiva, en épocas remotas, donde los rayos ultravioleta provenientes del Sol llegaban a la superficie terrestre sin mayor protección, permitiendo el curso de interminables reacciones químicas que derivaron en la formación de compuestos orgánicos estables, de complejidad creciente. El paso crucial desde tales moléculas orgánicas, hasta los sistemas capaces de autoreplicarse, es decir, desde lo inerte a lo vivo, es aún materia de especulación y su discusión cae fuera de los marcos de este texto.

Hace unos 2.000 millones de años atrás, la atmósfera primaria contenía altas concentraciones de compuestos reductores, con sólo trazas de O_2 . Predominaba la actividad de microorganismos procariotes (bacterias) anaeróbicos, que generaban CH_4 , CO_2 , H_2S y H_2 . Por otra parte, la actividad de microorganismos fotosintéticos, permitía sintetizar compuestos orgánicos a partir de CO_2 y luz, generando, además, O_2 . Hace 600-1000 millones de años atrás, una fracción importante de la materia orgánica, quedó parcialmente descompuesta en sedimentos anóxicos o sepultada completamente y fosilizada sin sufrir oxidación. Ello habría producido un desbalance entre la actividad fotosintética y la oxidación, permitiendo la acumulación de oxígeno en la atmósfera y la evolución hacia formas superiores de vida. Hace aproximadamente 300 millones de años, se generó un gran exceso de materia orgánica viviente, que condujo a la formación de los combustibles fósiles que hoy sostienen el desarrollo industrial.

Actualmente, cada año se producen más de 100 mil millones de toneladas de materia orgánica como resultado de la actividad de los organismos fotosintetizadores, generando O_2 como subproducto. Paralelamente, se oxida una cantidad equivalente de materia orgánica, formando CO_2 y H_2O , como resultado de la actividad respiratoria de los seres vivos y de los procesos de combustión. La proporción entre el O_2 y el CO_2 en la atmósfera depende del balance biótico, de la actividad volcánica, de los

³ Para mayores detalles se recomiendan los textos de Botkin y Keller (1995), y Miller (1990)

procesos de sedimentación, de la radiación solar, entre otros. Estos aspectos se abordan en mayor detalle más adelante en este capítulo, en las secciones sobre los ciclos del carbono y del oxígeno.

En la actualidad, se estima que existen más de 30 millones de especies en la Tierra, de las cuales han sido catalogadas aproximadamente un millón y medio de especies animales, y medio millón de especies de plantas, cada una de las cuales posee su propio nicho ecológico (es decir, realiza funciones y ocupa un hábitat específico).

Los organismos fotosintetizadores tienen la propiedad de capturar la energía solar y convertirla en energía química, para formar estructuras moleculares de diversa complejidad, como los azúcares, almidones, proteínas, grasas y vitaminas. Esta capacidad de alimentarse por sí mismos es la razón por la que se denominan **organismos autótrofos**.

Todos los demás organismos obtienen su energía de otras fuentes, llamándose **organismos heterótrofos**. Existe, por lo tanto, una **cadena alimenticia** o **cadena trófica**, en la que los organismos autótrofos constituyen el **nivel primario** o primer nivel trófico (ej.: plantas, fitoplancton). Todos los heterótrofos que obtienen su energía directamente de los autótrofos se llaman **consumidores primarios**, ocupando el segundo lugar en la cadena trófica; aquí se incluyen todos los herbívoros (ej.: la vaca, el saltamontes, zooplancton). Todos los depredadores que se alimentan de los consumidores primarios corresponden al tercer nivel de la cadena trófica y se denominan **consumidores secundarios** (ej.: la lechuza, el lobo, la ballena). El cuarto nivel trófico corresponde a aquellos **consumidores terciarios**, capaces de alimentarse de los consumidores secundarios. Los **omnívoros** son aquellas especies capaces de alimentarse tanto de vegetales como de animales (ej.: el hombre, el oso, la rata). Otro grupo que juega un papel importante en el reciclaje de materia y energía, lo constituyen los organismos **saprótrofos** que obtienen su energía por degradación de tejidos muertos o por absorción de detritos (es decir, materia orgánica resultante de la descomposición de organismos muertos). Los saprótrofos (ej.: bacterias, hongos, nemátodos, caracoles, ostrácodos, etc) desintegran las estructuras biológicas liberando nutrientes orgánicos que pueden utilizar los productores, a la vez que en sí mismos, constituyen alimento para los consumidores. Si tal descomposición no ocurriera, todos los nutrientes quedarían atrapados en los organismos muertos, limitando la generación de nuevos seres vivos. La acción de descomposición de las bacterias y hongos se basa en enzimas líticas, especializadas en la desintegración de macromoléculas y otros compuestos orgánicos bióticos. Dichas enzimas son secretadas sobre los cadáveres y su acción degradativa genera compuestos de menor peso molecular que son absorbidos por los saprófagos que permanecen en el medio. Ninguna especie de saprótrofos es capaz de descomponer por sí sola un organismo muerto; sin embargo, las poblaciones de desintegradores presentes en la biósfera, pueden descomponer colectivamente un cuerpo por completo. La velocidad de descomposición de los diferentes componentes de los cadáveres de plantas y animales, varía de acuerdo a su estructura química: los azúcares, las grasas y las proteínas se descomponen con mayor rapidez, mientras que la celulosa, la lignina y la quitina, se degradan más

lentamente. Los productos más resistentes terminan como *sustancias húmicas*⁴, que son mineralizadas lentamente por la acción de organismos anaeróbicos en los sedimentos marinos o en el suelo terrestre. Esto último constituye un factor de retardo en la descomposición de la materia orgánica y tiene una gran importancia en el ciclo global del oxígeno.

Los detritos, las sustancias húmicas y otros tipos de materia orgánica en descomposición, son importantes para la fertilidad del suelo, ya que generan una estructura favorable para el desarrollo vegetal. Además, algunos de estos compuestos orgánicos forman complejos quelantes con iones metálicos, manteniéndolos en forma soluble y con menor acción tóxica permitiendo así una mayor disponibilidad biológica de tales metales.

Las cadenas tróficas no constituyen secuencias aisladas, sino que se interconectan formando **redes tróficas**. Estas redes son expresión de la complejidad de las relaciones entre las especies dentro de un ecosistema. Basta imaginar la cadena trófica asociada a la descomposición de los organismos muertos, donde miles de especies y millones de individuos se alimentan a partir de los organismos muertos y de los detritos, generando alimento y nutrientes para otros heterótrofos y autótrofos.

Los seres vivos y su entorno “inerte”, se relacionan de manera inseparable, a través de complejas interacciones. Estas son a menudo tan delicadas, que una perturbación relativamente pequeña en una característica ambiental puede provocar serias alteraciones en otros componentes del sistema natural.

2.3) LA ENERGÍA EN LOS ECOSISTEMAS

Un ecosistema⁵ está constituido por los seres vivientes que habitan en un área determinada, formando una comunidad biótica⁶, donde interactúan con el medio físico (abiótico). Cada componente del ecosistema influye sobre las propiedades del otro. Dentro del ecosistema existe un flujo de energía que conduce a la formación de estructuras bióticas definidas y al reciclaje de materia entre las partes que lo constituyen. Como se mencionó en párrafos anteriores, los nutrientes que forman parte de individuos de una especie, provienen de la muerte y de la desintegración de individuos de otras especies, y los materiales circulan y se transforman en forma eficiente. Aún cuando cada individuo de una especie tiene una actividad independiente, ellos están entrelazados en forma cooperativa. Las excretas u otros subproductos del metabolismo de los seres vivos son vertidas al entorno físico (agua, suelo y aire), donde pasan a formar parte de nuevos procesos biológicos y/o físico-

⁴ Las sustancias húmicas poseen estructuras químicas complejas, de tipo amorfo y coloidal. Son condensaciones de anillos aromáticos combinados con productos de la descomposición de proteínas y polisacáridos. Los ácidos húmicos poseen anillos fenólicos, estructuras cíclicas y cadenas laterales nitrogenadas, y unidades de carbohidratos.

⁵ Un “sistema” se define como un conjunto de componentes que se interrelacionan o actúan juntos, formando un todo unificado.

⁶ El término “comunidad biótica” se emplea para designar todos los grupos de individuos de cualquier especie que ocupan una cierta área.

químicos.

Generalmente, cuando el hombre interviene en un ecosistema lo simplifica, reduciendo el número de componentes. En tales intervenciones reemplazamos miles de especies de plantas y animales presentes en los ecosistemas por monocultivos, o por infraestructura antrópica (carreteras, edificios). Al reducir la biodiversidad, las especies remanentes son vulnerables al ataque de especies invasoras no deseadas (ej.: malezas, plagas).

En rigor, el ecosistema es un sistema abierto que permite la entrada y la salida de materia y energía, aún cuando en algunos casos estos flujos son relativamente pequeños en comparación con las cantidades que se reciclan al interior de éstos. Los flujos de energía y materiales de entrada y salida son mayores a medida que la actividad metabólica, dentro del ecosistema, aumenta, o cuando el desequilibrio entre organismos autótrofos y heterótrofos es muy grande.

En la Naturaleza, siempre que un objeto se mueve, se calienta o se enfría, o sufre alteraciones químicas, hay intercambio de energía. La energía se define como la capacidad para hacer trabajo y su comportamiento está descrito por las leyes de la termodinámica. En forma muy simplificada:

- La primera ley establece que la energía puede ser transformada de un tipo a otro, pero no se crea ni se destruye.
- La segunda ley plantea que ningún proceso de transformación de energía ocurre espontáneamente, a menos que, haya una degradación de la energía de una forma concentrada a una forma dispersa.

Así, el calor presente en un cuerpo se dispersará espontáneamente hacia sus entornos más fríos. Una fracción de la energía se convierte en energía calórica no utilizable, por lo que ninguna transformación espontánea de energía tiene una eficiencia 100%. La entropía es una medida de la energía no disponible resultante de las transformaciones, y es un índice del desorden asociado con la degradación de la energía. *Los organismos, los ecosistemas y la biosfera entera, poseen la característica esencial de que pueden crear y mantener un alto grado de orden interno (es decir, una baja entropía).* La baja entropía se logra a través de una efectiva disipación de la energía de gran calidad (luz, enlaces químicos) hacia energía de baja calidad (ej.: calor).

En el ecosistema, el “orden” dentro de una compleja estructura viviente, se mantiene gracias a la respiración de la comunidad que “bombea” continuamente el desorden hacia fuera. En otras palabras, los ecosistemas y organismos son sistemas termodinámicamente abiertos, que intercambian continuamente materia y energía con el medio para reducir su propia entropía interna e incrementar la externa:

Es evidente que la cadena trófica constituye la vía por la que circula la energía y los materiales, desde su fuente primaria (es decir, energía solar y CO₂ atmosférico) hacia los diferentes compartimentos biológicos que conforman un ecosistema. En cada nivel trófico, una parte importante de la energía recibida se disipa en diferentes procesos físicos y químicos que forman parte del metabolismo de las especies,

quedando sólo una pequeña fracción incorporada en los nuevos materiales almacenados.

A modo de ejemplo ilustrativo del flujo energético, consideremos una planta que recibe 1000 calorías de energía lumínica, la mayor parte de la cual se refleja o transmite a través del tejido sin ser absorbida. Una gran fracción de la energía absorbida es almacenada en forma de calor y utilizada en la evaporación del agua de las hojas y otros procesos físicos, tales como el transporte hídrico dentro de la planta. El resto se utiliza en los procesos vitales, quedando un equivalente a 5 calorías almacenadas en el tejido como material rico en energía. Este constituye un potencial energético adecuado para la alimentación de otros animales. Aquel herbívoro, por ejemplo un venado, que coma dicha planta que contiene 5 calorías de energía alimenticia, gastará el 90% de la energía recibida para mantener su metabolismo y sólo convertirá 0,5 calorías en nuevo material corporal. A su vez, el carnívoro que se alimenta de aquel herbívoro ocupará sólo una pequeña fracción de la energía obtenida, en un nuevo peso corporal (en este caso menos de 0,05 calorías). De este modo, la energía química aprovechable en los procesos vitales, va disminuyendo a medida que se asciende en la cadena trófica.

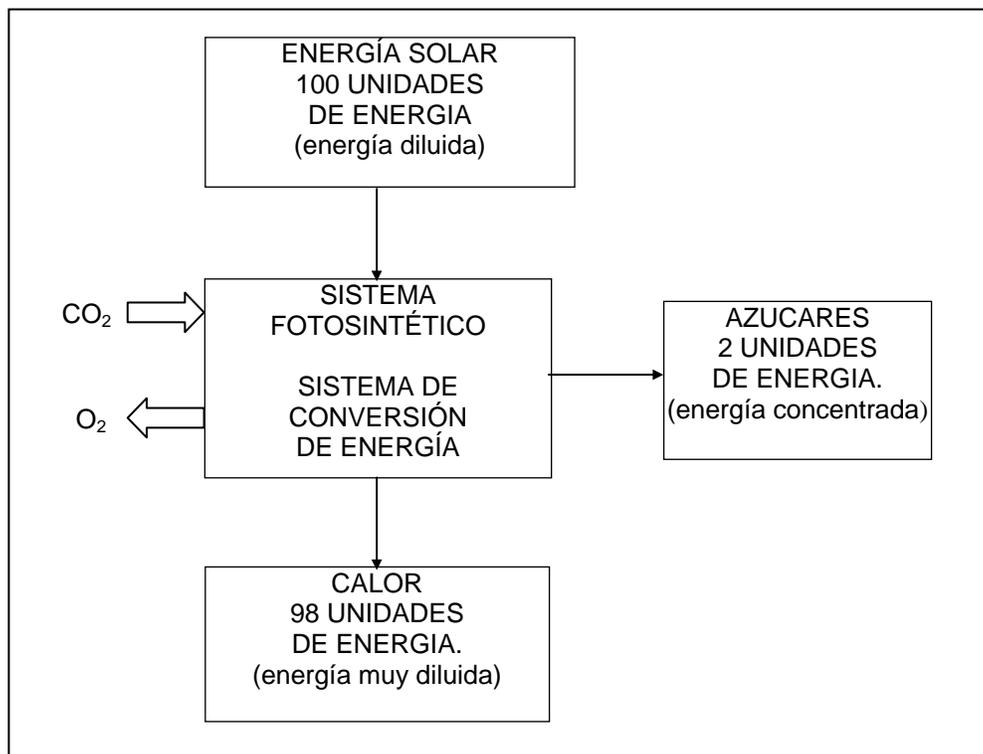


FIGURA 2.2: LA ENERGÍA EN LOS ECOSISTEMAS

En los ecosistemas terrestres y acuáticos, se requiere de gran producción primaria para mantener una proporción pequeña de depredadores, resultando una distribución piramidal de la tasa de producción. El hombre tiene la ventaja de que puede ocupar posiciones como consumidor primario, secundario o terciario en la cadena alimenticia, lo que le confiere una mayor capacidad para obtener los recursos energéticos y materiales para su funcionamiento fisiológico.

El origen y la calidad de la energía disponible, determinan, en mayor o menor medida, los tipos y cantidad de organismos vivos, las funciones y el estilo de vida de los seres humanos. Los ecosistemas son impulsados por dos fuentes básicas de energía: energía solar y energía química (es decir, oxidación de compuestos orgánicos, reacciones nucleares, reacciones exotérmicas). De acuerdo a la fuente de energía que los impulsa, los ecosistemas pueden ser clasificados de la siguiente manera:

- ***Ecosistemas naturales impulsados por el Sol***

Constituyen el módulo básico de sostén de vida en la Tierra. El flujo energético medio anual es del orden de $0,3 \text{ W/m}^2$. Este flujo energético, representa la magnitud de trabajo potencial o real que hay en una unidad de área del ecosistema y, también, la cantidad de entropía que debe ser disipada para que el sistema mantenga su funcionamiento. Corresponden a esta categoría de ecosistema: los océanos abiertos, las grandes extensiones de bosques y praderas, los amplios y profundos lagos, en donde la energía solar directa constituye la principal fuente de energía, existiendo otros factores que limitan el desarrollo de la vida como, por ejemplo, escasez de nutrientes o agua. En general disponen de poca energía y su productividad es reducida.

- ***Ecosistemas impulsados por el Sol, subsidiados por otras fuentes naturales de energía***

Estos son sistemas naturalmente productivos, que no sólo tienen una alta capacidad para sostener la vida, sino que, producen un exceso de materia orgánica que se exporta a otros sistemas o se almacena. El flujo energético anual medio es del orden de 3 W/m^2 . Un estuario es un buen ejemplo de este tipo de ecosistemas, en donde, además de la energía solar directa, se cuenta con la energía de las olas, mareas y corrientes, que permiten reciclar parcialmente los nutrientes minerales, transportan alimentos y desechos, permitiendo a los organismos llevar a cabo una conversión de energía solar más eficiente. Estos subsidios energéticos pueden tener muchas otras formas, tales como la lluvia y el viento en un bosque tropical, o la materia orgánica y los nutrientes provenientes de las hojas muertas recibidos en un pequeño lago desde una vertiente.

- ***Ecosistemas impulsados por el Sol, subsidiados por el Hombre***

La agricultura, la acuicultura y la silvicultura son claros ejemplos de esta categoría. La fuente primaria de energía para el desarrollo de la vida en tales

ecosistemas sigue siendo el Sol, pero con un considerable aporte de energía entregada por el hombre. Los flujos energéticos son del orden de 5 W/m^2 . Se obtienen grandes rendimientos en los cultivos alimenticios mediante los aportes de combustibles, energía mecánica animal, riego, fertilización, selección genética y control de plagas, todos los cuales representan energía adicional aplicada directa o indirectamente. Tomando las palabras del ecólogo H.T. Odum *los alimentos y fibras obtenidos de la producción agrícola y forestal se hacen en parte, de petróleo.*

- **Ecosistemas urbano-industriales impulsados por combustibles**

La "obra maestra de la Humanidad". La energía potencial altamente concentrada de los combustibles reemplaza en gran medida a la energía solar, con flujos energéticos en el rango $10\text{-}400 \text{ W/m}^2$. Una ciudad como Tokio, tiene una densidad de consumo energético del orden de 400 W/m^2 (cifra comparable con la energía solar que llega a la superficie terrestre: $130\text{-}300 \text{ W/m}^2$), y el promedio para la Cuenca Industrial del Río Rin de 10 W/m^2 . En su extremo más drástico, ello representa una seria anomalía del desarrollo social moderno, ya que el complejo urbano-industrial se transforma en un verdadero parásito de los otros ecosistemas, tomando de ellos los materiales y combustibles, lo que genera nuevas riquezas y nuevos residuos. Si se lograra utilizar en forma concentrada la energía solar directa en los centros urbanos, para suplir sus diferentes requerimientos energéticos y materiales primarios, y reemplazar parcialmente los combustibles fósiles y la importación de alimentos desde las zonas rurales, ello tendría un efecto global beneficioso para la Humanidad y su entorno natural.

Aparte de la distribución de energía en la cadena trófica, es interesante revisar el flujo de materia, particularmente de aquellos compuestos que por sus características químicas tienden a concentrarse en cada eslabón de la cadena alimenticia. Un ejemplo ilustrativo es el caso del DDT utilizado para controlar las poblaciones de mosquitos en los humedales del Sur de EEUU, durante varios años. El DDT, además de ser altamente tóxico, es liposoluble, por lo que tiende a acumularse en los tejidos grasos. A pesar de que el DDT se aplicó en dosis inferiores a los niveles de toxicidad aguda para plantas, peces y otros animales, los residuos venenosos de DDT persistieron en el ecosistema por largos períodos, lo que permitió su acumulación en los distintos niveles tróficos. El DDT se adsorbió en los detritos y se acumuló en los detritívoros, peces pequeños y depredadores de mayor tamaño. Como resultado, la concentración de DDT mostró un significativo aumento a mayores niveles de la cadena trófica, tal como se muestra en la Tabla 2.1.

La amplificación biológica es característica de muchos plaguicidas, particularmente de aquellos basados en compuestos organoclorados. El DDT fue prohibido a fines de la década de los 70, cuando se comprobó su efecto negativo sobre las aves (alteraciones al metabolismo del calcio) y el peligro potencial sobre la salud humana.

TABLA 2.1: CONCENTRACIÓN DE DDT EN DISTINTOS NIVELES DE LA CADENA TRÓFICA⁷

NIVELES DE LA CADENA TRÓFICA	CONCENTRACIÓN DE DDT (MG DDT / KG PESO SECO DE ORGANISMOS)
Agua (mg/litro agua)	0,00005
Plancton	0,04
Carpita plateada	0,23
Lucio pequeño (depredador)	1,33
Pez aguja (depredador)	1,33
Gaviotín (depredador de animales pequeños)	3,91
Gaviota (carroñera)	6,00
Cuervo marino	22,8
Cormorán (depredador de peces mayores)	26,4

2.4) EQUILIBRIOS EN UN ECOSISTEMA

Los ecosistemas están sujetos a constantes estímulos “perturbadores”, tales como: cambios climáticos, variaciones en la humedad, temperatura, radiación solar; además los organismos crecen y a su vez son devorados por otros, varían los índices de fertilidad, existen migraciones, el suelo pierde o recibe nutrientes, etc.. A pesar de estos cambios constantes, los ecosistemas presentan un cierto nivel de estabilidad, ya sea resisten las tensiones del medio, o se recuperan con rapidez de una perturbación. En todos los ecosistemas intervienen un conjunto de factores opuestos que se conjugan para mantener un equilibrio dinámico, donde los organismos vivos juegan un papel fundamental. A nivel del ecosistema existen, entre otros, subsistemas microbianos que regulan el almacenamiento y la liberación de nutrientes; y subsistemas del tipo depredador-presa que controlan las poblaciones. Se ha observado que mientras mayor sea la biomasa presente y su diversidad, mayor es su nivel de estabilidad frente a diferentes perturbaciones.

Los flujos de materia y energía en los ecosistemas constituyen también flujos de información química y física entre las partes constituyentes, análogos a los mensajeros nerviosos y hormonales de los organismos superiores. Estos flujos están organizados de modo que regulan el sistema como un todo, otorgándole un cierto grado de estabilidad. El mecanismo de regulación dominante que se observa en los sistemas naturales, corresponde a un control con retroalimentación negativa, tal como se ilustra esquemáticamente en la Figura 2.3.

⁷ Datos citados por E.P Odum *op.cit.*

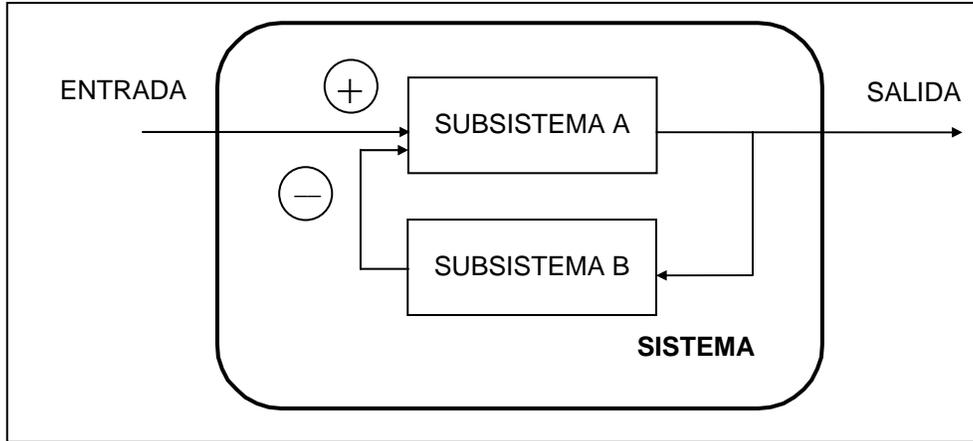


FIGURA 2.3: CONTROL RETROALIMENTADO EN ECOSISTEMAS

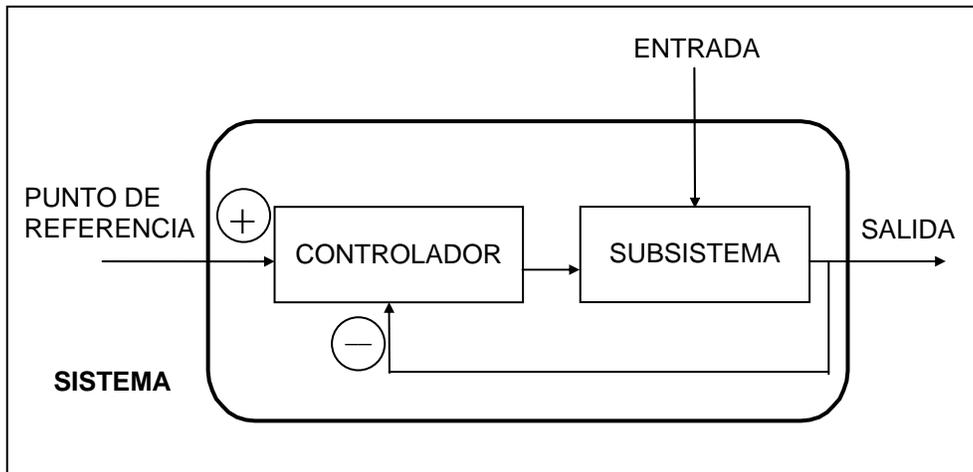


FIGURA 2.4: CONTROL HOMEOSTÁSICO EN LOS ORGANISMOS

En este caso, los mecanismos de control son internos y difusos, con interacciones entre los subsistemas primarios y secundarios. Además de este mecanismo, la estabilidad de los ecosistemas se mantiene gracias a una redundancia en los componentes funcionales; es decir, más de una especie o componente es capaz de ejecutar una función determinada. Por ejemplo, si existen varias especies autotróficas, con diferentes temperaturas óptimas, la tasa de fotosíntesis en la comunidad puede mantenerse relativamente estable frente a cambios en la temperatura.

En los seres vivos, el mecanismo de regulación retroalimentado, presenta un controlador externo, que tiene un punto de referencia previamente especificado⁸.

En los ecosistemas, el tamaño de las poblaciones y las proporciones entre ellas muestran oscilaciones aún en aquellos sistemas con mayores niveles de estabilidad. Si en un ecosistema hay suficiente alimento y no existe depredación, una bacteria que se duplique cada 20 minutos, daría origen a 10^{43} bacterias en menos de dos días. En general, todas las especies tienen un gran potencial biótico, es decir, pueden desarrollarse rápidamente si las condiciones en el ecosistema favorecen su crecimiento. Sin embargo, existen presiones ambientales que inhiben el potencial de crecimiento de las especies.

El nivel poblacional de una especie en cualquier ecosistema está controlado por los elementos esenciales para la vida (es decir, nutrientes y factores físicos). Aquellos elementos que se encuentren muy cercanos a los límites de tolerancia, se constituyen en factores limitantes. Los límites de tolerancia incluyen un nivel mínimo y máximo para cada factor relevante.

Entre los factores físicos ambientalmente importantes en tierra, se incluyen: la luz, la temperatura, la humedad, el pH, los nutrientes, el espacio disponible y el viento. En el ambiente marino, se deben considerar: la luz, la temperatura, el oxígeno, el pH, los nutrientes, la salinidad y las corrientes marinas.

La temperatura es un factor ambiental de máxima importancia. Existen especies de bacterias y algas capaces de sobrevivir a niveles de hasta 80-88°C, mientras que los peces e insectos más resistentes, pueden soportar hasta 50°C. Algunos microorganismos pueden soportar niveles muy bajos de temperatura (decenas de grados bajo cero). Las especies acuáticas presentan rangos de tolerancia a la temperatura más estrechos que las especies terrestres. La temperatura suele ser causa de zonificación y estratificación en los medios acuáticos y terrestres. Un fenómeno interesante es el aletargamiento o inhibición presentado por organismos sometidos a un nivel constante de temperatura. Parece existir un efecto estimulante en los cambios de temperatura dentro de los rangos de tolerancia.

La luz es un factor ambiental vital, que juega un papel fundamental en la fotosíntesis y en la vida de los animales. Desde el punto de vista ecológico, interesan la longitud de onda, así como la intensidad y duración de la luz, existiendo niveles de tolerancia máximos y mínimos en distintas especies.

⁸ En biología los mecanismos de control retroalimentado se denominan mecanismos homeostáticos.

El factor biológico de resistencia ambiental más importante lo constituyen las presiones de depredación y competencia, aún cuando ellas no son las únicas formas de interacción entre dos especies. La **competición** es una interacción en que dos o más organismos tratan de ganar control sobre un recurso limitado.

La **depredación** constituye una parte integral del funcionamiento de todo ecosistema, ya que los heterótrofos están obligados a comer para sobrevivir. En ecosistemas estables, el crecimiento y la depredación están equilibrados de tal modo que todas las especies tienen poblaciones viables. La población de un herbívoro está regulada tanto por la disponibilidad de alimento (hierbas), como por el tamaño y vitalidad de la población depredadora. La abundancia de hierbas depende de los factores que afectan la fotosíntesis (luz, agua, nutrientes), y de voracidad de la población de herbívoros. A su vez, la población de depredadores está regulada por el tamaño y vitalidad de la población de herbívoros.

La depredación también constituye una presión favorable en la selección natural de la especie presa, ya que los más aptos tienen mayores posibilidades de ejercer acciones defensivas más efectivas y sobrevivir.

Otras interacciones de interés entre especies incluyen:

Amensalismo: Una especie inhibe el crecimiento de otra, sin que ésta le afecte.

Parasitismo: Es un caso particular de depredación, en que el depredador es mucho más pequeño que la presa, y obtiene su alimento al consumir el tejido o el suministro de alimento de un huésped.

Comensalismo: Una especie saca provecho de un huésped sin que este último sea afectado.

Protocooperación: Ésta es una relación favorable entre dos especies, pero no es obligatoria. Por ejemplo, una especie puede servir de vehículo de transporte, mientras que la otra aporta capacidad defensiva frente a depredadores.

Mutualismo: Es otro tipo de interacción benéfica y necesaria para ambas partes. En muchos casos, existe una dependencia directa, donde ambos organismos deben crecer juntos para sobrevivir.

2.5) LOS CICLOS BIOGEOQUÍMICOS

Tanto la estructura física como la composición química de la Tierra están en constante cambio. Las diferentes placas de la corteza terrestre se mueven en procesos a gran escala, extremadamente lentos, con tiempos característicos del orden de cientos de miles de años o más, cuyas manifestaciones actuales se traducen en erupciones volcánicas, formación de nuevos volcanes y terremotos. Por otra parte, los diferentes compuestos químicos que forman el planeta sufren reacciones químicas, cambios de fase y transporte de una región a otra. El flujo de materiales, entre los que se incluyen los componentes del protoplasma, tiene lugar a través de los diferentes comportamientos del ambiente físico y biológico, en rutas más o menos circulares denominados **ciclos biogeoquímicos**. La atmósfera, los océanos (parte de la hidrósfera) y la corteza terrestre son los principales compartimentos que sirven de reserva para los materiales esenciales para la vida en la Tierra. En dichos compartimentos, los diferentes elementos se encuentran en grandes cantidades (del orden de miles de millones de toneladas) y sus tiempos de residencia pueden ser de unos pocos días (ej. el agua en la atmósfera) hasta miles o millones de años (ej. los carbonatos en el fondo de los océanos).

El agua participa como vehículo de materia y energía, ya que sus propiedades químicas y termodinámicas le confieren un papel fundamental en los procesos naturales. Este compuesto está en continuo movimiento entre la atmósfera, los océanos y los continentes, permitiendo el transporte rápido de energía calórica y de compuestos químicos. El transporte de materiales entre la atmósfera y los océanos se basa en procesos de evaporación, precipitación, arrastre y depositación de polvos y aerosoles. Mecanismos físicos similares permiten el intercambio de materia entre la atmósfera y el suelo. Por su parte, los ríos transportan sólidos en suspensión y compuestos disueltos hacia el mar, donde se integran a los sedimentos aquellos compuestos insolubles. Los compuestos de la corteza se exponen al suelo en los levantamientos producidos por los terremotos u otros movimientos de tierra, mientras que las erupciones volcánicas aportan materiales que se encuentran en el manto terrestre.

Es importante recalcar aquí que la actividad biológica juega un papel fundamental en la dinamización de los ciclos biogeoquímicos. Como se verá en los párrafos siguientes, los microorganismos, las plantas y los seres heterótrofos participan activamente en los ciclos asociados al oxígeno, carbono, nitrógeno, azufre y fósforo.

Dichos procesos naturales han ocurrido desde mucho antes de la aparición del hombre. La actividad humana puede causar cambios en la velocidad de algunos de estos procesos, dinamizando cambios desfavorables para su propia existencia. Por ejemplo, el incremento de las emisiones de CO₂ debido a la combustión de petróleo, gas, leña, carbón y otros combustibles, sumado a la disminución de la biomasa fotosintética, parece ser responsable del significativo aumento de la concentración de CO₂ en la atmósfera. Dentro del contexto de este trabajo, es importante conocer los ciclos biogeoquímicos más relevantes. A continuación se

presenta una breve descripción de los ciclos del agua, el oxígeno, el carbono, el nitrógeno y el azufre, ya que estas se encuentran mayoritariamente presentes en los seres vivos.

2.5.1) Ciclo Hidrológico

El agua tiene una importancia fundamental en el desarrollo de la vida en el planeta. Cubre el 70% de la superficie, y sus propiedades controlan las condiciones climáticas que hacen factible la vida. Es uno de los solventes más poderosos que existen, y es uno de los vehículos de transporte de materiales más importante, tanto dentro de los seres vivos, como en el entorno físico. Además, el agua posee un alto calor de vaporización (del orden de $2260 \text{ (kJ kg}^{-1}\text{)})$ y calor específico ($4,2 \text{ (kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}\text{)})$, que la transforman en un vehículo de transporte de energía de importancia fundamental en el control climático terrestre.

Las fuerzas gravitacionales y la energía solar constituyen las principales fuerzas motrices del ciclo hidrológico. La gravedad afecta la circulación de los ríos y aguas subterráneas, mientras que el resto del ciclo hídrico, es determinado por la energía solar. La absorción de dicha energía genera evaporación de las aguas superficiales, tanto continentales como oceánicas. Además, una pequeña fracción de la energía solar incidente, genera los vientos y las corrientes, que ayudan a la circulación de la atmósfera y las masas de agua.

La energía absorbida a la forma de calor latente durante la evaporación, es liberada durante la condensación, por lo que estos flujos hídricos son también vehículos de transporte de energía desde una región a otra. El efecto neto de esta transferencia de energía es una reducción de las diferencias de temperatura entre las diferentes zonas de la Tierra.

Otro efecto adicional del ciclo hidrológico, deriva de la gran capacidad solvente del agua. La lluvia absorbe aquellos compuestos solubles presentes en la atmósfera, tales como: O_2 , N_2 , CO_2 y óxidos de S y N. Esto último puede incrementar significativamente la acidez de las lluvias. A su vez, la escorrentía debida a las precipitaciones, disuelve los compuestos solubles del suelo y las rocas, proceso que es facilitado a bajo pH. Como resultado de esto, la escorrentía que llega a los ríos, lagos y mares, es rica en compuestos disueltos, que luego pueden formar compuestos insolubles, y precipitar o sufrir nuevas transformaciones químicas.

Los aerosoles de agua de mar generados por acción del viento y las olas, son arrastrados por los vientos tierra adentro, donde son depositados por acción de las lluvias o la nieve o como deposición seca, representando una importante fuente de sodio y cloro.

Las tablas siguientes muestran las reservas de agua en la Tierra, así como los flujos anuales más importantes. Se observa que existe un flujo de agua neto desde los océanos a la tierra (equivalente a $46 \cdot 10^{12} \text{ m}^3/\text{año}$), el que retorna al mar vía los ríos y acuíferos subterráneos. El tiempo de residencia medio del agua en la atmósfera es del orden de 8 a 9 días, mientras que en el mar es del orden de 4000 años. Es importante considerar que el agua fresca, incluyendo aquella

existente en los polos, glaciares, acuíferos subterráneos, humedales, ríos, lagos y otras fuentes superficiales de agua dulce, corresponde al 2,69% del total existente en la Tierra.

TABLA 2.2: RESERVAS DE AGUA

LUGAR	10 ¹⁵ m ³	%
Océanos	1350	97,31
Polos y glaciares	30	2,16
Acuíferos subterráneos	7	0,50
Lagos, ríos, humedales y otros	0,4	0,029
Atmósfera	0,01	0,001

TABLA 2.3: FLUJOS HÍDRICOS

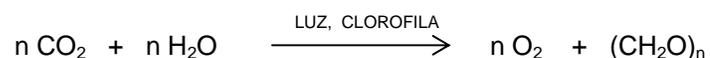
FLUJOS	10 ¹² m ³ / año	%
Precipitaciones sobre los océanos	410	79,15
Precipitaciones sobre los continentes	108	20,85
Total Precipitaciones	518	100,00
Evaporación en los océanos	456	88,03
Evapotranspiración (desde los continentes)	62	11,97
Total Evaporación	518	100,00

2.5.2) Ciclo del Oxígeno

El oxígeno se encuentra presente en todo el ámbito terrestre. Es un importante componente de la corteza terrestre, donde representa un 28,5% en peso, formando silicatos, carbonatos, fosfatos, sulfatos y óxidos metálicos, químicamente estables. En el sistema hidrológico forma parte de la molécula de agua y también está como O₂ disuelto. Finalmente, la atmósfera contiene un 23,2% en peso de oxígeno, principalmente a la forma de O₂.

El O₂, tanto atmosférico como disuelto en agua, es altamente reactivo, participando en los procesos de oxidación asociados a los ciclos geoquímicos del carbón, hidrógeno, nitrógeno, azufre y hierro.

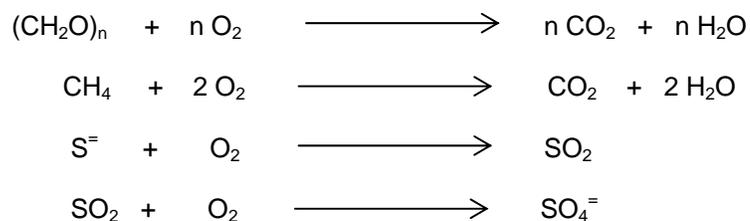
La mayor parte del O₂ es producido por acción de la **fotosíntesis** que ocurre en presencia de luz:



A través de este proceso, las plantas verdes y las algas absorben energía lumínica y la convierten en energía química, almacenada en los enlaces de los compuestos orgánicos que se forman. Por ejemplo, para generar un mol de glucosa mediante fotosíntesis, se requieren 2880 kJ a 25°C y 1 atm. Las plantas verdes contienen moléculas de clorofila que son capaces de absorber luz visible, principalmente en el espectro del rojo y el azul.

Adicionalmente, una pequeña cantidad de oxígeno se forma por fotodisociación del agua en las regiones superiores de la atmósfera, debido a la acción de los rayos ultravioleta (UV). La radiación UV también está involucrada en la conversión del O₂ a ozono (O₃), en la estratósfera. El ozono tiene una gran capacidad para absorber la letal radiación UV, impidiendo que ésta alcance la superficie terrestre.

El O₂ participa en todas las reacciones de **oxidación**, tanto aquellas que ocurren por procesos químicos espontáneos, como debido a la acción respiratoria de los organismos vivientes, por ejemplo:



Existe suficiente evidencia que demuestra que la concentración de O₂ en la atmósfera se ha mantenido constante por millones de años, lo que refleja un estricto equilibrio entre las tasas de consumo y de formación de O₂. Al parecer existen mecanismos de regulación de acción rápida, que permiten mantener el nivel de oxígeno a los niveles actuales. Dicho mecanismo de control retroalimentado, está ligado, probablemente, al ciclo del carbono y a la cantidad de materia orgánica que es incorporada a los sedimentos oceánicos. Este fascinante aspecto se discute más extensamente en la sección sobre la Teoría de Gaia.

2.5.3) Ciclo del Carbono

El 99% del carbono del planeta se encuentra presente en las rocas a la forma de carbonato (normalmente, como CaCO₃) o como carbono orgánico disperso. El 1% restante se encuentra presente en: la atmósfera, los seres vivos, los combustibles fósiles y compuestos orgánicos e inorgánicos disueltos en agua. Los organismos vivientes están compuestos principalmente de agua y de una amplia gama de compuestos orgánicos.

El carbono acompaña estrechamente al ciclo del oxígeno en los procesos fotosintéticos y en los procesos de oxidación de materia orgánica, ya sea por la combustión o por actividad biológica.

El CO₂ generado por la oxidación de compuestos orgánicos se disuelve fácilmente

en agua. Más del 98% del CO₂ se encuentra disuelto en los océanos (como HCO₃⁻ y CO₃⁼), mientras que el 2% restante se mantiene en la atmósfera, donde a fines del siglo XX alcanzaba una concentración del orden de 350 ppm (mostrando un significativo incremento en los dos últimos siglos):



La proporción en que se encuentran estos compuestos depende fundamentalmente del pH de la solución. La mayoría de los océanos tiene un pH entre 8 y 8,3, y en promedio, cerca de 13% de la mezcla está como CO₃⁼. En las capas oceánicas superficiales, existe una gran actividad fotosintética, con un alto consumo de CO₂, por lo que la reacción tiende a desplazarse hacia la izquierda para restaurar el equilibrio químico. Por otra parte, en las profundidades marinas, existe una producción neta de CO₂ debido a la actividad respiratoria y a los procesos de oxidación de la materia orgánica muerta. Bajo estas condiciones, la reacción se mueve hacia la derecha, incrementando la concentración de CO₃⁼. Si el incremento de concentración del ion carbonato es significativo, y se excede el producto de solubilidad del CaCO₃ (K_{PS}= 4,47 10⁻⁸ M⁻¹), se producirá una mayor precipitación de CaCO₃, principal constituyente de las conchas marinas.

La actividad fotosintética mantiene un fino balance en el ciclo del carbono y del oxígeno. A través de la fotosíntesis se forman los compuestos orgánicos, utilizando CO₂ como fuente de carbono. Los productores primarios en el océano son las algas unicelulares a la deriva (llamadas fitoplancton), las que sirven de alimento al zooplancton. A su vez, ambos son el alimento de los organismos acuáticos superiores (necton y bentos). Así, el carbono se mueve continuamente desde la atmósfera hacia la cadena alimenticia, a través de la fotosíntesis, retornando a la atmósfera durante la respiración y oxidación de la materia orgánica muerta. Una pequeña parte de la materia orgánica se deposita en los sedimentos, junto con los carbonatos insolubles.

Las principales reservas de carbono y los flujos del ciclo se presentan en la Tabla siguiente:

TABLA 2.4: RESERVAS DE CARBONO

LUGAR	10 ¹² ton C	%
Rocas, inorgánico	26.000	76,37
Rocas, orgánico disperso	8.000	23,50
Agua, inorgánico y orgánico	38	0,11
Fósiles	4	0,01
Biomasa, total	2	-
Atmósfera, CO, CO ₂ , CH ₄	0,8	-

TABLA 2.5: FLUJOS DE CARBONO

FLUJO	10 ⁹ ton C / año
CO ₂ generado por respiración de organismos marinos	97
CO ₂ generado por oxidación de organismos muertos	25
CO ₂ generado por respiración de organismos terrestres	10
CO ₂ generado por combustión	6
CH ₄ generado anaeróbicamente	0,5
C fijado por fotosíntesis marina	100
C fijado por fotosíntesis terrestre	35
C fijado a sedimentos marinos, como carbonato	0,2

Cabe destacar que la acción microbiana anaeróbica sobre diversos sustratos orgánicos constituye otro vehículo de destrucción de material orgánico y transformación en carbono inorgánico. Dicha actividad biológica anaeróbica ocurre en los intestinos de los mamíferos, en los humedales, profundidades marinas y otras zonas anóxicas, contribuyendo a la generación de 500-1000 millones de toneladas de CH₄ anualmente, el que se oxida a CO₂ en la atmósfera. Se ha sugerido que este proceso juega un papel importante en los mecanismos biológicos que existen para la regulación del nivel de oxígeno en la atmósfera. Más aún, tanto el CO₂ como el CH₄ contribuyen en un 57% y 12% al efecto invernadero, respectivamente.

2.5.4) Ciclo del Nitrógeno

El nitrógeno a la forma de N₂ representa el 76% en peso de la atmósfera terrestre y constituye la principal reserva de nitrógeno en el planeta. Al contrario de otros elementos, el nitrógeno presente en el suelo proviene principalmente de la atmósfera. El N₂ tiene una baja reactividad química y sólo se oxida a altas temperaturas. El nitrógeno es un componente importante de los organismos vivos, principalmente como N³⁻, a la forma de grupo amino (R-NH₂) en los aminoácidos y proteínas. Desde el punto de vista bioquímico, pocos organismos pueden utilizar directamente el N₂ atmosférico. Sin embargo, existen varios puentes entre la comunidad biológica y el nitrógeno atmosférico. Las reacciones fotoquímicas en la atmósfera, las bacterias y algas fijadoras de nitrógeno del suelo y el mar, y las fábricas de fertilizantes químicos construidas por el hombre en el presente siglo, transforman el N₂ en formas utilizables para los seres vivos. Entre estos agentes, los microorganismos juegan un importante papel en las complejas transformaciones químicas que caracterizan el ciclo geoquímico del nitrógeno, particularmente, en los procesos de asimilación, fijación, desnitrificación, nitrificación y amonificación, tal como se describe a continuación.

El N₂ atmosférico es transformado en N³⁻ a través de la acción de microorganismos existentes tanto en el agua como en el suelo, en un proceso denominado **fijación del nitrógeno**. Existe una abundante comunidad de microorganismos capaces de fijar el N₂, entre ellas: bacterias aeróbicas (ej.

Azotobacter sp., *Thiobacillus sp.*, algas verde-azules), bacterias anaeróbicas (ej. *Clostridium sp.*, *Desulfovibrio sp.*, bacterias fototróficas), bacterias en asociación simbiótica con: nódulos de leguminosas (ej. *Rhizobium sp.*), líquenes (ej. cianobacterias), etc. Los avances recientes en las técnicas de detección de presencia de organismos fijadores de N_2 han permitido revelar que hay fijación biológica de nitrógeno en los estratos autótrofos y heterótrofos de los ecosistemas, y en las zonas aeróbicas y anaeróbicas de los suelos y sedimentos acuáticos. Sólo los microorganismos anucleados más primitivos (procariotas), tienen la capacidad de fijación de nitrógeno (algunos de los cuales aparecieron sobre la Tierra hace 1500 millones de años). Resulta interesante constatar la alta eficiencia de fijación de N_2 que caracteriza a aquellos sistemas con asociación simbiótica, en comparación con los organismos no fototróficos de existencia libre. Por ejemplo, la capacidad fijadora de las bacterias en asociación con los nódulos de las raíces de leguminosas está en el rango 50-900 (kg N fijado/hectárea/año), mientras que las especies libres (ej. *Clostridium sp.*, *Azotobacter sp.*) fijan menos de 1 (kg N/hectárea/año). Al parecer, el nódulo radicular de tales plantas protege a los microorganismos del exceso de oxígeno, el cual es inhibidor de la fijación, y les proporciona la energía química necesaria; y en retorno la planta obtiene una cantidad de nitrógeno fácilmente asimilable. Esta actividad simbiótica ilustra un fenómeno de cooperación mutua, muy común en los sistemas naturales.

La fijación de N_2 en los océanos es relativamente baja, siendo las algas verde-azules las responsables de la casi totalidad de la actividad fijadora. Se estima que una gran parte de la fijación marina, ocurre en los arrecifes de coral y en las áreas litorales, en asociación simbiótica con algunas plantas acuáticas.

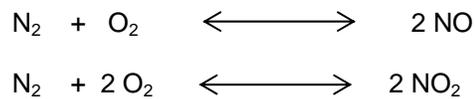
Las formas más comunes del nitrógeno del suelo que las plantas pueden utilizar directamente son el ion nitrito (NO_2^-), el ion nitrato (NO_3^-) y el ion amonio (NH_4^+). Estos compuestos del nitrógeno son asimilados por las plantas y entran en la cadena alimenticia heterotrófica, incorporándose en los procesos biológicos, transformándose en aminoácidos y proteínas. Cuando los compuestos orgánicos nitrogenados son degradados bioquímicamente, se forman compuestos inorgánicos (principalmente NH_3 / NH_4^+), los cuales son fácilmente asimilables por las plantas y por la mayoría de los microorganismos.

En presencia de oxígeno, un amplio grupo de procariotas que habitan en el suelo y las aguas dulces y marinas (ej. *Nitrosomonas sp.*, *Nitrobacter sp.*, *Nitrosococcus sp.*), obtienen su energía oxidando el NH_4^+ a través del proceso de **nitrificación**, produciendo nitrito y nitrato. El nitrato también es asimilado fácilmente por las plantas que lo vuelven a reducir a N^3 .

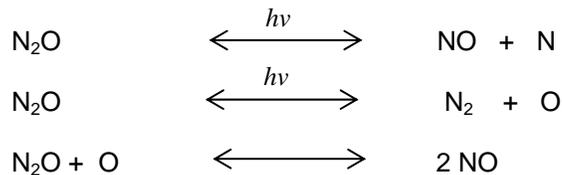
Muchos microorganismos poseen la capacidad de reducir los óxidos de N en condiciones anóxicas, donde dichos compuestos sustituyen al O_2 como aceptor terminal de electrones en la cadena respiratoria. Si la reducción continúa hasta la generación de gases de N_2 y N_2O , el proceso se denomina **desnitrificación**. Esta capacidad está difundida entre varios microorganismos que habitan en el suelo y el agua. Este proceso representa una vía a través de la cual el nitrógeno disponible en las aguas y el suelo, se pierde a la atmósfera. Estas pérdidas de N se suman a los óxidos de nitrógeno generados por la combustión de combustibles

fósiles, los que debido a su origen biológico, contienen N. Cabe destacar que más del 80% del nitrógeno que participa en las reacciones en la superficie terrestre y en los océanos, permanece reciclado y sólo el 20% se pierde a la atmósfera por denitrificación y evaporación. Es éste 20% el que se repone anualmente por fijación del N₂ atmosférico.

Además de estos procesos biológicos, el nitrógeno participa en reacciones químicas espontáneas que tienen lugar, principalmente, en la atmósfera. Aparte del N₂O suministrado a la atmósfera por las reacciones de desnitrificación y la combustión de materia orgánica nitrogenada, otros óxidos se generan por oxidación directa del N₂ a altas temperaturas (por ejemplo, debido a los relámpagos o durante la combustión de combustibles fósiles):



El N₂O es el más estable de los óxidos de nitrógeno y logra llegar a la estratósfera. Allí, la alta radiación UV es capaz de fotolizar dicha molécula y alrededor del 95% se transforma en N₂, mientras que el 5% pasa a NO. Este proceso ocurre a alturas superiores a 20 km. y las principales reacciones se pueden sintetizar:



El NO estratosférico es importante, ya que cataliza la descomposición del ozono en la alta estratósfera.

Finalmente, los óxidos gaseosos de nitrógeno, llamados comúnmente NO_x, sufren oxidación a nitrato, el cual es absorbido por el agua y cae a la superficie con la lluvia, reduciendo su pH.

Las principales reservas y flujos del ciclo de nitrógeno se muestran en las Tablas siguientes:

TABLA 2.6: RESERVAS DE NITRÓGENO

LUGAR	10 ⁹ ton N
Atmósfera, N ₂	3.800.000
Atmósfera, NO _x	1,30
Océano, en biomasa	0,50
Océano, en compuestos disueltos	300
Terrestre, en biomasa	3,50
Terrestre, total en sedimentos, orgánicos e inorgánicos	1.000.000

TABLA 2.7: FLUJOS DE NITRÓGENO

FLUJOS	10 ⁶ ton/año
NO _x a la atmósfera, desnitrificación	90
NO _x a la atmósfera, fuentes antrópicas	50
N ₂ a la atmósfera, desnitrificación	240
Deposición de NO ₃ ⁻ en tierra	70
Deposición de NO ₃ ⁻ en océanos	50
Fijación antrópica de N ₂ (fertilizantes sintéticos)	80
Fijación biológica de N ₂ en tierra	140
Fijación biológica de N ₂ en océanos	30
N fijado en sedimentos	10

2.5.5) Ciclo del Fósforo

Los compuestos de fósforo presentan, en general, baja solubilidad y volatilidad. La mayor reserva de fósforo se encuentra en las rocas y otros depósitos formados durante millones de años de evolución geológica. Dichos depósitos se han ido erosionando en forma gradual, liberando compuestos de fósforo, principalmente ortofosfatos (PO₄⁻³), hacia los ecosistemas. Una gran fracción de estos flujos de fosfato es lixiviada al mar, donde eventualmente se deposita en los sedimentos. Entre los compuestos inorgánicos típicos se encuentran: Ca₃(PO₄)₂, Al PO₄, Fe PO₄. Las reservas y flujos de fósforo en la naturaleza se presentan en las Tablas siguientes:

TABLA 2.8: RESERVAS DE FÓSFORO

LUGAR	10 ⁹ ton P
Fósforo en Suelos	200
Rocas de Fosfato	10-100
Fosfato en Océanos	120

TABLA 2.9: FLUJOS DE FÓSFORO

FLUJOS	10 ⁶ ton P / año
Fosfatos insolubles de ríos a océanos	20
Fosfatos solubles de ríos a océanos	1
Fósforo en partículas a la atmósfera	3,3
Fósforo en sedimentos marinos	22
Deposición de partículas sobre suelos	3,2
Deposición de partículas sobre océanos	1,4
Fósforo en aerosoles marinos	0,3

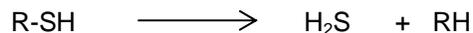
Como se puede ver, los flujos geoquímicos de este elemento, dependen de la transferencia de material suspendido desde los ríos al mar. No existen compuestos de fósforo en la composición de la atmósfera, por lo que ésta sólo participa como medio de transporte de partículas con contenido de fósforo, arrastradas por el viento.

El fósforo es un componente clave del protoplasma de los seres vivos. Tal como se menciona más adelante, el fósforo forma parte de las moléculas de ATP, ADP y AMP, que son fundamentales en la transferencia de energía celular, y de las moléculas de ADN y ARN, constituyentes del material genético de las células. Normalmente, el fósforo es el factor limitante en la fertilidad de los suelos y de los ecosistemas acuáticos. Su baja solubilidad limita su disponibilidad como nutriente.

En los lagos, los niveles de nitrato y de fosfato son bajos, constituyéndose en los nutrientes limitantes para el crecimiento de las algas fotosintéticas. Se requiere 1 átomo de fósforo por cada 12-20 átomos de nitrógeno, para sostener una actividad biológica balanceada. Las fuentes antrópicas de P provienen de los vertidos de efluentes domésticos e industriales. En particular, los altos consumos de detergentes fosfatados pueden generar eutrofización en aquellos cuerpos de agua donde el fósforo es el reactivo limitante.

2.5.6) Ciclo del Azufre

A diferencia del nitrógeno, el azufre tiene su principal reserva en la corteza terrestre, con una pequeña pero importante fracción en la atmósfera. Sin embargo, existe una fuerte analogía entre el ciclo del azufre y aquél del nitrógeno, con respecto al papel jugado por los microorganismos. Ambos elementos están presentes en los seres vivos en su forma química más reducida (es decir, N^{-3} y S^{-2} , formando grupos amino e hidrosulfuro, respectivamente). El azufre es un importante constituyente secundario de las proteínas, debido a su habilidad para formar enlaces S-S, lo que permite formar estructuras proteicas en gran escala y de formas tridimensionales especiales. Cuando la materia orgánica se descompone, el azufre proteico se transforma en H_2S :



El H_2S se genera principalmente en ambientes terrestres y en marismas, donde prevalecen condiciones anóxicas. Además, muchas especies de fitoplancton marino son capaces de producir dimetil sulfuro $((CH_3)_2S)$ y H_2S a partir de la reducción de sulfatos presentes.

Ambos compuestos son volátiles y sufren una rápida oxidación espontánea en la atmósfera, donde se transforman en SO_2 y, eventualmente, en sulfato ($SO_4^{=}$):



La oxidación de los sulfuros también puede ocurrir en el suelo, los sedimentos y en medio acuático, a partir de procesos biológicos (ej.: bacterias tiobacilares).

La utilización del sulfato en las reacciones biológicas involucra un acoplamiento con el ciclo del carbono, donde el sulfato actúa como aceptor de electrones. El sulfato, al igual que el nitrato y el fosfato, son la principal forma química que es reducida por los organismos autótrofos e incorporada a las proteínas.

El principal compuesto de azufre en la atmósfera es el SO_2 , proveniente de fuentes naturales y antrópicas. El dióxido de azufre es generado naturalmente durante las erupciones volcánicas y durante la combustión espontánea de biomasa forestal. Las principales fuentes antrópicas son los procesos de combustión de combustibles fósiles y la refinación de minerales sulfurados. Ello constituye un flujo que permite reciclar el azufre desde las profundidades de la tierra a la atmósfera y su eventual depositación como sulfato.

TABLA 2.10: RESERVAS DE AZUFRE

LUGAR	10^9 ton S
Rocas Sedimentarias	8.000.000
Atmósfera	0,004

TABLA 2.11: FLUJO DE AZUFRE

FLUJO	10^6 ton S/año
SO_2 a la atmósfera, origen antrópico	78
SO_2 a la atmósfera, origen natural	10
Sulfuros volátiles a la atmósfera	16
Sulfato a la atmósfera, fuente oceánica	140
Precipitación de sulfato atmosférico sobre los océanos	160
Precipitación de sulfato atmosférico sobre tierra	84

2.6) NUEVOS CONCEPTOS SOBRE LOS PROCESOS BIOGEOQUÍMICOS: LA HIPÓTESIS DE GAIA

En las secciones anteriores ha quedado de manifiesto que los seres vivos participan activamente de los ciclos geoquímicos. La naturaleza física y química de la materia inerte está en constante cambio gracias a la acción de organismos que devuelven al medio nuevos compuestos y fuentes de energía. Un buen ejemplo de como los seres vivos modifican el medio físico, son los atolones de Coral del Pacífico, donde la actividad de animales y vegetales resulta en la formación de islas enormes, a partir de los materiales disueltos en el mar.

En las últimas décadas, se ha planteado que las condiciones en la Tierra son apropiadas para la vida, debido a que los mismos seres vivos han tenido la capacidad de regular tales condiciones a los niveles óptimos para asegurar el desarrollo de la vida sobre el planeta. A comienzos de los años 70, el científico

británico James Lovelock y otros colaboradores, entre los que destaca la microbióloga Lynn Margulis, desarrolló tal hipótesis motivado por la intrigante constancia de la composición de la atmósfera terrestre, a pesar de las diferentes perturbaciones en los flujos energéticos y materiales que han ocurrido en los millones de años transcurridos. El hecho de que la composición atmosférica y el medio físico de la Tierra sean bastante diferentes de las condiciones de los otros planetas del sistema solar, condujo al planteamiento que sostiene que los seres vivos han evolucionado con el medio físico para lograr un complejo sistema de control que mantiene las condiciones sobre la tierra favorables para la vida. Tal hipótesis se denomina **Hipótesis de Gaia** (diosa griega de la Tierra).

Lovelock estudió la composición química de la atmósfera en sus aspectos químicos y termodinámicos. Concluyó que, para mantener constante el metano atmosférico (cuya concentración es del orden de 1,7 ppm) ante la presencia de 21% de O₂, se requiere un flujo de 10⁹ ton CH₄/año y un flujo de O₂ de 4×10⁹ ton O₂/año para oxidar el metano. Tales flujos son sólo posibles gracias a la actividad de los microorganismos. De acuerdo a estos científicos, casi todos los ciclos biogeoquímicos tienen un componente biológico fundamental. La participación de los microorganismos es parte integral de los mecanismos que regulan las condiciones de temperatura y pH que hay en la superficie terrestre. Según Lovelock, la continua actividad coordinada de las plantas y microorganismos permite reducir las fluctuaciones en composición, pH y temperatura que se producirían en ausencia de sistemas vivos altamente organizados.

Resulta interesante comparar las condiciones atmosféricas y de temperatura de Marte, Venus, la Tierra y una Tierra hipotética sin vida:

TABLA 2.12: COMPOSICIÓN ATMOSFÉRICA BAJO DIFERENTES CONDICIONES

COMPOSICIÓN ATMOSFÉRICA	MARTE	VENUS	TIERRA SIN VIDA (Hipotética)	TIERRA (Actual)
O ₂ en atmósfera	0,13%	trazas	trazas	21%
N ₂ en atmósfera	2,7%	1,9%	1,9%	79%
CO ₂ en atmósfera	95%	98%	98%	0,03%
Temperatura superficial °C	- 53	477	240-340	13

Se observa que la atmósfera de la Tierra inerte sería similar a la de Marte y Venus, con trazas de oxígeno. Más aún, las simulaciones demuestran que en esa Tierra inerte, el nitrógeno habría desaparecido de los mares, mientras que el metano, el hidrógeno y el amoníaco desaparecerían rápidamente. Las condiciones de la Tierra sin vida fueron estimadas de acuerdo al estado de equilibrio termodinámico que se lograría sin la intervención de los procesos biológicos.

En la Tierra viviente, tanto la atmósfera, como el suelo y los océanos, tienen composiciones químicas muy lejanas a las condiciones de equilibrio. En la

atmósfera coexisten compuestos altamente oxidantes como el O_2 y el CO , con compuestos altamente reductores como el CH_4 , el H_2 y el NH_3 , y compuestos de baja reactividad como el CO_2 y el N_2 . Los gases oxidantes y los reductores tienden a reaccionar rápidamente entre sí, de forma muy enérgica. La presencia de los procesos biológicos permite mantener una situación de estado estacionario, lejano de las condiciones de equilibrio termodinámico. En otras palabras, la biósfera gasta la energía necesaria para mantener el sistema Tierra en una situación altamente inestable, lejos de los valores esperados del equilibrio químico. Quienes sostienen la Hipótesis de Gaia concluyen que la atmósfera de la Tierra no llegó a su composición actual gracias a la interacción de procesos físicos y químicos. Muy por el contrario, desde un principio los organismos desempeñaron un papel determinante en el desarrollo y regulación de un ambiente geoquímico favorable.

Del estudio de los diferentes procesos biogeoquímicos y del rol de la vida en mantener las condiciones estacionarias, se concluye que:

El entorno de la superficie de la Tierra se puede considerar como un sistema dinámico, protegido contra las perturbaciones por eficaces mecanismos de retroalimentación.

Frente a esta hipótesis, surge entonces la pregunta:

¿Cuál es la función de cada gas en la atmósfera o de cada componente en el mar?

Las respuestas fluyen en la misma dirección de aquella que se obtendría de la pregunta: ¿Cuál es la función de la hemoglobina o de la insulina en la sangre?.

Lovelock plantea que el O_2 es el gas dominante, aunque no sea el más abundante, y establece el potencial químico del planeta. Hace posible la combustión y las reacciones de oxidación fundamentales para sostener los procesos vivientes. ¿Porqué este gas tan importante se ha mantenido a un nivel de 21% de la atmósfera, prácticamente constante por millones de años? ¿Está regulado por algún sistema cibernético? ¿Qué factores han determinado que el punto de referencia al cual se debe mantener es 21%?

Durante varios cientos de millones de años, el nivel de O_2 debe haber sido bastante cercano al nivel actual; de otra manera, los animales e insectos voladores más grandes, no habrían podido existir. Andrew Watson de la U. de Reading, Inglaterra, demostró empíricamente que una concentración de O_2 sobre 25% en la atmósfera habría significado la combustión espontánea de toda la biomasa forestal del planeta, ante la mínima chispa volcánica. Según Watson, la probabilidad de incendios forestales depende críticamente de la concentración de O_2 , y un simple aumento de 1% en su concentración atmosférica incrementa la probabilidad de incendios espontáneos al 60%. A un nivel de 25% de O_2 , hasta el detritus húmedo de un suelo tropical se incendiaría completamente con un relámpago. Bajo esas condiciones, una vez en llamas, las selvas se quemarían totalmente, tal como se quemaría toda la vegetación y material orgánico sobre la

superficie terrestre. El nivel actual de 21%, parece representar un saludable equilibrio entre el riesgo y el beneficio. Los incendios ocurren con una frecuencia aceptable frente a las ventajas que ofrece una energía de alto potencial. El metano parece jugar un papel importante en el proceso de regulación del nivel de O_2 en el aire, y su generación y oxidación proceden con suficiente rapidez, como para ser parte de un circuito de retroalimentación en el sistema de regulación del oxígeno. Tanto la generación de O_2 como de CH_4 son debidas, principalmente, a la acción de organismos vivos.

Otro aspecto interesante que la Hipótesis de Gaia ha enfrentado se refiere al control del clima en la Tierra. Se sabe que, desde los orígenes de nuestro planeta, el Sol se está calentando exponencialmente y lo seguirá haciendo por millones de años más. Sin embargo, la velocidad de aumento de la producción de energía solar es tal que ésta ha aumentado entre 30 y 50% desde que aparecieron las primeras formas de vida sobre la Tierra. Las estrellas tienen la propiedad de incrementar su producción de calor y luz, a medida que envejecen. Obviamente, el clima al inicio de la vida tenía que haber sido apropiado para el desarrollo de ésta, ni glacial, ni ardiente. Más aún, todo parece indicar que la temperatura de la superficie de la Tierra ha permanecido increíblemente constante desde tiempos remotos, cuando aparecieron las primeras formas de vida. Un aumento del 30% de la radiación solar habría resultado en una temperatura cercana al punto de ebullición del agua. Si la velocidad actual de aumento de la producción solar ha tenido lugar desde el comienzo de la vida ¿Porqué no estamos hirviendo ahora? Se ha propuesto que en tiempos remotos, la joven Tierra tenía suficiente amoníaco capaz de absorber la radiación solar infrarroja, actuando como una manta que mantenía caliente el planeta a pesar de que el Sol estaba más frío que hoy. Otros plantean que el alto contenido de CO_2 atmosférico en aquellos tiempos remotos tendría un efecto de calentamiento similar. El clima de la Tierra se encuentra en un estado estacionario, entre dos regímenes extremos: uno glacial, el otro hirviendo, y sin embargo, la temperatura permanece casi constante. ¿No es aquello una prueba de que los microorganismos juegan un papel regulatorio al actuar sobre la composición de los gases trazas de la atmósfera (es decir, CO_2 , NH_3 , N_2O , CH_4) para mantener el balance térmico, a pesar de los cambios experimentados en la producción de energía solar?.

La Hipótesis de Gaia, considera el entorno físico y la biósfera como sistemas altamente integrados.

El ser humano tiene una reciente aparición en este escenario, pero su impacto sobre el entorno físico ha sido significativo. Somos actualmente más de 5 mil millones de individuos, junto a una plétora de especies subordinadas, que conforman los ganados y cultivos que requerimos para sobrevivir. Ello implica un creciente consumo de los recursos materiales y energéticos de la Tierra. Estamos incidiendo directamente en los ciclos biogeoquímicos, tal vez con impactos a nivel global, como lo sería la degradación de la capa de ozono y el incremento de la concentración de los gases invernadero. Si el impacto de la actividad humana sigue creciendo en intensidad y profundidad, se pueden generar nuevos fenómenos que minimicen el cambio, y se logre un nuevo nivel estacionario, cuyas condiciones ambientales podrían ser inapropiadas para la supervivencia del ser

humano.

La capacidad de autorregulación de la Tierra se demuestra al considerar que, aproximadamente cada 100 millones de años, ella recibe el impacto de enormes cuerpos celestes viajando a 70.000 km/h. La energía cinética de esos cuerpos es equivalente a la detonación de una veintena de bombas atómicas (similares a aquella lanzada en Hiroshima) por cada kilómetro cuadrado, si ella se distribuyera uniformemente por toda la Tierra. Se cree que hace 65 millones de años, uno de estos impactos causó la extinción de más del 60% de las especies que habitaban el planeta. Y sin embargo, el desarrollo de la vida continuó, amparado en las simples bacterias que siguen ordenando exitosamente la atmósfera terrestre, como lo han hecho por casi 2 mil millones de años. La Hipótesis de Gaia implica que la Tierra es un sistema cibernético natural, y debemos preservar los controles que permiten a la biósfera mantener condiciones ambientales estacionarias.

Por lo tanto, además de esforzarnos por reducir nuestro impacto sobre los ciclos biogeoquímicos, minimizando las emisiones de SO_2 , NO_x , CO_2 , CFC y otros contaminantes, debemos preservar la integridad del sistema de control regulatorio que hace posible la vida sobre la Tierra. Para ello, debemos descubrir cuales son los componentes que constituyen tal sistema de regulación planetaria. Un mamífero puede seguir viviendo si se le extirpa una mano, un brazo o unos cuantos dientes, pero morirá instantáneamente si se le extirpa el corazón, el cerebro, u otro órgano vital.

Tendremos que esperar que los avances en las ciencias fundamentales y aplicadas permitirán en un plazo no muy lejano, responder a las preguntas que nacen naturalmente de la hipótesis Gaia:

- 1.- ¿Cuáles son los órganos vitales de nuestra Tierra?
- 2.- ¿Cuáles son los sensores que permiten detectar las variaciones de temperatura y composición química en la atmósfera, las aguas y el suelo?
- 3.- ¿Cuáles son los mecanismos de transmisión de esta información a nivel planetario?, etc.

Para quienes deseen profundizar este tema, recomiendo el excelente texto de L.E. Joseph "GAIA: La Tierra Viviente", donde se presentan en forma sencilla, pero rigurosa, las recientes contribuciones en torno a esta interesante hipótesis. Obviamente, la publicación original de J. Lovelock es una lectura obligada.

En las secciones anteriores, ha quedado claramente demostrada la importancia del mundo microbiológico en el funcionamiento de la biósfera. Es el momento de hacer una pausa y revisar algunos conceptos de microbiología. En la próxima sección se resumirán aquellos fundamentos que nos permitan entender los procesos biológicos, dentro del contexto de la ingeniería ambiental.

2.7) ALGUNOS CONCEPTOS BÁSICOS DE MICROBIOLOGÍA

La importancia de los microorganismos en el funcionamiento de los procesos naturales, ha sido señalada en párrafos anteriores. Desde que en 1675 Leeuwenhoek descubrió el mundo de los microorganismos, hasta la actualidad, se ha logrado comprender el funcionamiento de estos seres microscópicos, y utilizarlos para el beneficio del Hombre, tanto en el control de enfermedades, como en los procesos productivos. El mundo microscópico está compuesto de varios grupos distintos de organismos, que habitan en el suelo, el agua y el aire. Por ejemplo, el suelo fértil contiene una gran variedad de bacterias, así como de hongos, algas, protozoos y virus, que pueden alcanzar un total de mil millones de microorganismos por gramo de suelo.

La mayoría de los microorganismos son unicelulares, es decir, están compuestos de una sola célula. Algunos tienen características de células vegetales, otros de células animales, y otros con características mixtas. Una importante característica que diferencia a unos microorganismos de otros, es la organización de su material celular. A continuación se presenta una clasificación de los diferentes tipos de microorganismos, su estructura celular, y algunos conceptos de la química celular.

2.7.1) Tipos de Microorganismos

En términos generales, los organismos vivos se pueden dividir en:

- Animales (heterótrofos).
- Vegetales (autótrofos).

Entre las formas evolutivamente superiores de vida, es posible distinguir claramente estos dos grandes Reinos. Pero muchas especies y variedades de los organismos inferiores, tales como bacterias, hongos, algas y protozoos más primitivos, no son tan especializadas. Existe una enorme y compleja interfase de seres con propiedades vegetales (ej.: algas verdes), con propiedades animales (ej.: protozoos) y mixtos (ej.: hongos). En la actualidad, algunos biólogos reconocen 5 reinos: Monera, Protista, Fungi, Animales y Plantas. El Reino Protista contiene a los organismos microscópicos: las bacterias, los protozoos y las algas.

Todos los organismos vivos poseen las siguientes características comunes:

- Capacidad de reproducción.
- Capacidad para consumir o asimilar nutrientes y transformarlos químicamente (metabolizarlos) para obtener energía y crecer.
- Capacidad para excretar los productos de desecho y disipar la energía residual.
- Capacidad para reaccionar frente a cambios en el entorno (irritabilidad).
- Susceptibilidad a la mutación.

La unidad estructural básica de los seres vivos es la **célula**. En los seres unicelulares, la célula es el organismo propiamente tal, mientras que en los seres pluricelulares las células están integradas en un sistema o conjunto de sistemas que

forman el organismo vivo.

En el mundo microbiológico se encuentran organismos que están en la frontera entre lo inerte y lo vivo, como es el caso de los virus. Los virus son parásitos obligados que no pueden multiplicarse fuera de una célula anfitriona apropiada. Sin embargo, cuando un virus penetra en una célula viva, es capaz de crear cientos de partículas de virus idénticas, utilizando la energía y la maquinaria bioquímica de la célula anfitriona. Un virus es una entidad mucho más sencilla que una célula, formado por material genético (ácidos nucleicos) y proteínas, con tamaños que varían entre 10 y 300 nm de longitud.

La microscopía electrónica, en los años 50, permitió descubrir las enormes diferencias entre las células bacterianas y la estructura interna de otras células. Las células bacterianas contienen solamente citoplasma, rodeado de una membrana citoplasmática semipermeable. El citoplasma contiene material nuclear, el cual no está rodeado de ninguna membrana. Los organismos que tienen estas propiedades se denominan **Procariotas**.

Con la excepción de las bacterias, todas las otras células contienen estructuras internas complejas y bien diferenciadas (orgánulos), rodeadas por membranas. Dichas membranas se parecen a las membranas que rodean a la célula misma. Los orgánulos típicos incluyen el núcleo, la mitocondria, los ribosomas y el aparato de Golgi. Dentro del núcleo, el material genético celular está organizado en estructuras reconocibles llamadas cromosomas. Estas células se llaman **Eucariotas**.

Células Procariotas

Las células procariotas son las células más sencillas, en cuanto a estructura, y se cree que ellas fueron las primeras formas de vida en la Tierra. Las principales características de estas células son:

- No poseen membranas internas que separen el núcleo del citoplasma, ni hay estructuras o corpúsculos rodeados de membranas al interior de la célula.
- La división celular es asexual, normalmente por simple fisión.
- La pared celular contiene moléculas mucopéptidas que le dan rigidez estructural.

El citoplasma y su contenido están rodeados por una membrana citoplasmática que controla el paso de los materiales hacia y desde el interior. La membrana citoplasmática está rodeada por la pared celular rígida, que le otorga una cubierta protectora. Dentro del área citoplasmática se distinguen las siguientes sustancias:

- **Ribosomas:** Pequeñas partículas compuestas de proteínas y ARN (ácidos ribonucleicos) que participan en la síntesis de nuevas proteínas.
- **Gránulos:** Son depósitos de varios compuestos químicos que pueden servir de materia prima en los procesos metabólicos.
- **Material nuclear:** Son filamentos de ADN (ácido desoxirribonucleico), portador de la información genética.
- **Mesosomas:** Son repliegues de la membrana citoplasmática.

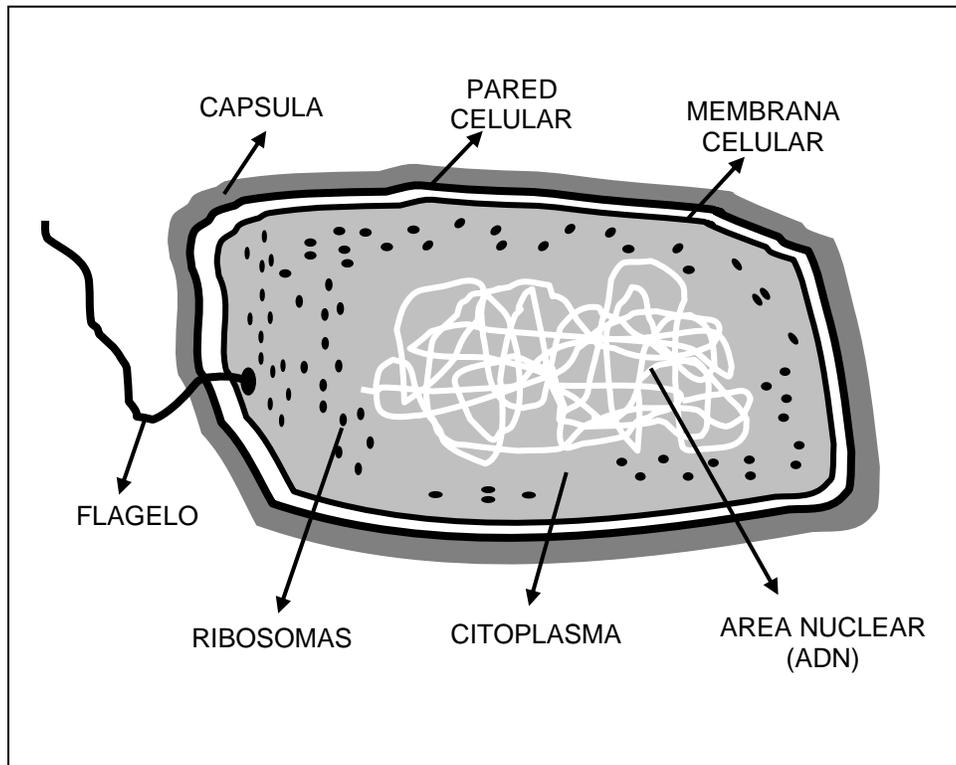


FIGURA 2.5: REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE UNA BACTERIA

Las bacterias y las cianobacterias son los principales miembros de los protistas procarióticos. Existen miles de diferentes tipos y sus características más generales se presentan a continuación:

- Bacterias:** Son las células procariotas típicas. Son unicelulares, carentes de estructuras internas rodeadas de membranas dentro del citoplasma (Figura 2.5). Se reproducen asexualmente con tiempos de duplicación que pueden ser tan cortos como 15-20 minutos o algunas horas, dependiendo del tipo de bacteria, de la disponibilidad de nutrientes, del pH y la temperatura. Un cultivo de laboratorio típico puede mostrar una población del orden de 10 mil millones de bacterias por mililitro, en menos de 24 horas de crecimiento. Tienen pequeño tamaño (0,2-1,5 μm de diámetro 1,5-2,5 μm de longitud). Las bacterias aisladas pueden presentar una morfología esférica (ej.: *Coccus sp.*), tubular recto (*Pseudomonas sp*, *Escherichia sp*, *Salmonella sp*), tubular curvo (ej.: *Vibrio cholera*), o espiral (ej.: diarrea)). Algunas bacterias poseen colitas (i.e., flagelos), para otorgarle movilidad (normalmente, bacterias tubulares capaces de desplazarse a una velocidad de 1-10 cm/h). Otras, presentan vellosidades o *pili*, cuya función es permitir la adherencia a otras bacterias similares (ej.: durante la floculación) o participar en la transferencia de ADN entre dos bacterias. También existen otras

que están rodeadas de una cápsula extracelular o capa de material polisacárido, que les permite formar grandes agregados celulares. Debido a su menor complejidad, algunas bacterias pueden crecer a temperaturas extremas, incluso cercanas a 0°C o a 90°C. Juegan un importante papel en los ciclos biogeoquímicos, ya que son capaces de descomponer los compuestos orgánicos depositados en la tierra y el mar. Muchas de ellas participan en la fijación de N₂ y en la generación de CH₄ y H₂S. Tienen una gran importancia para el hombre, ya que forman parte de muchos procesos industriales, y son el principal componente de la comunidad microbiana en el tratamiento biológico de efluentes. Sin embargo, muchas bacterias son causa de enfermedad y muerte para los animales y las plantas.

- **Cianobacterias:** Son células procarióticas fotosintéticas, que contienen clorofila y otros pigmentos. Son ligeramente más grandes que las bacterias, aunque comparten las mismas características en cuanto a morfología. Se pueden reproducir por fisión binaria simple, por fisión múltiple o mediante la liberación de células especializadas llamadas *esporas*.

Células Eucariotas

Son estructuralmente más complejas que las procariotas. Los principales componentes de una célula eucariota son:

- **Retículo endoplasmático:** Éste es un complejo sistema de membranas que se extiende por todo el citoplasma, dividiéndolo en estructuras o sitios de actividad bioquímica. Sirve de barrera entre los diferentes orgánulos y proporciona canales que dirigen el flujo de materiales dentro de la célula. Además, proporciona una superficie firme para la alineación de los ribosomas durante la síntesis de proteínas.
- **Núcleo:** Es la principal localización del material genético y funciona como centro de control de la célula. Consta de ADN en forma de cromosomas, de ARN y de proteínas, y está rodeado por una envoltura nuclear.
- **Aparato de Golgi:** Es una estructura localizada en la región del retículo endoplasmático. Es el sitio de síntesis de nuevo material para la pared celular, y empaqueta y transporta proteínas y polisacáridos al exterior de la célula.
- **Mitochondrias:** Funcionan como los sitios principales de producción de energía en procesos celulares.

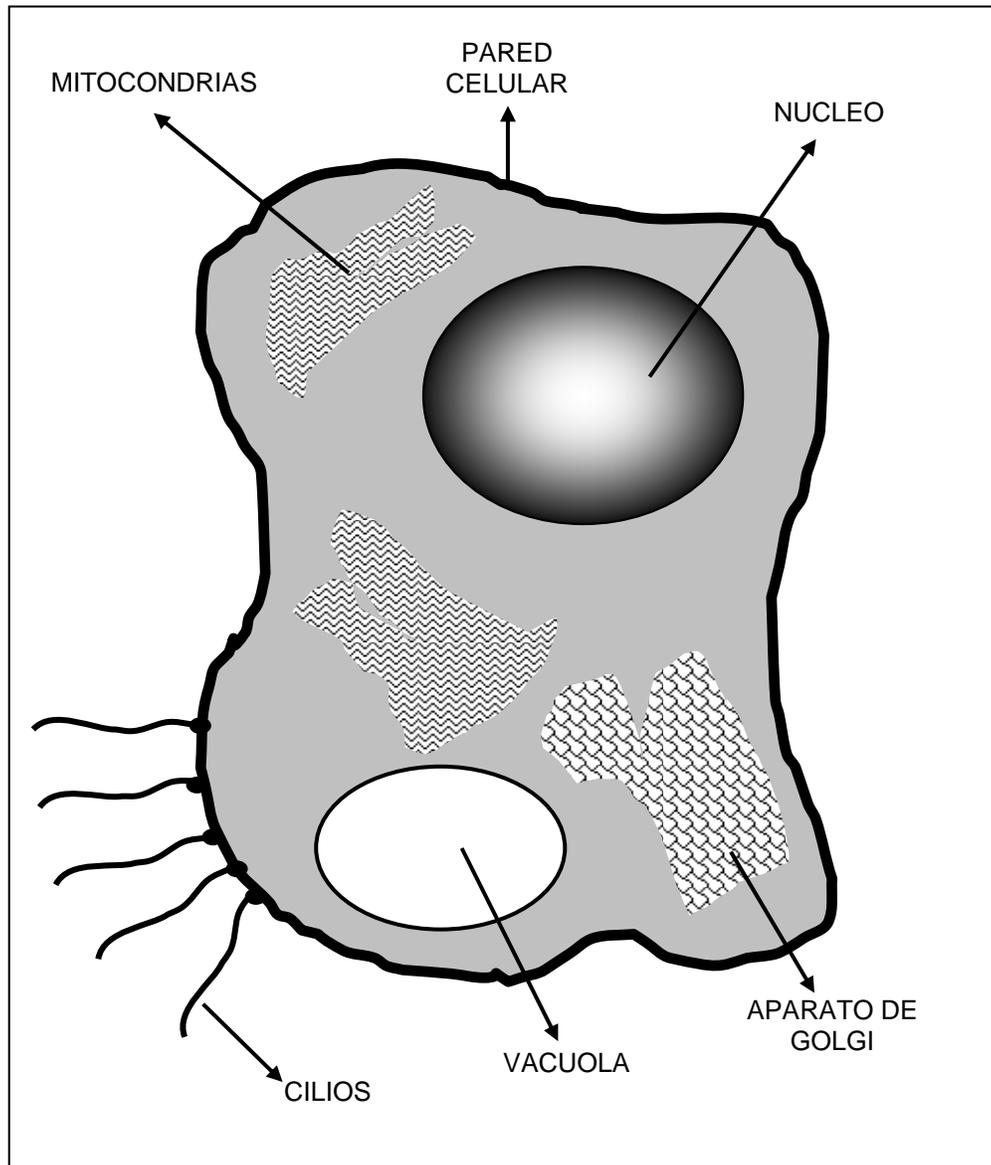


FIGURA 2.6: REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE UNA CÉLULA EUCARIOTICA

- **Cloroplastos:** Son los orgánulos de las células vegetales que contienen clorofila y en los que tiene lugar la fotosíntesis.
- **Vacuola:** Es un espacio limitado por una membrana dentro del citoplasma que contiene soluciones diluidas de varios compuestos.
- **Microtúbulos y microfilamentos:** Son estructuras muy finas que mantienen la forma de la célula y promueven el movimiento ordenado de los componentes dentro de los orgánulos.
- **Paredes celulares:** Algunas células poseen un recubrimiento externo de la membrana citoplasmática, compuesto por microfibrilas que le dan rigidez a la pared celular.

Los hongos, los protozoos y las algas son organismos eucariotas. Cada uno de estos grupos de organismos representa en sí mismo, todo mundo complejo y variado. Las principales características de estos eucariotas son las siguientes:

- **Hongos:** Son organismos que carecen de clorofila y poseen paredes celulares rígidas. Algunos son unicelulares, mientras que otros son policelulares, con cierta diferenciación en su estructura. Varían de tamaño y forma, desde las levaduras microscópicas unicelulares (1-5 μm de ancho, 5-30 μm de longitud), hasta los hongos macroscópicos filamentosos (mohos). Pueden llegar a formar estructuras macroscópicas como los hongos policelulares (setas). Se reproducen mediante una variedad de métodos, tanto asexuales como sexuales. En la reproducción asexual por fisión, una célula se divide para formar dos células hijas iguales. En la reproducción sexual, se funden los núcleos de dos células.

Los hongos filamentosos constan de micelios y esporas. El micelio es un complejo de varios filamentos (llamados hifas) en cuyo interior hay un citoplasma común. Algunos micelios penetran en el medio con el fin de obtener nutrientes para su metabolismo, mientras que otros son productores de esporas y se proyectan hacia el exterior. La mayoría de las partes de un hongo filamentosos, son potencialmente capaces de crecer y multiplicarse. Los hongos pueden soportar un medio ambiente desfavorable mejor que la mayoría de los otros organismos, sobreviviendo en condiciones extremas de pH. Las levaduras pueden desarrollarse tanto en ausencia como en presencia de oxígeno, mientras que los filamentosos son estrictamente aeróbicos. Los hongos se encuentran presentes en medios acuáticos y suelos. Existe una gran variedad de hongos saprófitos (se alimentan de materia orgánica muerta), los que descomponen las estructuras químicas complejas, reciclando así los nutrientes en el ambiente.

- **Protozoos:** Son organismos eucariotas que tienen una mayor diversidad en formas y modos de vida. Se conocen más de 64.000 especies de protozoos. En general, son unicelulares, carentes de clorofila y con capacidad móvil (lo que sirve como base para su clasificación). Su tamaño va desde 1 μm hasta unas décimas de milímetro. Tienen una variedad de maneras de alimentarse: a partir de material orgánico disuelto (compitiendo con las bacterias), o no disuelto (digerido enzimáticamente dentro de una vacuola); por ejemplo: las amebas. Algunos son carnívoros, depredadores, y se alimentan de otros organismos de menor tamaño como, por ejemplo, de bacterias y algas. Estas características le confieren a los

protozoos un importante papel en la cadena trófica de las comunidades acuáticas, ya que son tanto consumidores primarios como secundarios.

Los protozoos se pueden reproducir asexual y sexualmente. Los protozoos ciliados se reproducen sexualmente a través de la conjugación donde se produce la unión física de dos individuos durante la que se intercambia material nuclear. Existen protozoos de vida libre que se encuentran en ambientes acuáticos, suelos y materia orgánica en descomposición, mientras otros llevan una existencia parasitaria.

- **Algas:** Son células eucariotas fotosintéticas y forman un gran grupo heterogéneo que habita en las aguas. La principal diferencia entre las algas y los otros Protistas, es su habilidad de producir energía a partir de la fotosíntesis, usando la clorofila como su aparato recolector de luz, utilizando el CO₂ y generando O₂ como subproducto. Por otra parte, sus resultados nutricionales permiten acumular el material orgánico, a diferencia de los otros Protistas que lo degradan. Su tamaño oscila desde 5 μm hasta 30 m de longitud. Las algas microscópicas son en su mayoría unicelulares y la reproducción es principalmente por fisión asexual. Las algas crecen abundantemente en agua dulce y marina, así como en el suelo.

Los Virus

Son las entidades biológicas más pequeñas, que tienen la propiedad de autoreplicarse, utilizando los mecanismos reproductores de un microorganismo anfitrión. Las partículas de virus fuera de la célula anfitriona, no poseen ninguna actividad metabólica y son incapaces de reproducirse. Los virus están ampliamente distribuidos en la naturaleza, hospedándose tanto en bacterias como en células animales y vegetales.

Los virus que infectan a las bacterias, o *fagos*, se conocen desde principios de este siglo. Los virus bacterianos poseen una cola, a través de la cual, inoculan el ácido nucleico vírico en el interior de la célula hospedadora, tal como se aprecia en la Figura 2.7. Hay dos tipos de virus bacterianos: *líticos* (o *virulentos*) y *moderados* (o *avirulentos*). Cuando los fagos líticos infectan las células, éstas responden produciendo un gran número de virus nuevos y, al final del período de incubación, la célula hospedadora estalla liberando nuevos fagos para infectar otras células receptoras. En el caso de los virus moderados, no se produce lisis de la célula, sino que el virus se reproduce de una generación a otra, pudiendo transformarse en virulento, en forma espontánea. La reproducción de un bacteriofago, comienza con la adsorción de éste sobre la pared de la bacteria hospedadora, utilizando el extremo de la cola, como se ilustra esquemáticamente en la Figura 2.8. La fijación suele ser específica, en cuanto a que ciertos virus y bacterias poseen configuraciones moleculares complementarias en sitios receptores apropiados. Luego de la fijación, el ácido nucleico penetra en la bacteria, gracias a la acción mecánica de la vaina contractil, en combinación con la acción lítica de una enzima (es decir, lisozima) que se encuentra en la cola del fago y que digiere la pared celular. Tanto la cubierta de proteína que constituye la cabeza del fago, como la estructura de la cola del virus, permanecen fuera de la célula. Así, el virus inyecta su ADN como una jeringa inyecta

una vacuna.

Los virus animales y vegetales, o *viriones*, tienen una composición y forma de acción similares a los bacteriofagos. Están compuestos de una masa central de ácido nucleico rodeada por una cápsula, y su forma varía de tipo en tipo, encontrándose formas icosaédricas, helicoidales u otras. El virión se fija a una célula anfitriona susceptible, en sitios específicos, a la que luego penetra liberando su material genético, y permitiendo la biosíntesis de nuevos viriones. Las células hospedadoras que están infectadas con virus pueden no presentar ningún síntoma, o formar cuerpos de inclusión, o ser afectadas por cambios genéticos, o ser totalmente destruidas después de reproducir al virus. Los virus son una de las principales causas de enfermedades fatales provocadas por microorganismos en los mamíferos. Algunas enfermedades virales que afectan el sistema neurológico pueden presentar períodos de incubación muy lentos, de meses o incluso años. En la actualidad, la virología es una de las áreas de investigación más dinámicas y se constatan permanentes avances al respecto.

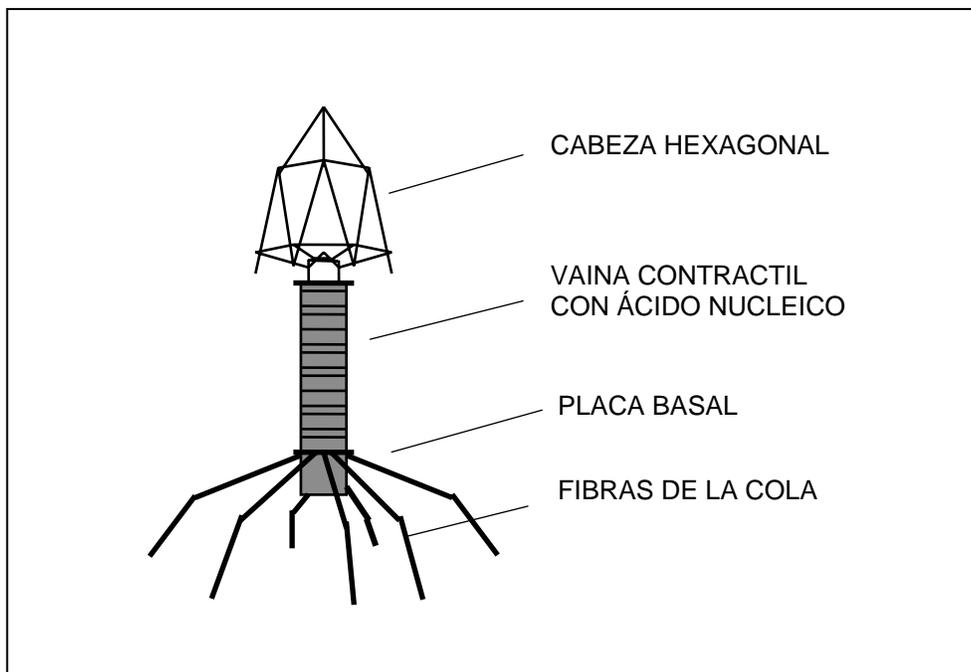


FIGURA 2.7: REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE UN VIRUS BACTERIANO

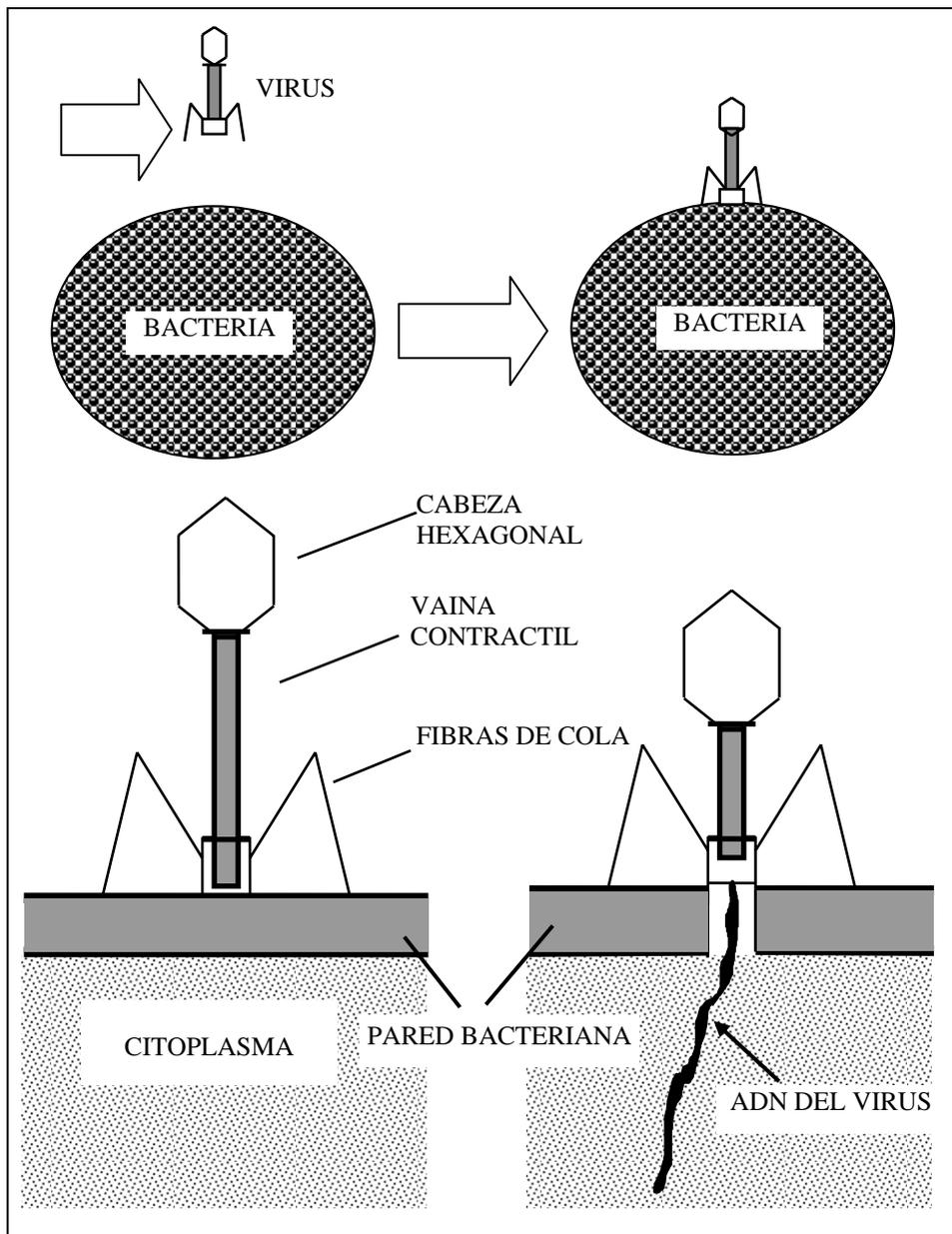


FIGURA 2.8: INFECCIÓN VIRAL DE UNA BACTERIA

Los microorganismos descritos en los párrafos anteriores conforman una amplia variedad de especies, cada una con sus respectivas particularidades para adaptarse y explotar las condiciones del entorno, en una clara ilustración del complejo enigma de la vida. Resulta aún más enigmático constatar en la Naturaleza ejemplos de relación simbiótica entre algunas especies. Tal es el caso de los líquenes que crecen sobre las rocas y las cortezas de los árboles, u otros soportes no aptos para el crecimiento de las plantas. Los líquenes son conjuntos que constan de un organismo fotosintético y de un hongo que crecen juntos, en una vida en común de beneficio mutuo. Están formados por una capa de un micelio fungal fuertemente entretejido, bajo la cual hay una capa de células fotosintéticas, y debajo de ésta hay otra capa fungal. La capa inferior puede fijarse directamente al soporte, o bien, mediante estructuras de anclaje especiales. Aparentemente, el alga o cianobacteria proporciona al hongo los carbohidratos producidos por fotosíntesis. A su vez, el hongo absorbe, almacena y suministra el agua y los nutrientes requeridos por el socio fotosintético, además de proporcionarle apoyo y protección. El hongo es capaz de nutrirse a partir de su socio, por medio de delicadas proyecciones radiculares que penetran la célula fotosintética. Un bello ejemplo de que la cooperación entre especies puede hacer viable la existencia de ellas en un medio adverso....

Cabe preguntarse cuáles son los fenómenos que permiten el funcionamiento de estas pequeñas estructuras vivientes. ¿Cómo se reproducen y se alimentan? ¿De dónde obtienen la energía? ¿Cuáles son las reacciones químicas fundamentales de la vida? La próxima estación en nuestro fugaz viaje por los dominios de la célula, nos entregará algunos conceptos básicos para intentar responder a tales preguntas.

2.7.2) La Química de la Vida

Los procesos bioquímicos que tienen lugar al interior de las células son extremadamente complejos. En esta sección revisaremos algunos conceptos básicos sobre la naturaleza de las principales reacciones químicas que tienen lugar al interior de la célula, poniendo énfasis en las necesidades nutricionales y energéticas. Resulta obvio comenzar con los compuestos más importantes en los seres vivos: las enzimas.

a) Enzimas microbiales

La química celular es muy compleja e involucra aspectos de química, bioquímica, enzimología y genética, entre otros. En su aspecto más fundamental, las actividades celulares se realizan gracias a la acción coordinada de las enzimas. Estas sustancias están presentes en pequeñas cantidades y actúan como catalizadores biológicos altamente específicos en las diversas reacciones que tienen lugar en la célula viva. Sin las enzimas, la vida no puede existir.

En cada célula hay miles de enzimas diferentes, con pesos moleculares que van de 10.000 a 1.000.000 Daltons. Todas las enzimas son producidas al interior de la célula y la mayoría de ellas actúan intracelularmente. Por otra parte, algunas enzimas son excretadas al ambiente extracelular, para modificar los nutrientes potenciales y permitir su transporte al interior. Por ejemplo, las amilasas permiten degradar los almidones a moléculas de azúcar más pequeñas y de fácil absorción.

Las enzimas intracelulares sintetizan material celular, y también degradan compuestos para suministrar los requerimientos energéticos de la célula. Las características de las enzimas y su mecanismo de acción es el mismo, independientemente de si ellas se encuentran en una célula microbiana, humana u otro ser vivo.

Las enzimas están formadas por proteínas. En algunos casos, requieren unirse a otra molécula orgánica de menor tamaño, llamada coenzima, para lograr actividad catalítica. A veces, el grupo no proteico de una enzima es un ion metálico, denominado cofactor; por ejemplo, Mg^{+2} , Mn^{+2} , Fe^{+2} , Zn^{+2} , etc. Cada enzima tiene un rango estrecho de pH y T en el cual puede operar. Algunas son activas en medio ácido, y otras en medio alcalino o neutro.

La alta especificidad de las enzimas implica que para cada substrato se requiere un tipo específico de enzima. Algunas de las reacciones enzimáticas de interés son las siguientes:

- **Reacciones de Síntesis:** La síntesis de material celular, tanto para mantención como para la formación de células nuevas, es catalizada por enzimas intracelulares. Se requiere una gran variedad de enzimas para sintetizar los diferentes compuestos orgánicos presentes en las células. A su vez, dichas enzimas deben ser producidas por la célula, en un complejo proceso de síntesis de proteínas. Las reacciones de síntesis utilizan gran parte de la energía disponible.
- **Reacciones Oxidativas:** Las reacciones que proveen energía para mantención y crecimiento son catalizadas por enzimas intracelulares. Ellas involucran reacciones de oxidación y reducción, donde la adición o eliminación de oxígeno e hidrógeno son de primordial importancia. La mayoría de los organismos oxida los nutrientes a partir de la eliminación enzimática del hidrógeno. Las enzimas dehidrogenazas remueven el hidrógeno de los compuestos y lo transfieren a otro sistema enzimático, hasta que finalmente es usado para reducir un aceptor de hidrógeno. Éste está determinado por la naturaleza aeróbica o anaeróbica del medio y el tipo de célula. En el sistema aeróbico, el oxígeno es el aceptor de hidrógeno y se forma agua. En el caso anaeróbico, el hidrógeno reacciona con un compuesto oxidado produciendo un compuesto reducido. Durante la oxidación se libera energía, mientras que en las reacciones de reducción se consume energía. Ya que se produce más energía que la que se consume, queda disponible un remanente energético que es usado por la célula.
- **Reacciones Hidrolíticas:** Hidrolizan sustancias insolubles complejas y las transforman en componentes solubles simples, que pueden pasar a través de la membrana celular por difusión. Son generalmente excretadas por el organismo al medio extracelular (enzimas extracelulares). Otras enzimas líticas, como por ejemplo las enzimas proteolíticas altamente específicas, pueden existir intracelularmente cuando se requiera destruir enzimas que ya no son necesarias.

La célula viva sintetiza y degrada distintos materiales según sus requerimientos metabólicos. Ello hace necesario un control preciso de las múltiples reacciones enzimáticas. La actividad enzimática se puede regular, ya sea a través de un control directo de la acción catalítica, o de un control genético. En el primer caso, el control se ejerce por alteración de las concentraciones de sustrato o de sustancias que reaccionan. En el caso de control genético, se requiere una sustancia inductora de bajo peso molecular, ya sea el sustrato u otro compuesto asociado, para que tenga lugar la síntesis de la enzima. La detención de éste proceso de síntesis se logra cuando otras sustancias de bajo peso molecular, ya sean los productos de la reacción enzimática o sustancias relacionadas, actúan reprimiendo la formación de más enzima. Esto implica complejos mecanismos de transmisión de información a nivel genético, algunos de cuyos conceptos se revisan a continuación.

b) Genética Celular

El ADN es la sustancia química responsable de la transmisión de la información genética y constituye el *cromosoma* de las células. En su estructura está codificada la información para la síntesis de todas las proteínas celulares, en segmentos discretos de ADN llamados *genes* . Esta información se transmite de célula a célula por *replicación* del ADN. Otro tipo de ácido nucleico, el ARN, actúa ejecutando la información codificada en el ADN para la síntesis de proteínas, a través de la *transcripción* y la *traducción* .

El ADN es una macromolécula compuesta de dos cadenas, cada una enroscada en torno a la otra en forma de una doble helicoidal. Cada cadena está compuesta de *nucleótidos* unidos entre sí, formando un polinucleótido. Cada nucleótido consta de un anillo nitrogenado (purina o pirimidina), una pentosa (desoxirribosa) y una molécula de fosfato, los que se encuentran unidos entre sí, formando una secuencia de base nitrogenada-desoxirribosa-fosfato. En el ADN se encuentran dos clases de purinas: adenina y guanina, y dos clases de pirimidinas: citosina y timina. Las diferentes combinaciones de estas bases dan origen a cuatro clases de nucleótidos, según sea la base nitrogenada presente. La forma como estas unidades se ordenan en la molécula de ADN determina su estructura y la naturaleza de la información genética codificada. Se ha calculado que el cromosoma bacteriano tiene capacidad para codificar aproximadamente 300 proteínas diferentes. El ARN difiere del ADN en que usualmente tiene una sola cadena y el componente azucarado es la ribosa en vez de la desoxirribosa; además, en vez de timina posee otra base nitrogenada llamada uracilo.

El cromosoma de una bacteria típica es una molécula circular de ADN que tiene un peso molecular del orden de 2500 millones de Daltons. Si el cromosoma se extendiese en forma lineal, mediría aproximadamente 1,25 mm, lo que es cientos de veces más largo que la célula que lo contiene. Para replicar estas macromoléculas, se requiere contar con los correspondientes nucleótidos al interior de la célula. En algunos casos, tales nucleótidos deben ser aportados a la célula ya formados, por ejemplo, a partir de la descomposición de organismos muertos. En otros casos, deben ser sintetizados a partir de nutrientes simples, tales como glucosa, sulfato de amonio y sales minerales. La conversión de nutrientes simples a nucleótidos, para la síntesis de ADN, implica una serie de reacciones muy complejas, varias de las cuales

utilizan energía en forma de ATP, tal como se menciona más adelante. La replicación del ADN comienza en un sitio específico del cromosoma bacteriano y el proceso es catalizado por varias enzimas polimerasas y ligasas.

Para sintetizar las proteínas, se debe contar con sus correspondientes aminoácidos. Los aminoácidos son moléculas orgánicas que contienen grupos ácidos (-R-COOH) y grupos básicos (-R-NH₂). Existen 20 clases de aminoácidos, que se combinan generando una amplísima gama de estructuras proteicas. Cada tipo de proteína celular, tiene una secuencia específica de aminoácidos unidos por enlaces péptidos, formando una estructura tridimensional definida. La síntesis de proteínas tiene lugar en los ribosomas, que son grandes partículas de ARN-proteína que se encuentran en el citoplasma de la célula bacteriana. En las células eucarióticas, los ribosomas están unidos al retículo endoplasmático. Antes de llevar a cabo la síntesis de la proteína, la información codificada del ADN debe ser transferida hacia los ribosomas, mediante una substancia conocida como mRNA (ácido ribonucleico mensajero), en un proceso que implica "transcribir" la información genética en dicha substancia. Este proceso de transcripción es catalizado por la enzima ARN polimerasa. Posteriormente, dicha información genética se "traduce" en el proceso de síntesis de la proteína, donde se indica la secuencia exacta de aminoácidos que la componen. Cada aminoácido de esa secuencia se especifica de acuerdo al ordenamiento y tipo de bases nitrogenadas que conforman los nucleótidos de mRNA.

Una vez que los aminoácidos han sido fabricados, estos son activados utilizando una enzima activadora específica, que se liga al aminoácido correspondiente. En seguida, éste conjunto se une a una molécula llamada ARN de transferencia (tARN), resultando en el transporte del aminoácido hacia el mRNA que está unido en la superficie del ribosoma, dando comienzo al ensamblaje de los diferentes aminoácidos, hasta formar la proteína requerida.

Todas las células están expuestas a sufrir cambios en la secuencia de nucleótidos de un gen, dando origen a una nueva característica genética. Estas mutaciones son acontecimientos que ocurren al azar, espontáneamente, a un ritmo de una mutación por cada millón de células o más. Así, en un cultivo celular las células que han incorporado una mutación existirán en conjunto con las que poseen las características genéticas originales. Tales mutaciones suelen ocurrir durante la replicación del ADN, en el proceso de reproducción celular. Las mutaciones pueden ocurrir debido a daños producidos por radiación UV de la luz solar u otra radiación ionizante, o a la presencia de productos químicos mutagénicos. Algunos de estos compuestos mutagénicos reaccionan directamente con los grupos amino o hidroxilo del ADN, mientras que otros compuestos pueden incluso llegar a substituir las bases del ADN durante la etapa de replicación, introduciendo errores que dan como resultado mutaciones. Afortunadamente, las células tienen enzimas específicas que pueden intentar reparar el ADN dañado, protegiendo las características genéticas originales.

Las mutaciones pueden dar origen a cambios importantes en las características de la célula afectada. Por ejemplo, las mutaciones pueden:

- Incrementar la tolerancia a agentes inhibidores, tales como antibióticos.

- Incrementar la resistencia a condiciones ambientales desfavorables (pH, temperatura).
- Cambiar los requerimientos nutricionales para su crecimiento.
- Cambiar los tipos de productos finales del metabolismo y su velocidad de producción.
- Cambiar las características de la membrana celular.
- Cambiar la composición intracelular.
- Cambiar las características morfológicas.
- Incrementar la resistencia a la acción de depredadores.

Es necesario tener presente que gran parte de las mutaciones resulta en la muerte de la célula. Si un cultivo de microorganismos contiene un pequeño grupo de mutantes que presentó una mayor resistencia a un antibiótico específico, éstos se transformarán en la población dominante, si tal antibiótico es incorporado al medio de cultivo. Las mutaciones son la base de la diversidad genética de las especies y de la constante adaptación de ellas a las condiciones del entorno. La gran población y alta tasa de reproducción que caracterizan el mundo microscópico, posibilitan la ocurrencia de un significativo número de mutaciones. Aquellas mutaciones que confieren un rasgo positivo a un individuo, dadas las condiciones ambientales prevalente, serán transmitidas a las generaciones siguientes.

c) Requerimientos Materiales y Energéticos

El metabolismo comprende un conjunto de reacciones químicas, que se llevan a cabo a nivel celular, para producir energía (catabolismo) o utilizar energía en la síntesis de componentes celulares (anabolismo) u otras actividades (ver Figura 2.9). Los compuestos químicos que las células requieren como materia prima para su actividad biológica (es decir, nutrientes) sirven como:

- Material requerido para la síntesis de material citoplasmático.
- Fuente de energía para el crecimiento celular y las reacciones biosintéticas.
- Receptores de los electrones generados durante las reacciones de oxidación.

La Tabla siguiente presenta una clasificación de acuerdo a los requerimientos de nutrientes:

TABLA 2.13: CLASIFICACIÓN DE ACUERDO A LOS REQUERIMIENTOS DE NUTRIENTES

FUNCIÓN	FUENTE
Fuente de Energía	Compuestos orgánicos, compuestos inorgánicos, luz
Receptor de Electrones	Oxígeno (O ₂), compuestos orgánicos, oxígeno inorgánico combinado (NO ₃ ⁻ , NO ₂ ⁻ , SO ₄ ⁻)
Fuente de Carbono	CO ₂ , HCO ₃ ⁻ compuestos orgánicos
Otros Nutrientes	Elementos traza y factores de crecimiento (ej. N, P, vitaminas, metales)

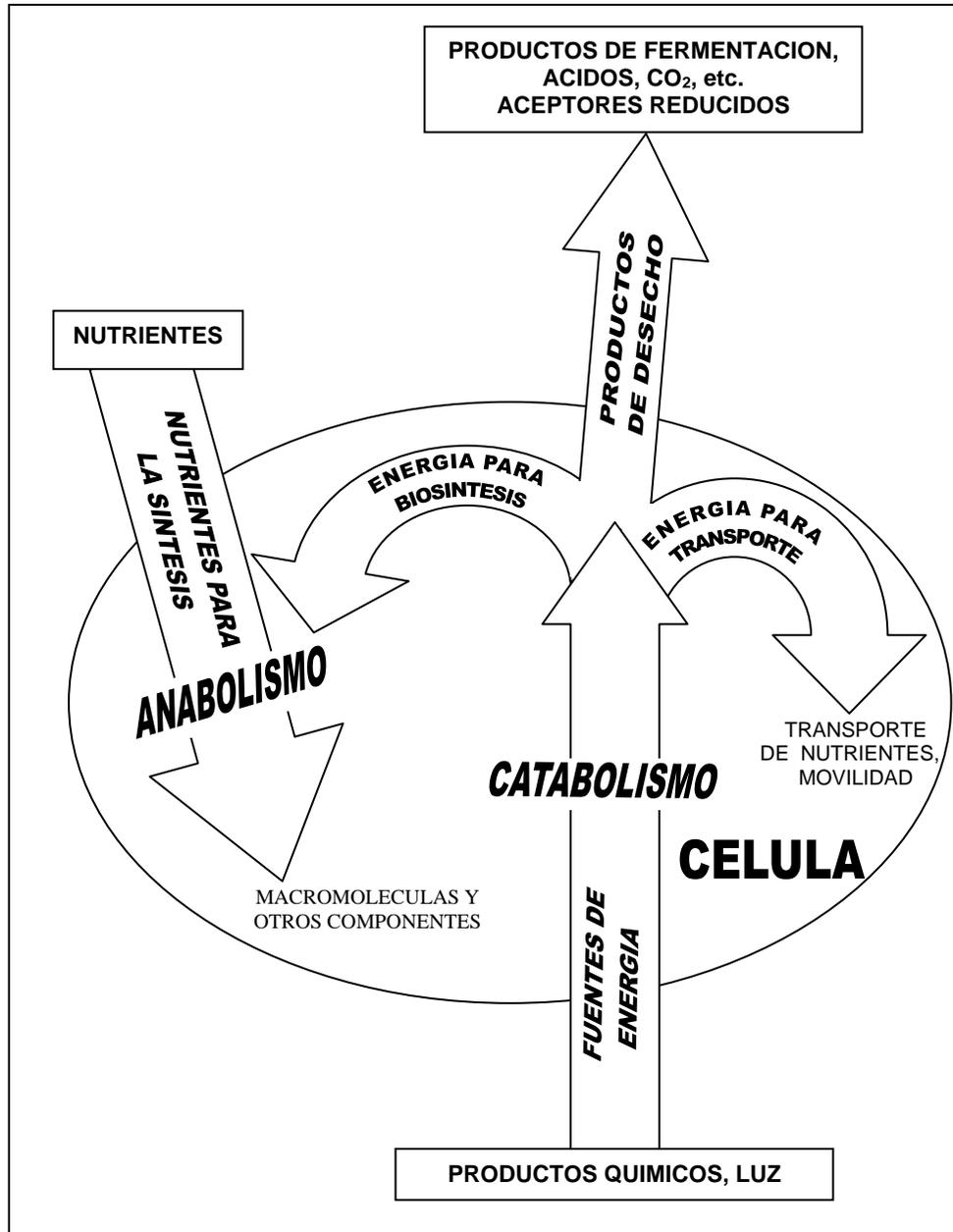


FIGURA 2.9 METABOLISMO CELULAR

En base a la fuente de energía requerida, los microorganismos se pueden clasificar en:

- **Fotótrofos:** Usan la luz como fuente de energía
- **Quimiótrofos:** Emplean reacciones de óxido-reducción para obtener su energía. Los quimiotrofos se pueden clasificar de acuerdo al tipo de compuesto químico oxidado:
 - 1) Quimioorganotrofos (usan moléculas orgánicas complejas como donadores de electrones)
 - 2) Quimiolitotrofos (usan moléculas inorgánicas simples tales como H₂S, NH₃).

Desde el punto de vista de la forma química del carbono requerido, se pueden clasificar en:

- **Autótrofos:** Usan el CO₂ o HCO₃⁻ como la única fuente de carbono C, a partir de los cuales construyen las biomoléculas. Es decir, producen materia orgánica a partir fuentes inorgánicas.
- **Heterótrofos:** Requieren carbono en forma orgánica (ej.: glucosa).

Aún cuando los quimioorganotrofos son capaces de oxidar una amplia gama de sustratos de carbono y fuentes de energía, la mayoría de los organismos tiene una cantidad limitada de sustancias preferidas. Otros organismos tienen una gran flexibilidad y pueden oxidar no solamente los productos de desecho del metabolismo de los mamíferos, sino que también pueden oxidar productos sintéticos orgánicos producidos industrialmente.

A pesar de las diferencias entre las especies, la forma a través de las cuales se logra la oxidación es similar en todos los organismos vivos. El objetivo final de las reacciones que generan energía, es entregar energía para la síntesis de ATP (que es la forma química como se almacena la energía en los procesos bioquímicos). Sin embargo, los compuestos orgánicos poseen mucho más energía de la que se requiere. Por ejemplo, la oxidación completa de glucosa produce 2872 kJ/mol; si ella fuera utilizada con un 100% de eficiencia podría producir energía suficiente para la síntesis de 80 moléculas de ATP. Si toda esta energía fuera liberada al mismo tiempo, el efecto para la célula sería desastroso. La oxidación procede por lo tanto en una serie de reacciones catalizadas por enzimas, las cuales se organizan para liberar la energía en forma discreta y en cantidades controladas, de modo que se puedan acoplar con la síntesis de ATP. Tales series de reacciones se conocen como **pasos metabólicos** y los mismos ciclos metabólicos principales son explotados por todos los organismos (lo que indicaría el origen común de todos los seres vivos). Tales mecanismos de degradación generan un gran número de estructuras de carbono que son usadas como componentes para la síntesis de nuevo material celular en los procesos anabólicos. No entraremos a revisar aquí los ciclos metabólicos, aún cuando representan un fascinante proceso en la química de la vida.

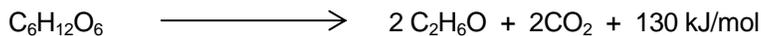
Efecto de los Factores ambientales

- **Temperatura:** En general, los microorganismos pueden sobrevivir en un rango muy limitado de temperatura. De acuerdo al límite de temperatura que pueden tolerar, las bacterias se clasifican en psicrófilas (hasta 30°C), mesófilas (hasta 45°C), o termófilas (hasta 80°C). La temperatura tiene un gran efecto sobre la cinética de las reacciones bioquímicas, ya que la actividad catalítica de las enzimas es extremadamente dependiente de la temperatura, con rangos muy estrechos dentro de los que pueden operar efectivamente.
- **pH:** Rango: 4-9 (óptimo 6.5-7.5). Se ha sugerido que las bacterias de tratamiento de efluentes crecen mejor a pH ligeramente alcalino y, en sistemas aireados, se ha podido operar mejor a niveles 9-10. La concentración de iones de H es uno de los factores que más efecto tiene sobre la actividad enzimática.
- **Oxígeno:** La ausencia o presencia de oxígeno divide a los organismos en 3 clases:
 1. **Aeróbicos:** Usan el O₂ como receptor de electrones.
 2. **Anaeróbicos:** Usan otros compuestos como aceptores de electrones.
 3. **Facultativos:** Pueden usar tanto el O₂ como otros componentes.

Los organismos aeróbicos normalmente oxidan completamente los nutrientes orgánicos, generando una gran cantidad de energía:

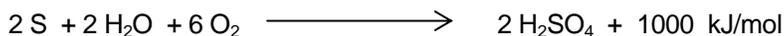


En el caso de los anaeróbicos, la oxidación es incompleta, liberando poca energía. Por ejemplo:



Algunas bacterias aeróbicas autotróficas pueden también oxidar completamente ciertos compuestos inorgánicos para sus requerimientos energéticos, por ejemplo:

Thiobacillus thiooxidans:



Nitrosomonas:



d) Metabolismo Celular

Los nutrientes absorbidos por los organismos sufren numerosas reacciones

bioquímicas:

- **Reacciones Catabólicas:** Son reacciones de degradación, oxidativas y exotérmicas. La energía generada por las reacciones catabólicas es almacenada en forma química como enlaces de fosfato (adenosin-trifosfato: ATP). Además de su función metabólica, los procesos catabólicos sirven para liberar nutrientes al entorno, una vez que el organismo muere.
- **Reacciones Exergónicas:** Son las reacciones que liberan la energía almacenada, a partir de la hidrólisis del enlace fosfato.
- **Reacciones Anabólicas:** Son aquellas que sintetizan compuestos de mayor tamaño y con estructuras más compleja.

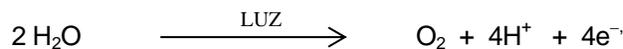
La energía requerida en las reacciones de síntesis es obtenida a partir de la hidrólisis enzimática del ATP (adenosintrifosfato):



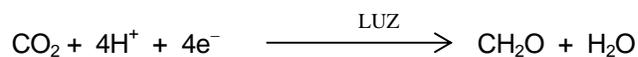
La cual es catalizada por la enzima **adenosintrifosfatasa**. El ATP es una molécula de adenosina unida a tres fosfatos inorgánicos por enlaces fosforilos; la formación de cada uno de estos enlaces requiere gran cantidad de energía (30 kJ/mol). La hidrólisis de estos enlaces liberará dicha energía, para ser usada en las reacciones anabólicas.

- **Energía Fototrófica:** Los organismos fotosintéticos pueden atrapar la energía de la luz, para sintetizar el ATP. Existen dos tipos de fotosíntesis que dependen de la fuente de poder reductor explotado por el organismo: oxigénica y anoxigénica.

1) Fotosíntesis Oxigénica: Las plantas verdes, algas y cianobacterias catalizan la oxidación del agua para producir hidrógeno, oxígeno y dos electrones:



Esta reacción se acopla con la reducción del CO_2 para producir carbohidratos:



2) Fotosíntesis Anoxigénica: Por su parte las bacterias fotosintéticas no oxidan el agua, sino que la reemplaza con algún otro agente reductor (S^- ,

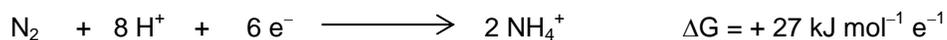
S₂O₃⁼ o H₂). Por ejemplo,



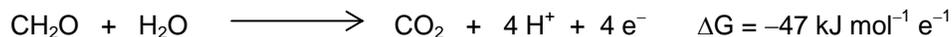
Estas reacciones no resultan en la formación de oxígeno y por ello se les llama fotosíntesis anoxigénica. Las bacterias fotosintéticas son anaeróbicas y el oxígeno es un inhibidor para ellas.

Los sustratos potenciales para el crecimiento microbiano se encuentran tanto en forma soluble como insoluble. Aquellas que se encuentran en forma coloidal o insoluble son partículas entre 0,1-100 μm, que contienen proteínas, grasas y carbohidratos, y pueden ser consumidas por los protozoos fagocíticos. Ya que las bacterias están rodeadas de una pared celular rígida, no les es posible el consumo de este tipo de moléculas grandes. Sin embargo, algunas bacterias son capaces de secretar enzimas extracelulares, que catalizan la hidrólisis de dichos compuestos a formas más simples, que puedan cruzar con facilidad la pared celular (transporte activo o difusión molecular). Como resultado de su capa de lípidos, la pared celular presenta una barrera extremadamente hidrofóbica al ambiente externo. Sólo aquellos compuestos que son solubles en lípidos pueden cruzar la barrera sin ayuda, mediante difusión molecular. La mayoría de los sustratos cruzan la barrera a través de un mecanismo de transporte activo, que requiere de energía para generar un gradiente electroquímico que transfiera el sustrato a través de la membrana. La variedad de sustratos que deben ser transportados al interior es amplia e incluye compuestos con carga positiva, negativa o neutros (ej.: Ca⁺², Mg⁺², SO₄⁼, PO₃⁼, glucosa, fructosa, etc.). Existen muchos mecanismos de transporte activo, que dependen del tipo de compuesto y su carga.

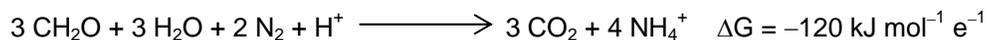
Otro ejemplo interesante de la acción biológica en los procesos naturales lo constituyen algunas reacciones asociadas al ciclo del Nitrógeno. Las reacciones de **fijación** del N₂ requieren de una fuente de electrones para llevar a cabo la reducción del N⁰ a N⁻³.



Esta reacción no será posible a menos que se combine con una reacción que posea un cambio altamente negativo de energía libre. Afortunadamente para la vida, tal reacción es la oxidación de carbohidratos para formar CO₂:

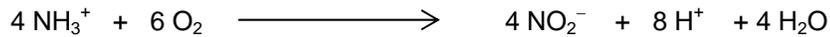


La combinación de ambas reacciones resulta termodinámicamente favorable y suministra energía a los microorganismos:



La enzima **nitrogenasa** es responsable de la fijación del N₂ y posee la propiedad de reducir una variedad de compuestos de triple enlace.

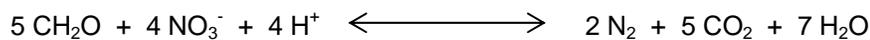
La conversión de iones amonio a nitrato es esencial para el crecimiento de la mayoría de las plantas, ya que ellas, pueden asimilar el nitrato con mayor facilidad. Tal proceso de **nitrificación** se lleva a cabo a través de microorganismos aeróbicos:



Cuando las plantas y los animales mueren, las moléculas más complejas sufren degradación por acción de varios tipos de microorganismos, por ejemplo la reacción de amonificación de la urea:



La regeneración del N_2 a partir del nitrato (desnitrificación) ocurre en condiciones anaeróbicas en el suelo y en el océano:



La reducción del nitrato puede seguir hasta la formación de N_2O , el cual es un gas relativamente inerte en la tropósfera, donde alcanza una concentración de $0,3 \text{ (mg/m}^3\text{)}$.

Y la historia de la vida microscópica, de las reacciones enzimáticas y los procesos metabólicos, podría continuar llenando páginas y páginas. El objetivo ha sido entregar una visión muy resumida de los principales términos que conforman el lenguaje cotidiano de la microbiología. Con ellos esperamos poder comprender los fenómenos que ocurren tanto en los sistemas naturales como en aquellos procesos industriales que hacen uso de agentes biológicos.

En este capítulo, hemos visto que la Vida en la Tierra se sustenta en la existencia abundante de compuestos químicos, cuya presencia es fundamental para construir la amplia diversidad de moléculas, que constituyen los cuerpos vivientes. El oxígeno, el hidrógeno, el carbono, el nitrógeno, el azufre, el fósforo y otros elementos, son piezas fundamentales en la arquitectura de la Vida. Dichos elementos se encuentran en diferentes estados de valencia, ya sea puros o formando compuestos estables en los distintos compartimentos de nuestro planeta. Están experimentando permanentes transformaciones químicas y físicas, muchas de ellas dinamizadas por la actividad viviente, dentro de la cual está inserta el ser humano.

BIBLIOGRAFÍA

- Agueda J.A., Anguita F., Araña V., López J., Sánchez L., "Geología", 2a. edición, Editorial Rueda, Madrid (1983)
- Arms K. "Environmental Science". Saunders College Publishing, Philadelphia (1990)
- Botkin D., Keller E. "Environmental Science: Earth as a Living Planet". Wiley. New York (1995)
- De Nevers N., "Ingeniería de Control de la Contaminación del Aire". McGraw-Hill, México (1998)
- Goudie A. "The Nature of the Environment", 2ª ed. Blackwell, Oxford (1989)
- Goudie A. "The Human Impact on the Natural Environment". Blackwell, Oxford (1990)
- Grant W.D. Long P.E., "Microbiología Ambiental". Editorial Acribia S.A., Zaragoza (1989)
- Joseph L. "GAIA, La Tierra Viviente", Editorial Cuatro Vientos, Santiago-Chile (1992)
- Lovelock J. Bateson G., Margulis L., Atlan H., Varela F., Maturana H., "GAIA, Implicaciones de la Nueva Biología". Editorial Kairós, Barcelona (1989)
- Lovelock J. "GAIA: La Ciencia para Curar el Planeta". Editorial Integral. Barcelona, España (1992)
- Margalef R. "Planeta Azul, Planeta Verde", Prensa Científica S.A., Barcelona (1992)
- Medina M. "Iniciación a la Meteorología" 8ª edición. Editorial Paraninfo. Madrid. (1994).
- Meyer W.B. "Human Impact on the Earth. Cambridge University Press (1996)
- Miller G.T. "Living in the Environment". 9ª ed. Wadsworth, California (1996)
- Nebel B.J., Wright R.T. "Environmental Science: the Way the World Works". 5ª ed. Prentice-Hall, Upper-Saddle river, New Jersey (1996)
- Odum E.P., "Fundamentos de Ecología", Nueva Editorial Interamericana, México (1986)
- O'Neill P., "Environmental Chemistry", 2ªed., Chapman & Hall, London (1993)
- Raven P.H., Berg L.R., Johnson G.B. "Environment". Saunders College Publishing. (1993)
- Sandoval L. "Geomorfología". Ed. Ministerio de Defensa Español, Madrid (1991)
- Schlesinger W.H. "Biogeochemistry: An Analysis of Global Change". Academic Press, San Diego (1991)
- Turk A., Turk J., Wittes J., Wittes R. "Tratado de Ecología". Nueva Editorial Latinoamericana, México ((1981)
- Wallace J.M., Hobbs P.V., "Atmospheric Science, An Introductory Survey", Academic Press, Orlando FL (1977)

CAPÍTULO 3

LOS CONTAMINANTES Y EL AMBIENTE

Contaminante: *Todo elemento, compuesto, sustancia, derivado químico o biológico, energía, radiación, vibración, ruido, cuya presencia en el ambiente, en ciertos niveles, concentraciones o períodos de tiempo, pueda constituir un riesgo a la salud de las personas, a la calidad de vida de la población, a la preservación de la naturaleza o a la conservación del patrimonio ambiental¹.*

Contaminación: *Presencia en el ambiente de sustancias, elementos, energía o combinación de ellos, en concentraciones y permanencia superiores o inferiores, según corresponda, a las establecidas en la legislación vigente o que pueda constituir un riesgo a la salud de las personas, a la calidad de vida de la población, a la preservación de la naturaleza o a la conservación del patrimonio ambiental.*

El aire, el agua y el suelo, constituyen los medios donde se vierten los residuos generados por el hombre. Dichos residuos participan en los complejos procesos físicos, químicos y biológicos que tienen lugar en el medio natural, sufriendo transformaciones y, en muchos casos, alterando el funcionamiento de los ecosistemas. A su vez, los contaminantes pueden afectar la salud humana ingresando al organismo, a través de las vías respiratorias y del sistema digestivo, o de la piel.

Uno de los objetivos básicos de la ingeniería ambiental es reducir las emisiones de residuos y minimizar su impacto ambiental. Para ello, se requiere conocer las características de los contaminantes, sus interacciones con los procesos naturales que ocurren en los medios receptores y sus efectos sobre el funcionamiento de los ecosistemas y sobre la salud de las personas. Nuestro interés en el control de los residuos radica en el hecho de que éstos representan uno de los problemas ambientales de mayor gravedad de la sociedad industrial moderna.

En este capítulo se revisan las características de los principales contaminantes emitidos a la atmósfera, a los cuerpos hídricos y al suelo, sus efectos y mecanismos de transformación. Además, se introducen los modelos utilizados para describir su transporte y destino en el medio receptor. Finalmente, se incluye una revisión general de los principales conceptos sobre toxicología, relevantes a la ingeniería ambiental.

¹ Ambas definiciones corresponden a las presentadas en el Artículo 2º de la Ley 19.300

3.1) CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

La contaminación atmosférica se define como la presencia de ciertas sustancias y/o formas de energía en el aire, en concentraciones, niveles o permanencia lo suficientemente altos como para constituir un riesgo a la salud y a la calidad de vida de la población, y a la preservación de la naturaleza o a la conservación del patrimonio ambiental. Dichos contaminantes pueden ser:

- Primarios: Son aquellos que se emiten directamente a la atmósfera debido a procesos naturales o antropogénicos.
- Secundarios: Se generan a partir de reacciones químicas que algunos contaminantes primarios sufren en la atmósfera.

Los principales contaminantes atmosféricos primarios, derivados de la actividad humana, incluyen:

- Partículas atmosféricas
- Compuestos de azufre
- Compuestos de nitrógeno
- Compuestos orgánicos
- Compuestos metálicos
- Ruido
- Radiaciones ionizantes

Entre los contaminantes secundarios, destacan aquellos generados por reacciones fotoquímicas en la atmósfera. La contaminación fotoquímica es el producto de una serie de reacciones químicas complejas entre diversos constituyentes descargados a la atmósfera urbana. Cuando estos reaccionan bajo condiciones de luz solar brillante, generan una mezcla de contaminantes agresivos denominada *smog fotoquímico*.

3.1.1) Contaminantes Atmosféricos

La mayoría de los contaminantes atmosféricos pueden afectar directamente la salud de las personas, ya que ingresan al organismo a través del sistema respiratorio o de la piel. En otros casos, el contaminante es transportado desde el aire al suelo o a los cuerpos hídricos, donde posteriormente ingresa en la cadena trófica. El transporte de contaminantes desde la atmósfera hacia la superficie terrestre se produce por sedimentación de las partículas del aire y/o por absorción y arrastre de las lluvias. La Figura 3.1 muestra un esquema simplificado del transporte y destino de los contaminantes atmosféricos.

A continuación se revisan brevemente las características de los principales agentes contaminantes atmosféricos, y sus efectos sobre las personas y los ecosistemas.

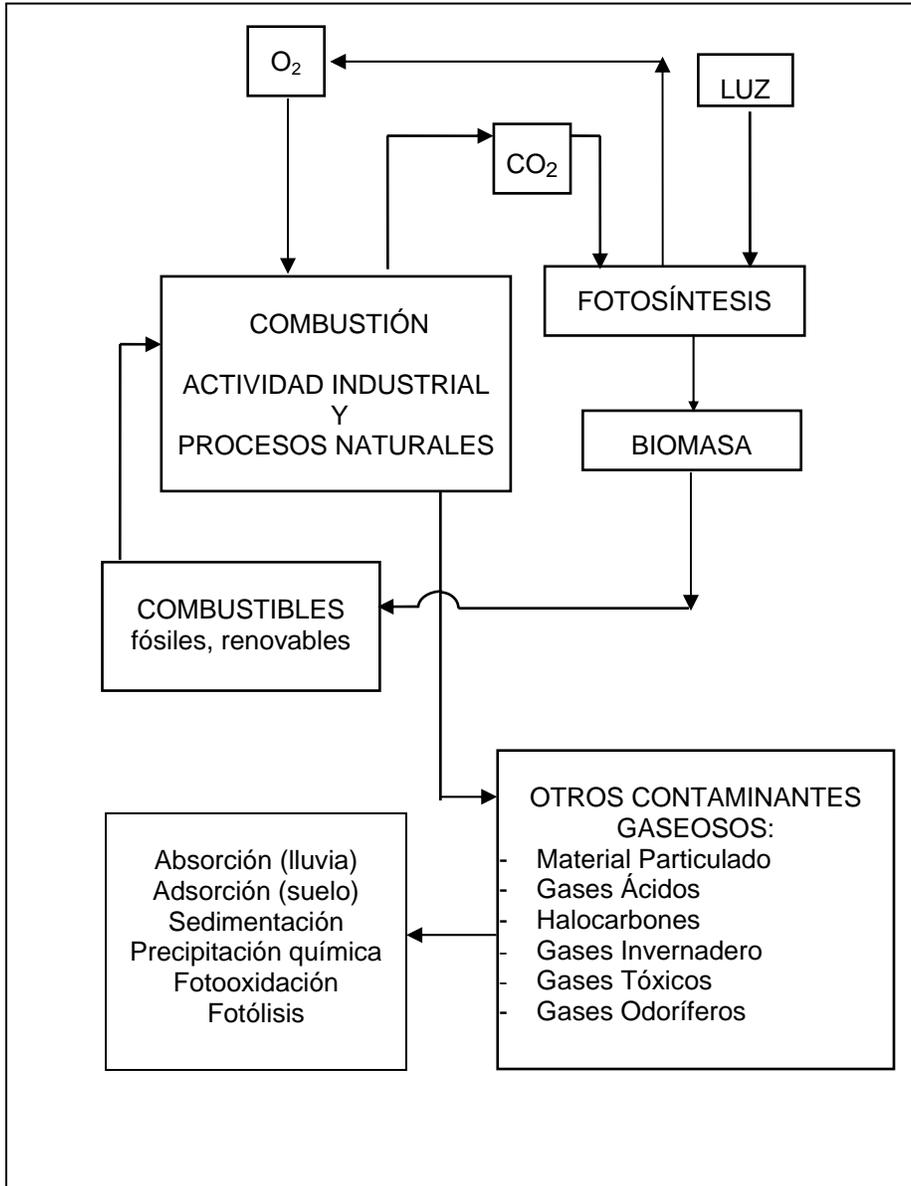


FIGURA 3.1: CICLO GENERATIVO / REGENERATIVO DE LOS CONTAMINANTES GASEOSOS

- **Partículas Atmosféricas**

El material particulado existente en el aire, corresponde a partículas sólidas y líquidas que se encuentran en suspensión en la atmósfera² y cuyos tamaños oscilan entre 2×10^{-4} y 5×10^2 μm . Estas partículas se encuentran ampliamente repartidas en la atmósfera, y forman una suspensión estable en el aire. La composición química de las partículas depende de su origen y, generalmente, constituyen una mezcla de sustancias diversas, entre las cuales se puede mencionar: silicatos, carbonatos, sulfatos, cloruros, nitratos, óxidos, metales, carbón, alquitrán, resinas, polen, hongos, bacterias, etc. Muchas provienen de procesos naturales, y son transportadas debido a la acción del viento; por ejemplo, las cenizas derivadas de los incendios y erupciones volcánicas, la acción del viento sobre los océanos y la turbulencia del mar que genera aerosoles, el polvo de los suelos secos sin cobertura vegetal, el polen, etc. Además, las partículas son originadas por una gran gama de procesos tecnológicos, tales como en la combustión de madera y de combustibles fósiles, y en el procesamiento de material sólido (reducción de tamaño, secado, transporte, etc.).

Las partículas menores de 0,1 μm son, generalmente, iones y núcleos de condensación generados en los procesos de combustión, actividad volcánica, evaporación del agua de mar pulverizada, iones metálicos absorbidos en las gotas de agua de la atmósfera, etc. Estas constituyen un importante riesgo para la salud humana, ya que pueden entrar con facilidad al sistema pulmonar.

Las partículas sólidas entre 0,1 y 10 μm son aerosoles formados en procesos naturales y antropogénicos. Este material particulado se encuentra disperso en la atmósfera, y puede mantenerse suspendido por largo tiempo, debido a su baja velocidad de sedimentación. En las zonas urbanas, este tipo de material particulado puede tener un alto contenido de sulfatos, nitratos, fierro, plomo e hidrocarburos aromáticos.

Las partículas sólidas de mayor tamaño, entre 10 y 500 μm , tienen una velocidad de sedimentación mayor y permanecen menos tiempo en la atmósfera. Este polvo grueso contiene, principalmente: silicatos, sulfatos, cloruros, nitratos, fierro, calcio, aluminio, manganeso, plomo, zinc, magnesio y cobre. También se encuentra la

² La American Society for Testing and Materials (ASTM) define los siguientes términos para las diferentes categorías de partículas en la atmósfera:

Aerosoles: Partículas sólidas o líquidas de tamaño microscópico en medio gaseoso, tales como humo, niebla o bruma.

Polvo: Se refiere a partículas sólidas capaces de mantenerse suspendidas en el aire por un tiempo limitado y que pueden sedimentar debido a la acción de la gravedad (tamaño mayor que 1 μm).

Gotas: Partículas líquidas de pequeño tamaño, capaces de mantenerse suspendidas en la atmósfera, bajo condiciones de turbulencia.

Cenizas: Partículas de cenizas finamente divididas arrastradas por gases de combustión.

Niebla: Se refiere a aerosoles visibles, formados por agua líquida o hielo dispersos en el aire.

Humo: Son partículas sólidas de pequeño tamaño, derivadas de la combustión incompleta, constituidas principalmente por carbón y otros materiales combustibles.

presencia de compuestos orgánicos generados por la combustión incompleta del carbón y derivados del petróleo. Estas partículas son eliminadas por retención y arrastre con las gotas de lluvia.

Muchas partículas son químicamente inertes, pero pueden adsorber sustancias químicas activas presentes en la atmósfera. Sin embargo, existen partículas que son altamente corrosivas o tóxicas, debido a su propia naturaleza química o a la presencia de compuestos corrosivos o tóxicos adsorbidos en su superficie.

Aquellas partículas cuyo diámetro aerodinámico es inferior a 10 μm pueden cruzar las barreras protectoras de la zona superior del sistema respiratorio. Una vez que las partículas entran al tracto respiratorio, se les presentan varios caminos de ingreso al resto del cuerpo. Algunas pueden ser atrapadas por el flujo mucoso que baña una porción del tracto respiratorio. Finalmente, el mucus es tragado y, por lo tanto, las partículas llegan al estómago y a los intestinos. Otras permanecen en los pulmones donde pueden rodearse de tejido y, eventualmente, ser incorporadas al flujo sanguíneo. Debido a estos efectos negativos, las normativas ambientales establecen niveles máximos de exposición a material particulado de tamaño inferior a 10 μm (comúnmente denominado MP10); por ejemplo, en Chile se establece un nivel máximo de 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para una exposición de 24 horas.

Existe poca información respecto al efecto del material particulado sobre la vegetación. Algunos investigadores han señalado que el polvo puede bloquear los poros de las hojas y disminuir la fotosíntesis. También se ha identificado varias sustancias presentes en las partículas que causan daño a las plantas, tales como, por ejemplo, fluoruros y compuestos ácidos.

- **Compuestos de Azufre**

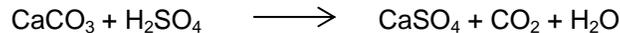
El dióxido de azufre (SO_2) y el trióxido de azufre (SO_3) son los principales óxidos de azufre presentes en la atmósfera. La principal fuente antropogénica de óxido de azufre es la combustión de combustibles fósiles ricos en azufre (ej. carbón, petróleo combustible (*fuel oil*), diesel) y representa cerca de un tercio del total del SO_2 atmosférico. El principal componente azufrado del carbón es la pirita (FeS_2), la que se oxida a Fe_2O_3 y SO_2 durante la combustión. Otras actividades industriales relevantes son las refinerías de petróleo y las fundiciones de minerales sulfurados. Alrededor de un 93% de todas las emisiones de SO_2 generadas por el hombre provienen del hemisferio norte.

El SO_2 es un gas que no se inflama, no es explosivo y es incoloro. En el aire, el SO_2 se oxida parcialmente en SO_3 y, en presencia de humedades altas, se transforma en ácido sulfúrico y sus sales, por medio de procesos fotoquímicos atmosféricos:



El anhídrido sulfuroso es un precursor de aerosoles secundarios (ej. sulfatos),

típicamente asociados a la fracción fina del material particulado. La atmósfera corrosiva, generada bajo dichas condiciones, afecta una gran variedad de materiales tales como el acero, zinc, cobre, y aluminio, formando sulfatos metálicos. Más aún, los materiales de construcción, estatuas, etc., que poseen componentes de carbonato de calcio (caliza, dolomita, mármol y mortero), son especialmente vulnerables al ataque de estas neblinas ácidas:



Varias especies animales, incluyendo el hombre, responden al dióxido de azufre mediante constricción bronquial, la que aumento en la resistencia al flujo de aire. El anhídrido sulfuroso al ser inhalado se hidrata con la humedad de las mucosas constituyendo un riesgo para la salud de las personas y otras especies animales al producir constricción bronquial. Dicho efecto aumenta con la actividad física, con la hiperventilación, al respirar aire frío y seco y en personas con hiperreactividad bronquial. De acuerdo a los resultados de estudios epidemiológicos de morbilidad, mortalidad o cambios en la función pulmonar en grupos de población sensible, la Organización Mundial de la Salud (OMS) recomienda que no se supere una concentración de SO_2 de $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para una exposición de 10 minutos, o de $250 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para un periodo de 24 horas, o de $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para un periodo de un año. En Chile, las normas vigentes al año 2000 establecen niveles máximos permitidos de $365 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para periodos de 24 horas y de un año, respectivamente.

Concentraciones elevadas de SO_2 y largos tiempos de exposición pueden causar daños severos a las plantas. Los daños agudos parecen estar causados por la absorción rápida del SO_2 . El tejido dañado de la planta se caracteriza, primeramente, por la apariencia seca y blanqueada, seguida por una decoloración café-rojiza. Los manzanos, perales, pinos y otros árboles son especialmente susceptibles al daño crónico; como también lo son la mayoría de las plantas usadas en la horticultura, la alfalfa, la cebada y el algodón.

Finalmente, entre los compuestos de azufre de relevancia ambiental, se encuentran el sulfuro de hidrógeno (H_2S) y los mercaptanos. El H_2S se produce a partir de la reacción del azufre con el hidrógeno, en procesos industriales o naturales. Además, se genera como subproducto en la biodegradación anaeróbica, en presencia de sulfatos. El H_2S tiene un fuerte olor a huevo podrido, que es detectado por el ser humano a muy bajos niveles de concentración (del orden de $6 \mu\text{g}/\text{m}^3$). A concentraciones mayores es altamente tóxico y explosivo, por lo que sus emisiones deben mantenerse bajo estricto control. En presencia de oxígeno se oxida a SO_2 .

Otros contaminantes de interés son los mercaptanos. Estos son compuestos orgánicos sulfurados de bajo peso molecular (CH_3S , $\text{C}_2\text{H}_5\text{S}$), de características odoríferas, y se generan tanto en procesos industriales (ej. producción de pulpa sulfatada) como naturales (ej. degradación anaeróbica de material proteico). A bajas concentraciones, no presentan efectos tóxicos y, eventualmente, se oxidan en presencia de oxígeno.

- **Óxidos de Nitrogeno (NO_x)**

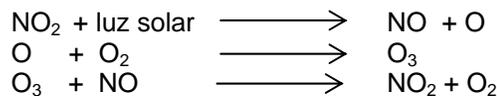
Los tres óxidos de nitrógeno que se encuentran comúnmente en la atmósfera son: óxido nitroso (N₂O), óxido nítrico (NO) y dióxido de nitrógeno (NO₂). Estos se denominan genéricamente NO_x. El N₂O es un gas relativamente poco reactivo, y es un componente traza de la atmósfera "natural". El NO es un gas incoloro e inodoro; mientras que el NO₂ es café-rojizo (color de la atmósfera visto frecuentemente sobre áreas urbanas) y tiene un olor desagradable.

Los óxidos de nitrógeno son producidos directa e indirectamente por procesos de combustión a altas temperaturas. En dichos procesos el N₂ presente en el aire se oxida para formar principalmente NO, el que se transforma en NO₂ mediante reacciones fotoquímicas. En las zonas urbanas, las concentraciones máximas de NO_x coinciden con los volúmenes máximos de tráfico. Los gases de escape de los motores de automóviles son ricos en NO y pobres en NO₂. Generalmente, una pequeña fracción del total de NO_x está presente como NO₂. Durante la mezcla inicial del aire con los gases de escape calientes, se oxida parte del NO:



Las reacciones químicas de los compuestos nitrogenados en la atmósfera son muy importantes en el contexto de los procesos de transformación que ocurren en ese medio. Aparte de las fuentes antropogénicas, los NO_x se forman a partir de las reacciones entre el N₂ y el O₂ del aire en la alta estratósfera.

El NO_x en la atmósfera, está sujeto a las siguientes reacciones fotoquímicas:



Estas ecuaciones establecen un ciclo, que otorga concentraciones estacionarias de NO, NO₂ y O₃. Las constantes de velocidad de reacción son tales, que permiten alcanzar el estado estacionario en forma relativamente rápida.

Finalmente, gran parte del dióxido de nitrógeno atmosférico se convierte en ácido nítrico y sales de nitrato:



Las sales de nitrato forman material particulado y/o sedimentan o son arrastradas por la lluvia.

La exposición a óxidos de nitrógeno puede irritar los pulmones, producir constricción bronquial y disminuir la resistencia ante infecciones respiratorias (ej. influenza), particularmente en individuos con enfermedades respiratorias pre-existentes, tales como asma. Estos efectos pueden ser mayores cuando existen otros compuestos alergénicos presentes en el aire. La OMS propone como nivel límite de NO₂ una concentración promedio anual de 40 µg/m³ para exposiciones

crónicas. En Chile, la norma de calidad de aire para NO₂ vigente al año 2000 establece un límite de 100 µg/m³ como concentración media aritmética anual.

- **Hidrocarburos**

Además de los hidrocarburos de alto peso molecular, presentes en el material particulado, existe un amplio rango de compuestos orgánicos volátiles, destacándose aquellos que poseen entre 1 y 4 átomos de carbono, ya que se encuentran en estado gaseoso, bajo condiciones ambientales normales. Su importancia ambiental radica en su participación en las reacciones de oxidación fotoquímica. En dichas reacciones, los hidrocarburos se transforman en radicales libres, generándose derivados aldehídos y otros compuestos oxidados, como por ejemplo: formaldehído, acroleína, acetaldehído y nitrato de peroxyacetilo.

- **Oxidantes Fotoquímicos**

Cuando los óxidos de nitrógeno y los hidrocarburos se ponen en contacto, en presencia de luz solar, tiene lugar un conjunto de reacciones químicas complejas que generan contaminantes secundarios, conocidos como *smog fotoquímico*.

El ozono es uno de los oxidantes fotoquímicos más abundantes, y se genera por la reacción entre el O₂ y el oxígeno atómico (O), en presencia de un catalizador (M) que estabiliza la molécula de ozono:

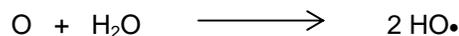


El ozono se consume en la reacción con el NO para formar NO₂:



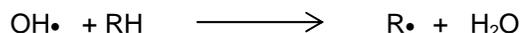
El ozono es un fotooxidante que se produce en la troposfera por efecto de la oxidación de monóxido de carbono e hidrocarburos en presencia de óxidos de nitrógeno y luz solar. De este modo, los hidrocarburos, el monóxido de carbono y los óxidos de nitrógeno constituyen precursores en la formación de ozono troposférico.

Por su parte, el oxígeno atómico se produce debido a la acción de la luz solar sobre el dióxido de nitrógeno. El oxígeno atómico es altamente reactivo y su interacción con el agua genera radicales hidroxilos, los que juegan un papel fundamental en los complejos procesos químicos atmosféricos:



Los radicales hidroxilos reaccionan con los hidrocarburos (RH), para producir radicales libres de hidrocarburos (R•), en presencia de luz solar (a longitudes de onda menores de 0,38 µm):





Estas sustancias, a su vez, reaccionan con el NO original para formar más NO₂:



El efecto neto de estas reacciones, es que una molécula de hidrocarburo convierte dos moléculas de NO a NO₂, y produce una molécula de aldehído. De hecho, se produce más NO₂ que aquel consumido en la reacción de disociación original, que proporciona el oxígeno atómico inicial, por lo que aumenta la concentración de NO₂ y disminuye el nivel de NO.

Tal como se menciona más adelante, el ozono también se genera en la estratosfera donde juega un papel fundamental para proteger la superficie terrestre de la radiación UV. Sin embargo, el ozono troposférico es nocivo para los animales y las plantas, debido a su gran capacidad oxidante que lo hace reaccionar con toda clase de sustancias orgánicas. Los efectos típicos del ozono en la salud son cambios en la función pulmonar (ej. exacerbación del asma, inflamaciones pulmonares y alteraciones estructurales del pulmón) que van precedidos por irritación de ojos y de las vías respiratorias en poblaciones sensibles. La OMS establece un límite de concentración de ozono de 120 µg/m³ por un período máximo de 8 horas, para el cual los efectos agudos sobre la salud pública son bajos. En Chile, el límite vigente al año 2000 establece una concentración límite de 160 µg/m³ para una exposición de 8 horas.

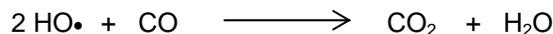
- **Óxidos de Carbono**

Los óxidos de carbono están constituidos por el dióxido de carbono (CO₂) y el monóxido de carbono (CO). El CO₂ generalmente no se considera como contaminante atmosférico, debido a que es un componente natural de la atmósfera donde juega un importante papel en el efecto invernadero. Sin embargo, existe gran preocupación por las crecientes emisiones de este gas como producto de la combustión, lo que puede afectar el balance térmico terrestre (este aspecto se discute en la Sección 3.1.2).

Por su parte, el CO es un contaminante que proviene, principalmente, de la combustión incompleta de cualquier tipo de combustible. También es producido en grandes cantidades por muchas fuentes naturales: a partir de gases volcánicos, incendios forestales, oxidación del metano ambiental, disociación del CO₂ en la parte superior de la atmósfera, etc. Los automóviles con motores de combustión interna son una de las principales fuentes de emisión de monóxido de carbono en las zonas urbanas. Las chimeneas, las calderas, los calentadores de agua, estufas y otros aparatos domésticos que queman combustible también son fuentes

importantes de CO, tanto al aire libre como en ambientes interiores (en este último caso, el humo de cigarrillo puede ser una fuente adicional significativa).

Los posibles mecanismos de eliminación del CO en la atmósfera, son las reacciones con radicales hidroxilos en la tropósfera y estratósfera, que lo transforman en CO₂ :



El CO tiene efectos serios sobre la salud, principalmente respiratorios y cardiovasculares. En concentraciones altas, puede causar la muerte, en tiempos de exposición relativamente cortos. En concentraciones menores, como aquellas existentes en el aire urbano, el CO afecta la capacidad de transporte de oxígeno en la sangre. El oxígeno y el monóxido de carbono son transportados dentro del cuerpo humano por la hemoglobina (molécula encontrada en los glóbulos rojos). El CO₂ generado en la actividad metabólica es transportado por la sangre hacia los pulmones, donde se intercambia por O₂, el que entra en la circulación sanguínea, mediante la acción de la hemoglobina. Desgraciadamente, la afinidad del CO con la hemoglobina es 200 veces mayor que la correspondiente al oxígeno. La hemoglobina a la cual se ha adherido CO se llama carboxihemoglobina (COHb), la que no puede transportar O₂ hacia las células. Según la OMS, el nivel de COHb en la sangre de las personas expuestas a CO no debiera superar el 2,5%, respecto al contenido total de hemoglobina. Para asegurar tal meta, la OMS propone concentraciones máximas de CO en el aire de 10 mg/m³ para una exposición de 15 minutos, o 30 mg/m³ para un periodo de 1 hora, o 10 mg/m³ para 8 horas. En Chile, los límites vigentes al año 2000 establecen concentraciones de CO en el aire de 40 mg/m³ y 10 mg/m³ para periodos de 1 hora y 8 horas, respectivamente.

- **Ruido**

El sonido representa la propagación de ondas de presión audibles a través de un medio elástico. El ruido es un sonido indeseable, cuya intensidad, frecuencia y duración, constituyen una molestia para las personas afectadas. El oído humano, transforma estas ondas de presión en señal acústica, con un umbral mínimo del orden de 20 µPa. El nivel de presión sonora (NPS), se define en términos del número de decibelios³ de presión acústica (P) en relación a una presión de referencia (P₀ = 20 µPa):

$$\text{NPS} = 20 \log (P/P_0)$$

Los valores de NPS se encuentran en el rango 10-140 dB. El umbral del dolor corresponde a 140 dB (ej. el sonido de un motor a propulsión ubicado a una distancia de 25 m). Los camiones y otras maquinarias pesadas generan NPS del orden de 90-110 dB, mientras que una biblioteca típica presenta 40 dB.

³ **Decibel (dB)**: Unidad adimensional usada para expresar el logaritmo de la razón entre una cantidad medida y una cantidad de referencia. De esta manera, el decibel es usado para describir niveles de presión, potencia o intensidad sonora.

Debido a su naturaleza logarítmica, la combinación de varios niveles de presión sonora (NPS_k) generados por diferentes fuentes k , requiere convertir dichos valores a sus respectivas presiones acústicas. Dichas presiones acústicas se pueden sumar (P_T) y luego calcular el nivel de presión sonora resultante (NPS_T):

$$P_T = \sum_K P_K = \sum_K P_0 10^{NPS_k / 20} \quad NPS_T = 20 \log \left(\frac{P_T}{P_0} \right)$$

La propagación del sonido en el aire depende del tipo de fuente sonora, de las condiciones atmosféricas (dirección del viento, presión y temperatura), y del medio donde se propaga. La onda acústica emitida sufre pérdidas de energía en su propagación, atenuación por el aire, reflexión, absorción y difracción debido a obstáculos, etc. A medida que la onda se aleja de la fuente emisora, su energía decrece. El NPS medido a una distancia determinada de la fuente emisora, disminuirá en 6 decibelios (dB) si se mide al doble de esa distancia.

El ruido afecta directamente a la salud de las personas y existen estrictas regulaciones sobre los niveles máximos permisibles. En Chile, el Decreto Supremo N°146/97 establece que para zonas destinadas a usos residenciales se fijan límites de NPS de 55 dB y 45 dB para horario diurno (7-21 h) y nocturno (21-7 h), respectivamente. Dicho Decreto fija un NPS máximo de 70 dB para zonas industriales exclusivas.

- **Radiaciones Ionizantes**

Aquí se incluyen los rayos X, las partículas α y β , y los rayos γ . Estas radiaciones tienen serios efectos para la salud de las personas, debido a su poder para ionizar la materia que encuentra a su paso.

Aún cuando existen fuentes de radiactividad naturales, las principales emisiones provienen de fuentes antropogénicas, debido al uso y procesamiento de materiales radiactivos. Las centrales nucleares y las fábricas de material bélico, son los principales usuarios de materiales radiactivos. Sin embargo, los usos difusos, tales como en medicina, instrumentos de laboratorio y análisis químicos, son los principales responsables de emisiones no controladas de radiaciones ionizantes.

- **Otros Contaminantes Atmosféricos**

Existen otros contaminantes atmosféricos que presentan problemas a nivel local. Entre ellos podemos nombrar:

Compuestos Halogenados:

Cl₂ : es un gas pesado, de color amarillento con un fuerte olor característico, que se utiliza ampliamente en diferentes aplicaciones industriales. Es altamente oxidante, y se utiliza como germicida en la potabilización de agua. Produce fuertes irritaciones en las mucosas del sistema respiratorio.

HCl: es un contaminante que se emite, normalmente, en los procesos de combustión de plásticos clorados u otros compuestos organoclorados. Es muy corrosivo e irritante.

HF: es un contaminante gaseoso derivado de diversas actividades industriales específicas, tales como la producción de aluminio, de fertilizantes fosfatados y de ciertos tipos de cementos. Se ha demostrado que causa perjuicios graves y extensos a la vegetación.

Compuestos organoclorados: Existen varios compuestos de este tipo que se emiten a la atmósfera en diferentes actividades:

-Los *bifenilos policlorados (PCB)*: Son un grupo de compuestos cuya fórmula general es $C_{12}H_{10-x}Cl_x$, con diferentes niveles de sustitución (existen 209 combinaciones posibles). A pesar de que su estado normal es líquido, se pueden encontrar presentes en los humos derivados de la combustión incompleta de polímeros clorados. Son muy tóxicos y de baja biodegradabilidad, por lo que persisten en el ambiente por largo tiempo. Debido a su alta constante dieléctrica y baja presión de vapor, se utiliza industrialmente como aislante en condensadores eléctricos y transformadores.

-Las *dioxinas y furanos* han despertado el interés debido a su altísimo potencial tóxico. Constituyen una familia de compuestos aromáticos clorados tricíclicos. Las dioxinas se diferencian de los furanos en la cantidad de átomos de oxígeno presentes en la molécula (uno en los furanos, dos en las dioxinas). Se conocen un total de 75 isómeros de dioxinas, llamadas genericamente policlorodibenzo-para-dioxinas (PCDD), y 135 isómeros de furanos, llamados policlorodibenzofuranos (PCDF). Son muy poco solubles en agua (menos de 0,12 ppb) y tienen una bajísima presión de vapor, por lo que son poco volátiles. Son químicamente estables a temperaturas menores de 850°C, y se descomponen con facilidad por acción de la luz en presencia de hidrógeno. Su gran estabilidad les permite resistir los ataques químicos y biológicos existentes en el suelo y en el agua, por lo que son altamente persistentes y bioacumulables. Su emisión a la atmósfera proviene de la combustión incompleta de compuestos orgánicos clorados (plásticos clorados, lignina clorada). También se generan en la reacción del Cl_2 y los compuestos fenólicos.

Metales pesados

Los metales pesados se encuentran en la atmósfera como material particulado. Algunos metales, tales como el mercurio y el tetraetilo de plomo, poseen una alta presión de vapor, por lo que pueden presentarse en estado gaseoso. En este grupo de contaminantes se incluyen además, al cadmio, cromo, cobre, zinc y arsénico. En general, son persistentes y bioacumulables en los seres vivos.

Asbestos

El asbesto es otro contaminante atmosférico importante. Asbesto es el nombre general de un grupo de minerales fibrosos, todos los cuales son básicamente silicatos hidratados. Estos varían en el contenido metálico, en la resistencia al calor y en otras propiedades. Estas variaciones determinan los usos industriales de los diferentes tipos de asbesto, e influyen en sus efectos biológicos. Una exposición crónica durante varios años, produce una enfermedad caracterizada por dificultades severas al respirar, conocida como *asbestosis*. Partes de las fibras inhaladas se fijan firmemente en el tejido pulmonar; la reacción natural del organismo consiste en cubrir estas fibras con un complejo fierro-proteico, formando cuerpos asbestosos. La inhalación excesiva de las fibras, produce una formación progresiva de tejido fibroso, el que eventualmente cubre gran parte de los pulmones.

La principal causa de muerte entre trabajadores de la industria del asbesto es el cáncer pulmonar. Se debe tener en consideración que el asbesto-cemento es muy utilizado en Chile en la construcción de viviendas. En la actualidad, se sabe que una exposición moderada a polvos de asbesto-cemento aumenta el riesgo de cáncer al pulmón en 10 veces, comparado con la población general. En personas fumadoras el riesgo aumenta en 90 veces.

Metano

El metano (CH₄) se encuentra presente naturalmente en la atmósfera, y se genera a partir de los procesos biológicos anaeróbicos. Ello ocurre en los sedimentos de los cuerpos de agua superficiales, pantanos, en los intestinos de los rumiantes y en otros medios anóxicos. Los vertederos de residuos biodegradables emiten metano, generado por la acción de bacterias anaeróbicas. El metano se oxida en la atmósfera a CO₂.

3.1.2) Cambios Atmosféricos Globales

En las últimas décadas, se han acumulado datos científicos que indican que la Humanidad está amenazada por el peligro del calentamiento global de la Tierra, y el aumento de la radiación ultravioleta que llega a la superficie terrestre. Estos peligros son serios, ya que la existencia de la vida en la Tierra es posible gracias a un delicado balance de fenómenos naturales, que han sido seriamente perturbados por la actividad humana.

Aún cuando la naturaleza de estos fenómenos es diferente, ambos se deben a cambios en la composición química de nuestra atmósfera. La atmósfera está constituida en un 99,96% (en volumen, excluyendo el vapor de agua) por N₂, O₂ y Argón, los que no han experimentado mayores variaciones en muchos milenios. Sin embargo, existen otros gases atmosféricos, que se encuentran en concentraciones de unas pocas partes por millón, cuya composición ha sufrido cambios significativos en las últimas décadas. Los más importantes, desde el punto de vista ambiental, son el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄), el óxido de nitrógeno (N₂O), el ozono

(O₃) y los clorofluorocarbonos o halocarbonos (CFC).

El Calentamiento Global de la Tierra

Tal como se menciona en el Capítulo 2, la composición química de la atmósfera juega un papel determinante en el balance térmico, ya que ésta absorbe parte de la radiación solar y de la energía radiada por la Tierra. La longitud de onda de la radiación depende de la temperatura en la superficie del cuerpo emisor. De acuerdo a la ecuación de Wien, la longitud de onda a la cual se obtiene la máxima intensidad en el espectro emitido por un cuerpo negro a una temperatura T (K) es :

$$\lambda_{max} = \frac{2.898}{T(K)} \quad (\mu\text{m})$$

Por lo tanto:

- la energía solar incidente tiene longitudes de onda corta (menos de 4 μm , con una máxima intensidad alrededor de 0.5 μm), ya que su fuente posee una temperatura del orden de 6.000 K en la superficie.
- la energía radiante de la Tierra, tiene longitudes de onda larga (radiación térmica), mayores de 4 μm , con una intensidad máxima a 10 μm , ya que la superficie terrestre tiene una temperatura media del orden de 300 K.

Una parte importante de la energía solar ultravioleta es absorbida por el O₂ y O₃ estratosférico, parte de la cual se emite posteriormente como radiación térmica de onda larga. A su vez, la radiación térmica emitida por la superficie terrestre, es absorbida por aquellos gases atmosféricos que absorben ondas largas (CO₂, CH₄, N₂O, H₂O, O₃, CFC), y re-emitida hacia la superficie, produciendo un "efecto de invernadero". La importancia de dichos gases se ilustra en la Tabla 3.1, que muestra sus respectivas concentraciones en la atmósfera, y su contribución al efecto invernadero. Es interesante notar que los CFC's tienen una importante contribución a dicho efecto, a pesar de su baja concentración, ya que absorben en el rango de longitud de onda correspondiente a la ventana de radiación atmosférica, donde otros gases no tienen mayor capacidad de absorción (7-13 μm).

Por su parte, el vapor de agua absorbe radiación de longitud de onda menor de 8 μm y mayor de 18 μm ; por lo tanto, si bien contribuye al efecto invernadero, tiene menor impacto sobre la ventana de radiación atmosférica entre 7 y 12 μm .

TABLA 3.1: PRINCIPALES GASES INVERNADERO Y SUS CARACTERÍSTICAS

PRINCIPALES GASES INVERNADERO	CONCENTRACIÓN ATMOSFÉRICA (ppm)	INCREMENTO ANUAL %	CONTRIBUCIÓN ACTUAL AL EFECTO INVERNADERO %	RADIACIÓN ABSORBIDA μm
CO ₂	355	0,4	57	2,7 4,3 15
CH ₄	1,68	1,0	12	3 7,7
N ₂ O	0,31	0,2	6	4,5 7,8
CFC	2,2 10 ⁻³	5,0	25	7-20

En las últimas décadas, la atención ha estado principalmente centrada en las emisiones de CO₂, ya que están directamente relacionadas con la generación de energía a partir de combustibles fósiles. El aumento de la actividad industrial genera un incremento de las necesidades energéticas y, por consecuencia, acelera la tasa de emisión de CO₂. El ciclo natural del carbono tiene como pilar la actividad fotosintética. Durante la fotosíntesis, el CO₂ es utilizado para sintetizar moléculas orgánicas, en presencia de energía solar, liberando O₂ como subproducto. De este modo, el carbono es removido constantemente de la atmósfera y asimilado por las plantas terrestres y organismos fotosintéticos acuáticos. Así se establece un balance entre las emisiones de CO₂ (debido a la combustión y a la respiración de los organismos vivos) y el consumo de CO₂ por fotosíntesis. El efecto combinado de aumento de la generación de CO₂ en la actividad humana, y la destrucción de áreas boscosas, resulta en un desequilibrio que aumenta la concentración media de CO₂ en la atmósfera. La implementación de fuentes alternativas de energía (es decir, no basadas en la combustión de material orgánico), medidas de conservación y aumento de eficiencia energética, sumada a extensos programas de reforestación, pueden revertir la tendencia actual.

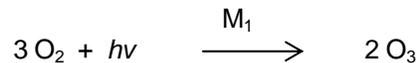
- **Destrucción de la Capa de Ozono**

El ozono (O₃) presente en la estratosfera absorbe los rayos ultravioletas. Aunque está presente en pequeñas cantidades (del orden de 10⁻⁶ ppm), su presencia es vital para la vida sobre la Tierra, porque absorbe radiación UV-B entre 0,20 y 0,32 μm , que es letal para los seres vivos. Se ha demostrado que un aumento de la exposición a la radiación ultravioleta tiene serios efectos directos e indirectos sobre la salud humana (mutaciones y cáncer a la piel, riesgo de cataratas, afecta el sistema inmunológico humano). Aparte de estos efectos directos sobre los seres humanos, la exposición a niveles elevados de radiación UV, afecta también el desarrollo de otras especies terrestres y acuáticas. Por ejemplo, se ha demostrado que la productividad de las cosechas disminuye significativamente debido al aumento de la radiación UV. Por su parte, el fitoplancton y otras especies marinas son afectadas debido a que pasan la mayor parte de su existencia cerca de la superficie del agua.

La gravedad de estos efectos adversos sobre los seres humanos, y todas las otras formas de vida expuestas a la radiación solar, depende de la concentración de ozono

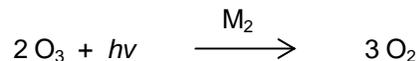
en la estratosfera, ya que éste actúa como un verdadero escudo protector contra las radiaciones ultravioleta.

A su vez, la concentración de O₃ en la atmósfera está determinada por el balance entre los procesos físico-químicos de formación y destrucción de ozono. El proceso de formación natural del O₃, tiene como base la reacción del oxígeno con la radiación UV, en presencia de un catalizador; la reacción neta es:



donde el catalizador, M₁, representa una tercera molécula (O₂ o N₂) que absorbe la energía liberada por la reacción y $h\nu$ es la radiación ultravioleta.

La destrucción natural del ozono se debe a la fotólisis, en presencia de un catalizador:



Este proceso incluye una compleja secuencia de reacciones en cadena, donde se generan radicales libres. El efecto neto es la formación de una capa de ozono y la absorción de radiación UV. El calentamiento que resulta de este proceso es responsable de la inversión térmica que caracteriza a la estratósfera, lo que le otorga una alta estabilidad a la atmósfera, y permite un largo tiempo de residencia a los contaminantes estratosféricos.

Ciertos contaminantes atmosféricos (por ejemplo, óxidos de nitrógeno, cloro, bromo), catalizan las reacciones de destrucción del ozono, y cada una de estas moléculas puede destruir miles de moléculas de O₃ antes de perder su poder catalítico.

Afortunadamente, gran parte de los contaminantes gaseosos son absorbidos por las lluvias, o destruidos en reacciones de oxidación fotolítica, antes de que lleguen a la estratósfera. Solamente los más insolubles en agua y químicamente más estables, pueden alcanzar la estratósfera (especialmente los CFC's). El perfil vertical de concentración de ozono refleja esta situación, encontrándose los mayores niveles en las capas superiores de la estratósfera.

Sin embargo, existe clara evidencia de que tanto la concentración como el espesor de la capa de ozono están disminuyendo significativamente, con el consiguiente aumento de la intensidad de radiación UV-B, que llega a la superficie terrestre. Aparte de los efectos sobre la vida ya mencionados, la presencia de radiación UV-B cerca de la superficie promueve la formación de ozono a bajas alturas. En las áreas urbanas, el ozono participa en reacciones fotoquímicas con otros contaminantes gaseosos (ej.: hidrocarburos) generando subproductos dañinos para la salud. Esto es de vital importancia en la formación del smog fotoquímico en las grandes ciudades.

El "agujero de ozono" sobre la Antártica, que aparece en la primavera Austral a nivel del vórtice polar, ilustra la gravedad de la situación. Chile y Argentina son

particularmente afectados por tal fenómeno, constatándose bajas concentraciones de ozono sobre su territorio austral durante dicho período. Los efectos de largo plazo de estos fenómenos aún son impredecibles, aunque su gravedad está fuera de dudas.

- **Los CFC y su Impacto Ambiental Global**

En su definición más general, el término CFC se refiere a un conjunto de compuestos orgánicos de bajo peso molecular, cuyos átomos de hidrógeno han sido reemplazados por átomos de halógenos (fluor, cloro, bromo). A diferencia de todos los otros contaminantes atmosféricos, los CFC no se generan naturalmente, sino que son sintetizados industrialmente.

Los CFC's totalmente halogenados son inertes, no-inflamables, de baja toxicidad e insolubles en agua. Ellos son los que presentan mayor impacto ambiental. Aquellos CFC's que poseen átomos de hidrógeno son menos estables y sufren descomposición antes de alcanzar la estratosfera.

Los CFC son utilizados, principalmente, para la formación de aerosoles y como refrigerantes. La empresa DuPont estableció el nombre de Freones para los CFC, con un sistema de numeración que indica la cantidad de átomos de C, H y F ⁴.

Aquellos compuestos que además contienen bromo, se denominan halones. A pesar de que la producción mundial de halones es pequeña en relación al resto, su efecto ambiental es serio, debido al alto poder catalítico del bromo.

TABLA 3.2: PRINCIPALES CARBONOS HALOGENADOS

PRODUCTO	FÓRMULA	PRODUCCIÓN MUNDIAL (1985) TON/AÑO	PRINCIPALES USOS
CFC-11	CFCl ₃	341.500	Aerosoles, espumas, refrigerantes
CFC-12	CF ₂ Cl ₂	443.700	Aerosoles, refrigerantes
CFC-113	C ₂ F ₃ Cl ₃	163.200	Solventes en electrónica
Halón-1301	CF ₃ Br	25.000	Extintores de llama
Halón-1211	CF ₂ ClBr		
Halón-2402	C ₂ F ₄ Br ₂		

Aparte de su aporte al efecto invernadero mencionado anteriormente, la importancia ambiental de los CFC radica en su gran estabilidad química e insolubilidad en agua, lo que les permite llegar a las capas superiores de la estratosfera, donde con el tiempo sufren fotólisis, debido a la intensa radiación UV (en el rango 0,19-0,22 μm). Los átomos de halógeno generados (principalmente cloro y bromo) participan como potentes catalizadores de las reacciones de destrucción del ozono. Cabe destacar que un átomo de bromo es 30 a 120 veces más activo que el cloro en su efecto anti

⁴ Para determinar la fórmula química de un CFC a partir de su numeración se debe sumar 90 a dicho número. El primer dígito (izquierda) corresponde al número de átomos de C en la molécula; el dígito del medio corresponde al número de átomos de H, mientras que el dígito de la derecha indica el número de átomos de F. El resto de los enlaces con el carbono está cubierto por átomos de Cl.

ozono. Basta que exista una parte por billón de estos gases traza, para que la concentración de ozono estratosférico cambie significativamente. Debido a su gran estabilidad, los CFC tienen vidas medias del orden de 60-200 años, lo que agrava aún más su impacto ambiental de largo plazo.

En 1974, Molina y Rowland publicaron en la revista *Nature* las primeras evidencias científicas del efecto destructor de O₃ de los CFC usados en aerosoles. En ese entonces, el consumo de CFC-11 y CFC-12 en aplicaciones de aerosoles en USA era del orden de 200.000 ton/año. Como respuesta, en 1979 la Agencia de Protección Ambiental de EEUU (EPA) prohibió el uso de esos CFC en aerosoles no esenciales. En la actualidad, el consumo de CFC en esa aplicación en USA es de alrededor de 10.000 ton/año. Sin embargo, el uso de CFC en otras aplicaciones ha aumentado considerablemente.

En casi todos los usos de CFC, existen sustitutos de menor impacto ambiental global. Sin embargo, en muchos casos los sustitutos imponen costos adicionales, debido al mayor precio del producto o a las dificultades de uso. Por ejemplo, los halones pueden ser reemplazados como extintores de incendios, por sistemas en base a CO₂ combinado con sistemas de rociado y espumas livianas. Los aislantes térmicos en base a fibra de vidrio, pueden sustituir las espumas rígidas de poliestireno (que requieren CFC para su manufactura), aún cuando son menos eficientes por unidad de espesor. En aplicaciones de aerosoles, los CFC han sido reemplazados en parte por isobutano, propano, CO₂ o sistemas de bombeo. En el área de refrigerantes, existen varios sustitutos, tales como amoniaco, isobutano, CO₂, cloruro de metilo, etc. Sin embargo, estos compuestos presentan problemas debido a su toxicidad, inflamabilidad, o a requerimientos de alta presión de operación, imponiendo mayores costos en las instalaciones.

El 16 de Septiembre de 1987, en Montreal (Canadá), 35 países (incluyendo EEUU, la Unión Europea y Chile) firmaron un Protocolo sobre el control de sustancias que destruyen la capa de ozono, estableciendo que para 1998 las emisiones debían ser reducidas a un 50% por debajo de los niveles existentes en 1986. Los gases bajo escrutinio del Protocolo son: CFC-11, CFC-12, CFC-113, CFC-114, CFC-115 y los halones. El Protocolo de Montreal considera una serie de incentivos para reducir los efectos económicos adversos de dichas restricciones. El acuerdo promueve la cooperación entre países signatarios, en las áreas de investigación para formular alternativas tecnológicas y nuevos productos. A su vez, se facilita el acceso a la información sobre producción y consumo de los compuestos bajo control y se están desarrollando diferentes iniciativas para una regulación más eficiente.

Desgraciadamente, aún cuando el Protocolo de Montreal se cumpliera en su totalidad, la vida media de los CFC es muy larga y su concentración media en la atmósfera seguirá aumentando o se mantendrá por muchos años. Las proyecciones demuestran que, incluso con una reducción del 50% respecto de los consumos en 1986, la concentración media de CFC-12 (actualmente del orden de $4 \cdot 10^{-4}$ ppm) se duplicará en los próximos 60 años (la vida media del CFC-12 es de 150 años). Las mismas proyecciones demuestran que se requeriría una reducción del orden de 87% para lograr mantener constante la concentración actual de CFC-12. Por otra parte, la concentración de CFC-11 parece haber llegado a un nivel estacionario, del

orden de $2,5 \cdot 10^{-4}$ ppm, lo que demuestra la efectividad de las medidas acordadas en el Protocolo de Montreal.

3.1.3) Transporte y Destino de los Contaminantes Atmosféricos

La calidad del aire local varía ampliamente, aún cuando las tasas de emisión de contaminantes gaseosos permanezcan relativamente constantes, debido a que una gran parte de los contaminantes atmosféricos son eliminados a través de varios mecanismos físicos y químicos naturales.

- **Dispersión Física**

Los vientos permiten la dispersión de los gases arrastrándolos en dirección horizontal y vertical. La facilidad con que los contaminantes se dispersan verticalmente, está determinada principalmente, por la forma como la temperatura del aire varía con la altura, lo que es resultante de un complejo balance térmico local. La capacidad de dilución del ambiente aéreo está limitada por la velocidad del viento y por la altura que pueden alcanzar las emisiones gaseosas.

Debido a la dispersión, la concentración del contaminante a nivel de suelo varía con la distancia desde el punto de emisión, existiendo un punto o zona de mayor concentración, que representa la zona de máximo impacto debido a tales emisiones. Más adelante se revisan los modelos utilizados para describir estos procesos.

- **Absorción Debido a la Lluvia.**

Los componentes de mayor solubilidad en agua serán eliminados por las lluvias y transferidos al suelo y a los cuerpos acuáticos. Su impacto dependerá de la cantidad de contaminantes absorbidos, y las características del área afectada por las precipitaciones. Los sólidos finos serán arrastrados fácilmente por las lluvias, sin que presenten un mayor impacto ambiental posterior. Sin embargo, la lluvia ácida (pH 4-6), formada debido a la absorción de óxidos de azufre y nitrógeno, puede afectar seriamente las tierras forestales y de cultivo, al bajar el pH del suelo, inhibiendo o destruyendo los microorganismos y la flora existente. En ciertos casos, dichos efectos trascienden las fronteras nacionales; por ejemplo, las emisiones de SO_x y NO_x provenientes de las centrales termoeléctricas británicas (en base a carbón mineral) han tenido efectos desastrosos sobre los bosques y terrenos agrícolas escandinavos, debido a la lluvia ácida generada. Las precipitaciones ácidas sobre las aguas superficiales pueden afectar su calidad, particularmente en aquellos casos de altas tasas de emisión. Los lagos son los principales afectados por la lluvia ácida, debido a la gran superficie expuesta a las precipitaciones, y a los largos tiempos de residencia que los caracterizan. Por su parte, la lluvia ácida puede tener poco efecto sobre la vida marítima, debido a la alta capacidad de autorregulación del pH que tiene el agua de mar.

- **Transformaciones Fotoquímicas**

Los procesos fotoquímicos atmosféricos transforman los contaminantes volátiles a través de una compleja cadena de reacciones fotoquímicas. Tal como se describió en secciones anteriores, dichas reacciones pueden dar origen a contaminantes secundarios nocivos, particularmente en áreas urbanas con altos niveles de contaminación.

3.1.4) Modelos de Dispersión Atmosférica

Además de la cantidad de contaminantes emitidos, la calidad del aire en un lugar dado depende, en gran medida, de las características dinámicas de la atmósfera local. Dichos tópicos caen dentro del ámbito de la meteorología. A continuación se introducirá en forma muy general aquellos conceptos relevantes al transporte de los gases en la atmósfera.

El perfil vertical de temperatura del aire, es un factor determinante en el mecanismo de dispersión atmosférica de los contaminantes. Una de las características de la troposfera es la disminución gradual de la temperatura con la altura. Cuando una pequeña porción de aire está más caliente que el aire en su entorno, su menor densidad lo hace ascender. En la medida que asciende, experimenta una dilatación, debido a la menor presión atmosférica que existe a mayor altura. Si se dilata adiabáticamente, su temperatura disminuye, generándose un perfil de temperatura decreciente con la altura. El gradiente de temperatura adiabático ideal del aire seco es de aproximadamente $-1^{\circ}\text{C} / 100 \text{ m}$. Es decir, por cada 100 m de altura, la temperatura ambiente disminuye en 1°C .

En la realidad, el aire tiene un contenido de humedad significativo y, al ascender, parte del vapor de agua presente en el aire sufre condensación, por lo que el gradiente de temperatura adiabático promedio es del orden de $-0,65^{\circ}\text{C}/100 \text{ m}$.

- **Estabilidad atmosférica**

Los niveles de estabilidad atmosférica se determinan comparando el gradiente de temperatura real con respecto al gradiente de temperatura adiabático ideal. La estabilidad se define en términos de la facilidad o dificultad impuesta por la atmósfera para el movimiento vertical de las masas de aire:

- Una atmósfera es estable cuando impide los movimientos verticales de aire.
- Una atmósfera es inestable, cuando se favorece el movimiento ascendente de las masas de aire.

Cuando la temperatura aumenta con la altura (fenómeno denominado *inversión térmica*), la densidad de la masa de aire más cercana al suelo es mayor que la de la masa superior, por lo que no se produce un movimiento ascendente del aire, dificultando la dispersión de los contaminantes. Ello representa una condición de alta estabilidad atmosférica.

Las inversiones térmicas se pueden generar por diferentes razones:

- *Inversión por radiación*: Típicamente, se origina durante las noches de invierno, cuando la capa de aire cercana al suelo se enfría más rápidamente que las capas vecinas más altas. Esta inversión térmica tiende a desaparecer durante el día, cuando la radiación solar calienta la superficie.
- *Inversión por subsidencia*: Se debe a la presencia de sistemas de alta presión (anticiclones). El movimiento descendente de las grandes masas de aire, genera un calentamiento (por compresión) del aire cercano a la superficie terrestre. La inversión térmica de este tipo puede durar días o, incluso, meses. Este fenómeno es bastante complejo, ya que involucra la dinámica de la atmósfera a escala planetaria.
- *Inversión frontal*: Se origina cuando se encuentran frentes cálidos y fríos, donde la masa de aire frío circula bajo la capa de aire caliente.

Las condiciones geográficas y topográficas (ej.: las brisas marinas, la presencia de valles, los vientos de las laderas de los cerros, entre otros) tienen una gran influencia sobre el perfil térmico.

La presencia de grandes concentraciones urbanas también afecta el perfil vertical de temperatura, particularmente cerca de la superficie. La alta densidad de fuentes de calor (sistemas de calefacción, motores de combustión interna, etc), la capacidad de las estructuras urbanas para mantener el calor y las mayores concentraciones de CO₂ en las cercanías del suelo, alteran el perfil térmico. En muchos casos, se constata la creación de corrientes ascendentes en los centros de mayor actividad urbana, descendiendo en la periferia, desde donde circula en forma radial de vuelta hacia dichos centros, formando anillos de convección.

Para fines de modelación, la estabilidad atmosférica se clasifica en base a los criterios establecidos por Pasquill y Gifford (1961), que consideran 6 categorías de estabilidad, de acuerdo a la velocidad del viento, nubosidad y radiación solar:

A	=	Atmósfera muy inestable
B	=	Atmósfera moderadamente inestable
C	=	Atmósfera levemente inestable
D	=	Atmósfera neutra
E	=	Atmósfera moderadamente estable
F	=	Atmósfera estable

La Tabla 3.3, muestra las condiciones meteorológicas correspondientes a cada clase de estabilidad atmosférica, de acuerdo a Pasquill y Gifford:

TABLA 3.3: CLASIFICACIÓN DE ESTABILIDAD ATMOSFÉRICA DE ACUERDO A PASQUILL Y GIFFORD

VELOCIDAD DEL VIENTO (m/s) (a 10 m de altura)	RADIACIÓN SOLAR DURANTE EL DÍA			NUBOSIDAD NOCTURNA	
	Fuerte	Moderada	Baja	Nublado (>4/8)	Claro (<3/8)
< 2	A	A - B	B	E	F
2 - 3	A - B	B	C	E	F
3 - 5	B	B - C	C	D	E
5 - 6	C	C - D	D	D	D
> 6	C	D	D	D	D

- **Emisiones Gaseosas desde Chimeneas**

La forma y extensión de la pluma (o penacho) de gases emitidos desde una chimenea depende del diseño de ésta, de la velocidad y temperatura de salida de los gases, del tipo de contaminantes emitidos, del relieve y de la naturaleza del suelo, y de las condiciones meteorológicas locales. Las Figuras siguientes, muestran 4 diferentes ejemplos de tipos de plumas, para distintas clases de estabilidad atmosférica.

Es importante predecir el comportamiento de una pluma, para evaluar el efecto de la emisión sobre la calidad del aire. El modelo más utilizado está basado en la suposición de que la concentración promedio del contaminante en la dirección perpendicular al viento, desde la fuente de emisión, presenta una distribución normal de Gauss.

Si observamos la pluma en un instante dado, podemos constatar que ella tiene una forma irregular, producto de la dinámica atmosférica en ese momento. Por ejemplo, puede presentar una forma serpenteante, tal como se muestra en las Figuras 3.2 y 3.6. Un tiempo más tarde, la pluma puede haber cambiado totalmente su forma. Si se registran las variaciones de la forma de la pluma en el tiempo, se podría obtener una envoltura promedio representativa. El perfil de concentración promedio presentaría mayor valor de concentración en la zona central, disminuyendo hacia la periferia de la envoltura, de un modo similar al de una distribución Gaussiana.

En su formulación matemática más sencilla, el modelo supone condiciones de estado permanente, es decir, la tasa de emisión de contaminantes, su temperatura y velocidad de salida, así como las condiciones meteorológicas, se mantienen constantes. Además, se supone que el contaminante no sufre transformaciones químicas (es decir, es un contaminante conservativo), ni se absorbe en la superficie del suelo (de hecho, el modelo supone que el contaminante se refleja totalmente una vez que toca el suelo). Esta última condición no es aplicable en el

caso de la dispersión de material particulado.

El sistema de coordenadas tridimensional mostrado en la Figura 3.6, presenta la chimenea situada en el origen, con el viento en la dirección X. Interesa predecir la concentración a nivel del suelo, es decir, cuando $Z = 0$. Dicha concentración en una posición (X , Y) dada, se obtiene a partir de:

$$C_{x,y} = \frac{Q}{\pi v \sigma_y \sigma_z} \left(\exp\left(\frac{-H^2}{2\sigma_z^2}\right) \right) \left(\exp\left(\frac{-Y^2}{2\sigma_y^2}\right) \right)$$

donde:

$C_{x,y}$	=	concentración a nivel del suelo, en el punto X,Y (mg/m ³)
X	=	distancia en la dirección del viento desde el punto de emisión de los gases (m)
Y	=	distancia horizontal desde el eje central de la pluma (m)
Q	=	flujo másico de contaminantes emitidos (mg/s)
h	=	altura de la chimenea (m)
H	=	altura efectiva de elevación de la pluma (m)
V	=	velocidad del viento a la altura efectiva de la pluma (m/s)
σ_y	=	coeficiente de dispersión horizontal (m)
σ_z	=	coeficiente de dispersión vertical (m)

Si se requiere la concentración del contaminante en la dirección del viento, a lo largo del eje central de la pluma, se utiliza la expresión anterior con $Y = 0$.

La velocidad del viento generalmente se mide en anemómetros ubicados a 10 metros de altura. Para estimar la velocidad del viento a una altura H dada, a partir de una velocidad v_0 , medida a una altura H_0 , se puede utilizar la siguiente relación:

$$v = v_0 \left(\frac{H}{H_0} \right)^p$$

donde:

p = es un parámetro adimensional, depende de la estabilidad atmosférica.

TABLA 3.4: PARÁMETRO ADIMENSIONAL “p” EN FUNCIÓN DE LA ESTABILIDAD.

CLASE DE ESTABILIDAD	PARÁMETRO P
A, B	0,15
C	0,20
D	0,25
E	0,40
F	0,60

Los coeficientes σ_y y σ_z representan la desviación estándar de la curva de

distribución normal de concentración (horizontal y vertical, respectivamente). Estos se deben obtener a partir de datos empíricos, y varían con la distancia desde el punto de emisión y con las condiciones topográficas. A modo de referencia, se presentan dos correlaciones publicadas en Masters (1991):

$$\begin{aligned}\sigma_Y &= a X^{0,894} && \text{(m)} \\ \sigma_Z &= c X^d + f && \text{(m)}\end{aligned}$$

donde X se expresa en kilómetros, para obtener los coeficientes de dispersión en metros. Las constantes a , b , c , d y f , se muestran en la Tabla 3.5:

TABLA 3.5: VALORES DE LAS CONSTANTES a-f PARA EL CÁLCULO DE LOS COEFICIENTES DE DISPERSIÓN

ESTABILIDAD	X < 1 km				X > 1 km		
	a	c	d	f	c	d	f
A	213	440,8	1,94	9,3	459,7	2,09	-9,6
B	156	106,6	1,15	3,3	108,2	1,10	2,0
C	104	61,0	0,91	0	61,0	0,91	0
D	68	33,2	0,73	-1,7	44,5	0,52	-13,0
E	51	22,8	0,68	-1,3	55,4	0,31	-34,0
F	34	14,4	0,74	-0,4	62,6	0,18	-48,6

La Tabla 3.6 ilustra algunos valores típicos de coeficientes de dispersión calculados a partir de dichas correlaciones, para diferentes condiciones.

La elevación efectiva de la pluma, H , depende de las condiciones meteorológicas, de la temperatura y velocidad de salida de los gases, y del diseño de la chimenea. Las relaciones presentadas en literatura utilizan un factor de flujo convectivo, F , definido como:

$$F = g r^2 v_G \left(1 - \frac{T_A}{T_G} \right)$$

- F = factor convectivo (m^4/s^3)
- g = aceleración de gravedad ($9,8 \text{ m/s}^2$)
- r = radio interno de la chimenea (m)
- v_G = velocidad de salida de los gases (m/s)
- T_G = temperatura de salida de los gases (K)
- T_A = temperatura del aire (K)

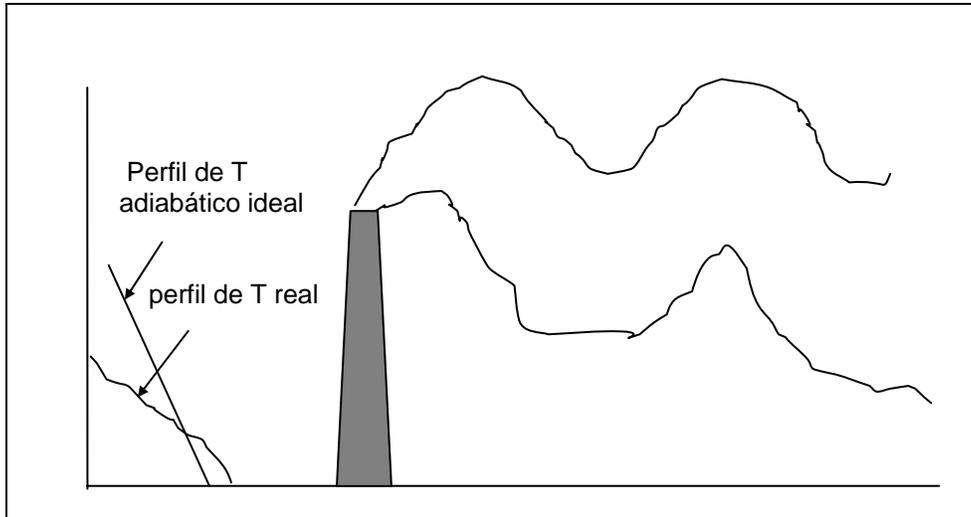


FIGURA 3.2: DISPERSIÓN EN FORMA SERPENTEANTE. ATMÓSFERA INESTABLE, BUENA DISPERSIÓN DE LOS GASES. SIN EMBARGO, LA PLUMA PUEDE TOCAR EL SUELO POR CORTOS INTERVALOS.

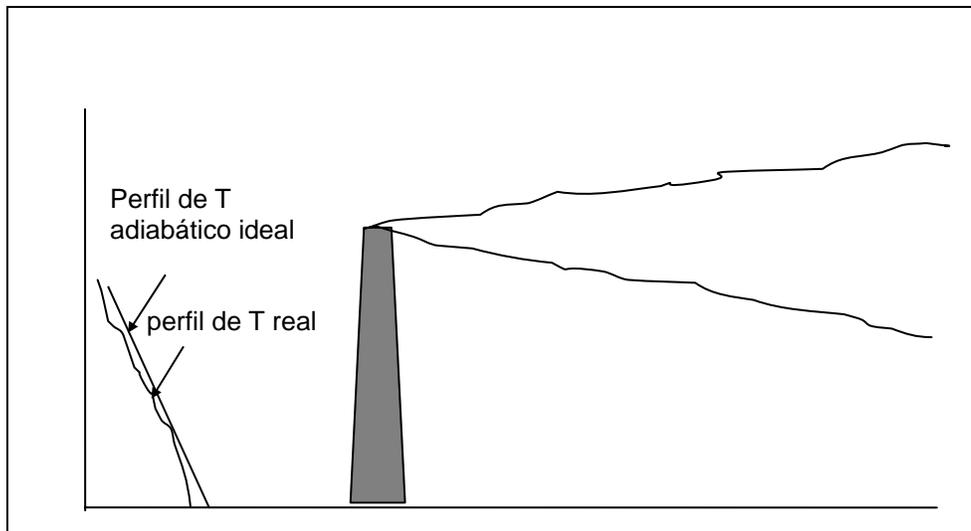


FIGURA 3.3: DISPERSIÓN EN FORMA DE CONO. PERFIL DE TEMPERATURA SIMILAR AL PERFIL ADIABÁTICO IDEAL. ATMÓSFERA LEVEMENTE INESTABLE. LLEGA AL SUELO A MAYOR DISTANCIA.

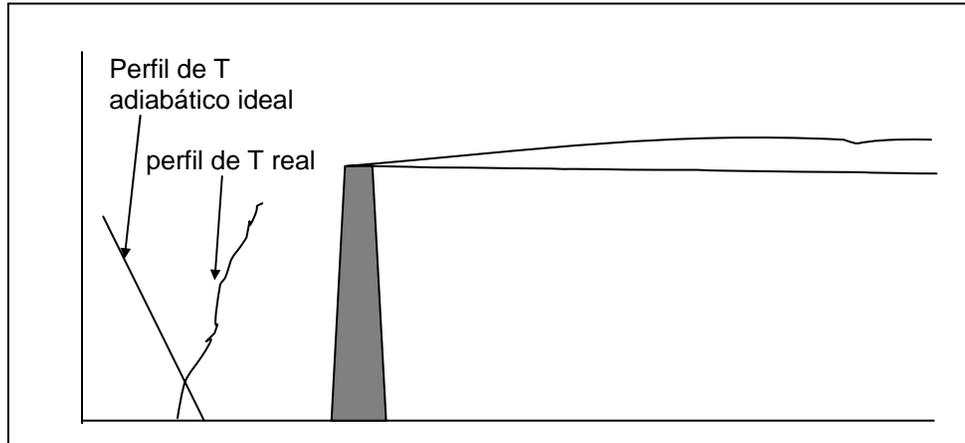


FIGURA 3.4: DISPERSIÓN EN FORMA DE ABANICO. PERFIL DE TEMPERATURA INVERTIDO. ATMÓSFERA ESTABLE. POBRE DISPERSIÓN VERTICAL. TRANSPORTE DE LOS CONTAMINANTES A GRAN DISTANCIA ANTES DE MEZCLARSE.

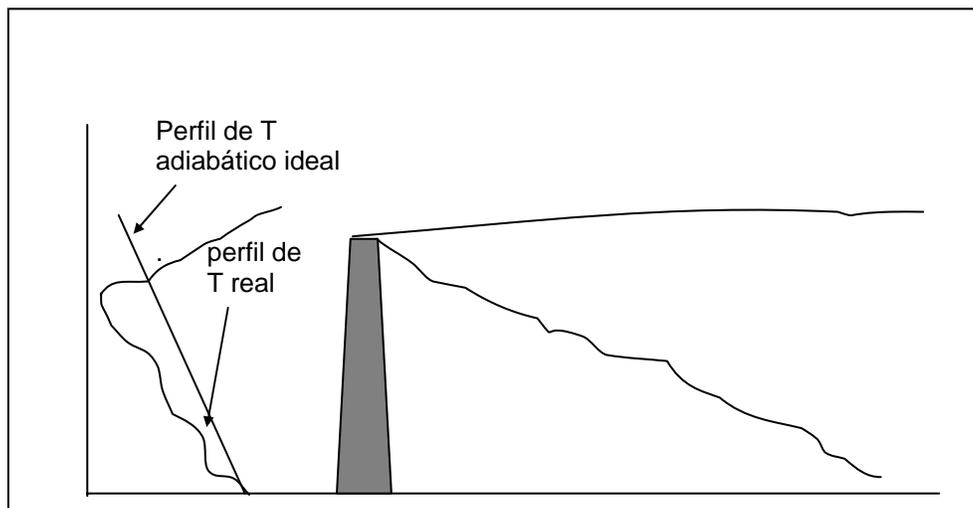


FIGURA 3.5: DISPERSIÓN EN FORMA DE FUMIGACIÓN. INVERSIÓN TÉRMICA QUE IMPIDE ASCENSO DE LA PLUMA. LA PLUMA CAE RÁPIDAMENTE AL SUELO.

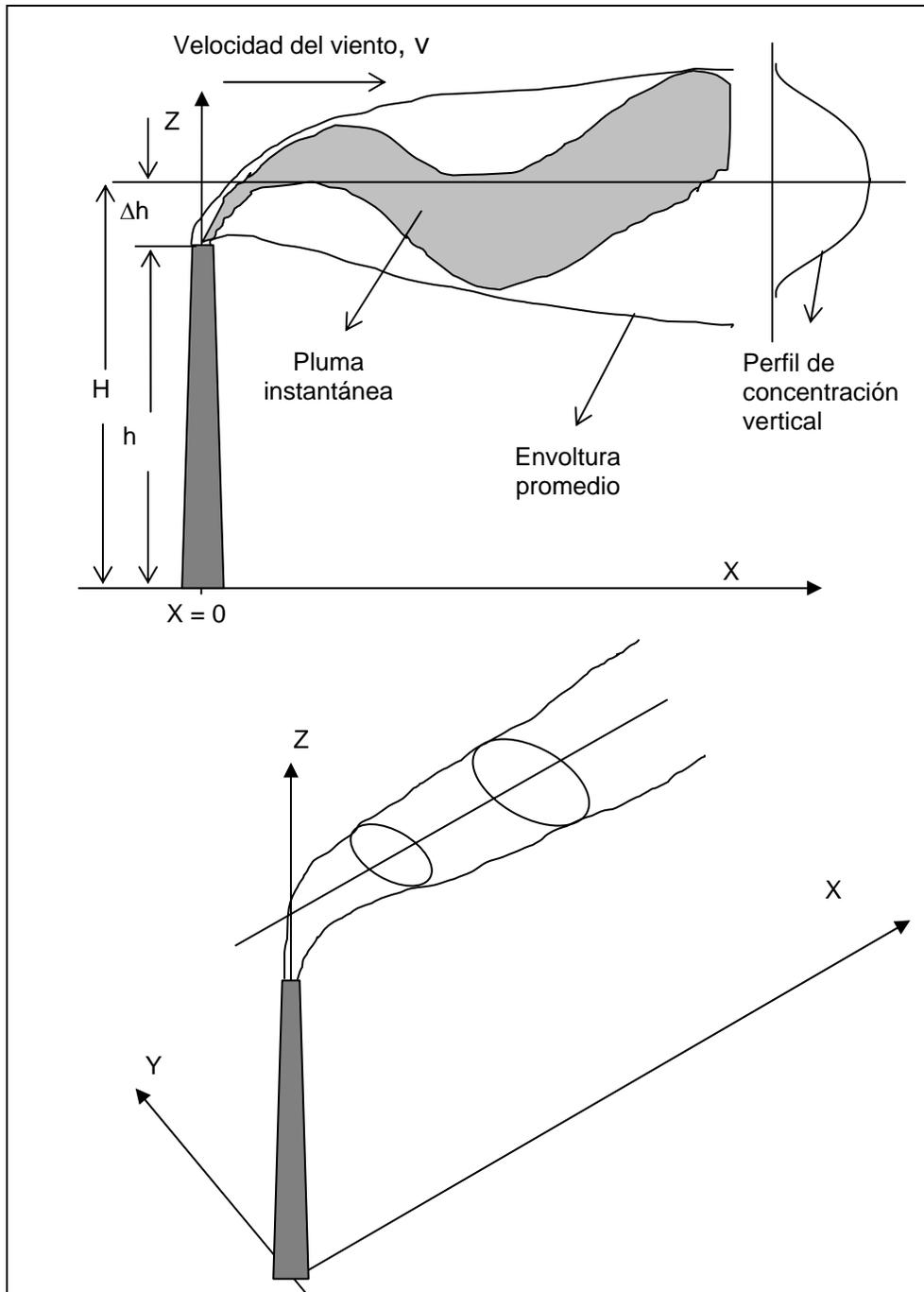


FIGURA 3.6: PRESENTA LA CHIMENEA SITUADA EN EL ORIGEN, CON EL VIENTO EN LA DIRECCIÓN X.

TABLA 3.6: COEFICIENTES DE DISPERSIÓN (σ) EN FUNCIÓN DE LA DISTANCIA DE LA FUENTE Y DE LA ESTABILIDAD ATMOSFÉRICA

Distancia X (km)	Clase de Estabilidad											
	σ_y						σ_z					
	A	B	C	D	E	F	A	B	C	D	E	F
0,2	51	37	25	16	12	8	29	20	14	9	6	4
0,4	94	69	46	30	22	15	84	40	26	15	11	7
0,6	135	99	66	43	32	22	173	63	38	21	15	9
0,8	174	128	85	56	41	28	295	86	50	27	18	12
1	213	156	104	68	50	34	450	110	61	31	22	14
2	396	290	193	126	94	63	1953	234	115	51	34	22
4	736	539	359	235	174	117	-	498	216	78	51	32
8	1367	1001	667	436	324	218	-	1063	406	117	70	42
16	2540	1860	1240	811	602	405	-	2274	763	173	95	55
20	3101	2271	1514	990	735	495	-	2904	934	196	104	59

Para clases de estabilidad **neutra o inestable** (A-D), se utiliza la siguiente ecuación para estimar el salto de la pluma:

$$\Delta h = \frac{1,6 F^{1/3} x_f^{2/3}}{v_h}$$

donde:

Δh = es el salto de la pluma, (es decir, H – h) (en metros)
 x_f = es la distancia en la dirección del viento hasta el punto en que la pluma alcanza su altura máxima (m)
 v_h = velocidad del aire a la altura de la chimenea (m/s)

La distancia x_f se obtiene de:

$$x_f = 120 F^{0,4} \text{ para } F > 55 \text{ (m}^4/\text{s}^3\text{)}$$

$$x_f = 50 F^{5/8} \text{ para } F < 55 \text{ (m}^4/\text{s}^3\text{)}$$

Para atmósferas **estables** (categorías E y F), el salto de la pluma se obtiene de:

$$\Delta h = 2,4 \left(\frac{F}{v S} \right)^{1/3}$$

donde S es un parámetro relacionado con la estabilidad, definido como (en unidades s^{-2}):

$$S = \frac{g}{T_A} \left(0,01 + \frac{dT_A}{dz} \right)$$

donde la derivada dT_A/dz representa el gradiente de temperatura del aire, expresado en ($^{\circ}\text{C}/\text{m}$).

- **Dispersión Bajo Condiciones de Inversión Térmica**

El desarrollo del modelo Gaussiano mostrado anteriormente no considera la existencia de una inversión térmica sobre la chimenea. El modelo Gaussiano se puede modificar para tomar en cuenta el efecto de reflejo que tiene la capa de inversión térmica. Una modificación utilizada a menudo para condiciones de inversión térmica, es la siguiente:

$$C_{x,y} = \frac{Q}{\sqrt{2\pi} v \sigma_y L} \left(\exp\left(\frac{-Y^2}{2\sigma_y^2}\right) \right)$$

donde L es la altura de la capa de inversión térmica (m). Esta expresión es válida para distancias mayores que el doble de la distancia en la dirección del viento,

donde la envoltura superior de la pluma se encuentra con la capa de inversión. Esta distancia coincide con la distancia a la cual el coeficiente de dispersión σ_z es igual a $\sigma_z = 0,47 (L - H)$.

- **Modelos para Dispersión de Fuentes Lineales**

En algunos casos, interesa modelar el efecto de fuentes de contaminantes atmosféricos de tipo lineales, por ejemplo, en el caso de gases emitidos por los vehículos que transitan en las carreteras.

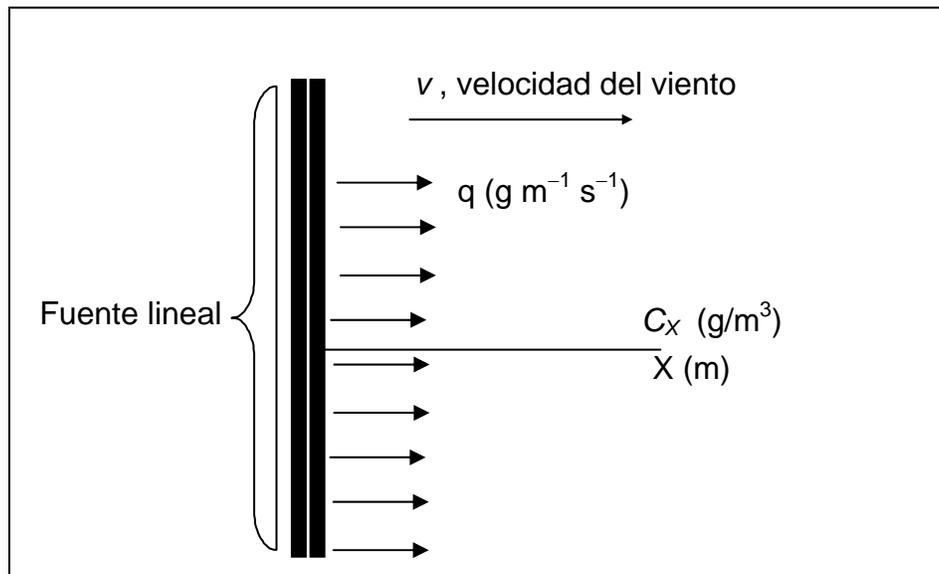


FIGURA 3.7: MODELACIÓN DEL EFECTO DE FUENTES CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS DE TIPO LINEAL.

La concentración a nivel del suelo, C_x , a una distancia X en la dirección del viento, cuando éste es perpendicular a la fuente lineal (Figura 3.7), se puede estimar a partir de:

$$C_x = \frac{2q}{\sqrt{2\pi} v \sigma_z}$$

donde q es la tasa de emisión por unidad lineal de fuente ($\text{g s}^{-1} \text{m}^{-1}$) y v es la velocidad del viento, perpendicular a la fuente lineal.

3.2) CONTAMINACIÓN DEL AGUA

El agua juega un papel fundamental en el funcionamiento de la Biósfera. Tal como se señaló en el Capítulo 2, el agua presenta propiedades que le permiten ser un excelente medio de transporte de energía y materia. La energía solar permite mantener un ciclo hidrológico que tiene un efecto determinante sobre todos los demás ciclos biogeoquímicos.

A su vez, el agua es un fluido vital, sin el cual la existencia de la vida, como se manifiesta en la Tierra, no es posible. Sin embargo, sobre el 97% del agua existente en nuestro planeta se encuentra en los océanos. La Historia del Hombre nos demuestra que el agua, ha sido uno de los principales recursos limitantes de su desarrollo económico y social. Cada vez que la disponibilidad de agua se redujo más allá de un nivel crítico, sea por razones climáticas o por acción del hombre, languideció también el grupo humano que se nucleó en torno a dicho cuerpo de agua.

Desde el punto de vista de la sociedad humana, el agua se utiliza en diferentes roles, principalmente:

- Agua para consumo humano directo (vital).
- Agua para usos domésticos (lavado, sanitario, cocina).
- Agua para usos industriales (medio térmico, transporte de materiales, medio de reacción, solvente, lavado).
- Agua para fines de regadío agrícola, en actividad pecuaria, forestal, etc.
- Agua como medio para la producción de especies marinas (peces, algas, moluscos, etc.).
- Agua como recurso para la generación de energía eléctrica.
- Agua como medio recreacional.
- Agua como medio receptor de los residuos de la actividad humana.

Aproximadamente un 42% del agua utilizada en EEUU se destina a producción agrícola, comparada con un 39% para generación hidroeléctrica; por su parte, la minería e industria sólo utilizan un 8% del total, mientras que el resto (11%) se consume en actividades domésticas y comerciales.

Todos estos usos del agua implican requerimientos de calidad y cantidad que deben ser mantenidos para garantizar su consumo sin daños a la salud de las personas y un desarrollo económico sustentable. Más aún, algunos de estos requerimientos implican intervención física directa sobre los cuerpos de agua, pudiendo modificar drásticamente su morfología y su caudal, con serias consecuencias para el equilibrio ecológico en el medio acuático.

La relativa escasez de este fluido vital, y su importancia determinante para el funcionamiento de los ecosistemas terrestres, motivan que el agua sea uno de los principales objetivos de protección ambiental de la sociedad moderna. A modo de ejemplo, cabe destacar que en el mundo existen más de 1.200 millones de seres

humanos que no tienen acceso directo a agua potable, y más del 20% de los peces de agua dulce están en peligro de extinción. En la actualidad, en todos los países las regulaciones de control ambiental establecen límites a las descargas de residuos líquidos que son vertidos en los cuerpos de agua; además, fijan estándares de calidad de agua de acuerdo a su potencial de uso.

3.2.1) Contaminantes Líquidos

El efecto de los residuos líquidos sobre los ecosistemas acuáticos depende, entre otros factores, de su composición química, de las características físicas y biológicas del efluente, además de las características del medio receptor acuático.

Los contaminantes en fase líquida incluyen un amplísimo rango de compuestos disueltos y suspendidos, orgánicos e inorgánicos. A continuación se resumen los efectos de los principales residuos que se vierten comúnmente en las aguas superficiales.

- **Material orgánico biodegradable disuelto**

Los compuestos orgánicos solubles biodegradables permiten mantener la actividad de microorganismos unicelulares heterótrofos (bacterias, hongos), que requieren de fuentes de carbono orgánico y que se alimentan por transporte a través de la membrana celular. Estos organismos acuáticos reciben, además, los compuestos derivados de la actividad biológica terrestre en las zonas aledañas a los cuerpos de agua, que son transportados por la escorrentía superficial o subterránea. Aquí se incluyen los compuestos generados a partir de la descomposición de especies muertas y del material que se descarga desde las riberas (frutos, ramas, excrementos, etc).

Cuando un nutriente entra al agua, los organismos aerobios consumen oxígeno disuelto como resultado de la actividad metabólica inducida. Así, el nutriente ejerce una demanda sobre la disponibilidad del oxígeno disuelto, denominada *Demanda Biológica de Oxígeno*. Si la cantidad de materia orgánica en el medio es muy alta, ello puede conducir a una disminución en la concentración de oxígeno disuelto. A niveles bajos de oxígeno disuelto (viz. 2-4 mg/l) los peces tienden a desaparecer y el ambiente acuático favorece a las especies anaeróbicas.

Problemas generados en las aguas anóxicas:

El metabolismo anaeróbico es mucho más lento que el proceso aeróbico. (típicamente, por más de un orden de magnitud) y de menor eficiencia, generando varios compuestos orgánicos intermedios (ej.: ácidos orgánicos, alcoholes, metano). Como resultado de la menor velocidad de consumo del material orgánico disuelto, éste se acumulará en el medio acuático, a menos que su ingreso al sistema acuático disminuya drásticamente.

Si los nutrientes disueltos entran al agua a una tasa tal, que el oxígeno disuelto se consume más rápidamente de lo que se puede reponer, el agua se desoxigena. Ningún aerobio obligado, desde los microbios hasta los peces, podrá sobrevivir en

dichas aguas. Así, los contaminantes orgánicos se acumularán, produciéndose anaerobiosis, lo que genera sustancias malolientes (ej.: sulfuros y aminas volátiles) y compuestos orgánicos parcialmente oxidados.

Aparte del mal olor, la anaerobiosis puede presentar problemas para la salud humana, ya que muchas bacterias anaerobias son patógenas (por ejemplo, tétano, botulismo). Cuando el agua contiene sulfatos disueltos, las bacterias anaerobias reductoras producen H_2S (corrosivo y venenoso). La conversión de mercurio inorgánico a organomercurio tiene lugar bajo condiciones anaerobias. La anaerobiosis genera compuestos orgánicos (ácidos orgánicos) que pueden ser inhibidores o tóxicos para los organismos heterotróficos. Generalmente, las aguas anóxicas pueden ser recuperadas si la entrada de contaminantes se detiene, permitiendo consumir anaeróbicamente los nutrientes remanentes y que el oxígeno transferido naturalmente restablezca los procesos aeróbicos.

- **Compuestos tóxicos:**

La población microbiana puede verse afectada debido a la presencia de contaminantes químicos tóxicos, por inhibición o muerte por envenenamiento. Diferentes organismos presentan distinta susceptibilidad a la presencia de tóxicos. Por ejemplo, el fenol es tóxico para casi todas las especies (razón por la cual se usa como desinfectante); sin embargo, ciertas bacterias (*Pseudomonas*) pueden usarlo como nutriente y descomponerlo, aún cuando su actividad es inhibida a altas concentraciones de fenol. Muchos componentes tóxicos pueden ser degradados por actividad química o bioquímica natural y, por lo tanto, su acción puede ser de relativa corta duración en el ecosistema.

Existen otros tóxicos, tales como los metales pesados o ciertos compuestos orgánicos, cuya toxicidad persiste, debido a que no son afectados por desactivación natural. Estos últimos, son los más difíciles de controlar, ya que por ser no degradables, se acumulan en el medio receptor y, a pesar de ser desechados a muy baja concentración, persisten y afectan la vida del sistema. En muchos casos se produce un aumento de la concentración de dichos contaminantes, cuando entran a formar parte de la cadena alimenticia de las diferentes especies del ecosistema. Por ejemplo, la concentración de DDT en los tejidos de los organismos superiores puede llegar a ser 50.000 veces más alta que la concentración en el medio receptor. En el caso de las dioxinas, dicho factor puede llegar a ser del orden de 5.000.

Por otra parte, los procesos naturales que ocurren en el medio receptor incrementan la toxicidad de algunos contaminantes primarios. Por ejemplo, el mercurio inorgánico es tóxico, pero los compuestos de organomercurio generados a partir de mercurio inorgánico en las aguas son 10 veces más venenosos.

Muchos de los compuestos tóxicos, no biodegradables, que se encuentran a muy bajas concentraciones, pueden ser ingeridos por los organismos vivientes de los diferentes niveles tróficos, depositándose en sus tejidos y entrando en la cadena alimenticia. Esto resulta en un aumento de la concentración del material contaminante a medida que es transferido a las especies superiores, lo que puede

tener consecuencias para la salud humana.

Nitrógeno y Fósforo

Las algas y plantas acuáticas utilizan la energía de la luz para sintetizar material orgánico complejo, a partir de CO₂, agua y otros materiales como nitrógeno (N) y fósforo (P). A su vez, el oxígeno generado por fotosíntesis es utilizado por los organismos heterótrofos y por algunos autótrofos oxidantes. Cuando este balance ecológico se altera debido a un aumento drástico de los nutrientes limitante, los resultados pueden ser desagradables o desastrosos. El aumento de la cantidad de nutrientes necesarios para la vida en un cuerpo de agua se denomina eutrofización⁵. La eutrofización puede generar serios problemas en los cuerpos de agua superficiales:

- La fotosíntesis implica la creación de materia orgánica a partir de materiales inorgánicos y, por lo tanto, la producción en grandes cantidades de sustancias orgánicas donde antes sólo existían unas pocas. Cuando las algas/plantas mueren, sus componentes se transforman en nutrientes orgánicos que ejercen una demanda de oxígeno
- Durante la acción fotosintética, el CO₂ es rápidamente consumido, generando un aumento del pH, que puede llegar sobre 10. Durante la noche, la reacción inversa ocurre, consumiendo oxígeno y generando CO₂, con lo cual el pH tiende a bajar. La actividad fotosintética tiene un significativo efecto sobre el nivel de pH del cuerpo de agua, ya que afecta la reacción reversible



- En ausencia de luz, muchos tipos de algas usan el oxígeno para obtener energía en la descomposición oxidativa de compuestos orgánicos previamente sintetizados. En efecto, almacenan la energía luminosa en la forma de energía química, para usarla en ausencia de luz (como una batería de automóvil). Así, mientras más fuerte sea el crecimiento de algas durante el día (lo que puede producir sobresaturación de oxígeno), mayor será la desoxigenación durante la noche. Cuando se produce una cubierta de algas flotantes muy gruesa, la transmisión de la luz se ve afectada, de manera que aún en el día, las algas en los niveles inferiores utilizan el oxígeno.

Finalmente, las masas de algas depositadas en las riberas, mueren y se pudren, produciendo condiciones anaeróbicas, presentando un peligro para la salud (ej.:

⁵ La eutrofización se define como el proceso de enriquecimiento de nutrientes en un cuerpo de agua. Es un fenómeno natural en el proceso de envejecimiento de lagunas y lagos (lagos eutróficos). Por el contrario, un cuerpo de agua joven, pobre en nutrientes necesarios para la vida, se denomina oligotrófico. El incremento de los nutrientes en la laguna permite una mayor producción de plantas y animales acuáticos. Dicho incremento en la materia orgánica genera a su vez un aumento del contenido orgánico de los sedimentos. El proceso de eutrofización de una laguna muy gradual, pudiendo detenerse, e incluso revertirse a una situación oligotrófica, debido a cambios climáticos y modificaciones en la vegetación aledaña.

formación de *Clostridium botulinum*, que es un anaerobio obligado patógeno). Por otra parte, las ramificaciones de las plantas acuáticas atrapan sólidos orgánicos que se descomponen, ejerciendo una demanda de oxígeno concentrada.

Generalmente el N y P son los factores limitantes. En el crecimiento microbiano, se consume P en forma de fosfato, mientras la mayoría de las bacterias asimilan N en la forma de NH_3 y sólo unas pocas lo hacen como NO_3^- . En cambio las algas, asimilan el N como NO_3^- y muy pocas como NH_3 . Hay más bacterias que pueden usar NO_3^- como fuente de oxígeno que como fuente de N. De acuerdo a la estequiometría aproximada de la fotosíntesis en las algas, la proporción N : P es del orden de 7. Según la Ley del Mínimo de Liebig, un cuerpo de agua con una relación N : P mucho mayor que 7 indica que el P es el nutriente limitante; por otra parte, un valor de N : P mucho menor que 7 implica una limitación por N. Algunos autores sugieren que concentraciones de P y N superiores a 0,015 y 0,3 mg/l, respectivamente, son suficientes para generar un crecimiento excesivo de algas en aguas lacustres.

Las principales fuentes de N orgánico son las proteínas, los aminoácidos y la urea; por su parte, el N inorgánico está en la forma de NH_3 , NO_3^- , NO_2^- . El amoníaco es un producto característico de la descomposición de la materia orgánica, y se puede oxidar microbiológicamente a nitritos y nitratos, mediante la acción de las bacterias nitrificantes. Estos procesos ocurren naturalmente en la aguas, y constituyen una importante contribución a la demanda biológica de oxígeno.

- **Otros agentes contaminantes**

La temperatura y el pH afectan directamente la vida de los organismos superiores, la que sólo es posible dentro de rangos limitados de temperatura y de pH.

- *Temperatura:* Los efluentes calientes pueden alterar negativamente el ecosistema, ya que la elevación de la temperatura reduce la solubilidad del oxígeno. Más aún, el metabolismo microbiano aumenta al elevarse la temperatura (hasta cierto límite).
- *pH:* Es importante evitar descargar aguas con pH muy diferente de 7. Desgraciadamente, la eutrofización de un cuerpo de agua genera variaciones extremas de pH que tienen un efecto negativo sobre muchas especies acuáticas.
- *Sólidos suspendidos:* Los sólidos en el agua interfieren directamente con la transferencia de oxígeno y con la transmisión de la luz. Además, cuando sedimentan afectan la vida en el fondo del cuerpo de agua. Si son orgánicos biodegradables, imponen una fuerte demanda de oxígeno que genera rápidamente un medio anóxico.

- **Caudal Mínimo Ecológico**

La calidad del agua no solamente es afectada por los vertidos de residuos, sino que también por su consumo para diferentes actividades humanas. El consumo de agua fluvial en actividades industriales, agrícolas o domésticas, así como la

instalación de embalses y otras intervenciones directas sobre el medio físico, pueden afectar las características hidrológicas del río. Si tales intervenciones resultan en una reducción significativa de su caudal, se pueden generar consecuencias adversas sobre el ecosistema acuático. Las variaciones de caudal producen cambios en la población de las diferentes comunidades. Algunas especies pueden ser sustituidas por otras que cumplen la misma función en el ecosistema, pero que presentan distintos requerimientos ambientales y poseen diferentes ciclos de vida.

La disminución del caudal puede afectar seriamente el proceso de oxigenación del río, generando una reducción de su capacidad de autodepuración. Esta situación puede originarse debido a una reducción importante del área de contacto río-aire y/o del coeficiente de transferencia de masa (denominado coeficiente de reaeración).

El ecosistema que representa un tramo de río está condicionado, principalmente, por:

- La morfología del cauce
- El flujo del cauce
- Las características físico-químicas del agua circulante
- El tipo de hábitat existente en el lecho y en las riberas fluviales
- Los recursos tróficos existentes en el medio acuático
- Las características climáticas
- Los vertidos derivados de la actividad humana en la cuenca

Para determinar el caudal mínimo aceptable, desde el punto de vista ecológico, se puede utilizar modelos matemáticos que permiten predecir el efecto de cambios de caudal sobre la calidad del hábitat acuático y sobre la capacidad de autodepuración. Por ejemplo, en algunos estudios, se recomienda utilizar los simuladores PHABSIM (*physical habitat simulation system*) y QUAL2E (modelo de calidad de agua). Es importante señalar que se deben considerar los potenciales usos del río en estudio, como por ejemplo, en actividades recreativas y de piscicultura.

3.2.2) Capacidad de Autodepuración del Medio Acuático

Tal como se mencionó en secciones anteriores, los contaminantes sufren diferentes transformaciones físicas, químicas y biológicas que tienen lugar en el medio acuático. Como resultado de estos procesos, la concentración del contaminante primario en la columna de agua tiende a disminuir. La actividad biológica constituye uno de los mecanismos de mayor importancia en la autodepuración de los cuerpos receptores hídricos; sus principales características se presentan a continuación.

a) Cadena trófica acuática

La vida se originó y evolucionó inicialmente en medio acuoso. Debido a su gran

capacidad solvente, el agua presente en la naturaleza contiene compuestos orgánicos e inorgánicos, suspendidos o disueltos, de origen biológico y de origen geológico. La cadena trófica en los ecosistemas acuáticos es compleja e interactúa con los componentes físicos y químicos del medio, de manera análoga a los ecosistemas terrestres.

Los organismos autótrofos presentes en el agua absorben energía solar y la utilizan para sintetizar compuestos orgánicos a partir de moléculas inorgánicas (CO_2 , NH_4^+ , NO_2^-). En los ecosistemas acuáticos, la mayor parte de la fotosíntesis la realiza el fitoplancton, que sirve de alimento a los consumidores heterótrofos (principalmente el zooplancton). A su vez, los organismos heterótrofos consumen O_2 y aportan CO_2 al medio, como resultado de su actividad metabólica, el cual es utilizado por los organismos fotosintéticos acuáticos.

A su vez, las bacterias, hongos y algas sirven de alimento para otros organismos, tales como protozoos, invertebrados, y peces. Así, las diferentes especies acuáticas crecen y mueren, se alimentan las unas de las otras, de acuerdo a su posición en la cadena trófica, en un equilibrio dinámico alterado sólo por los azares de la naturaleza y por la actividad del hombre. La presencia de una variada fauna acuática es muestra de un "buen estado de salud" del medio acuático.

b) Oxígeno Disuelto (OD)

Se denomina oxígeno disuelto al oxígeno contenido en el medio acuoso. El oxígeno del aire se transfiere a través de la superficie y se disuelve en el agua (los principios físicos que caracterizan este proceso se revisan en el Capítulo 6).

La concentración de oxígeno disuelto (OD) es uno de los indicadores del estado de salud del medio acuático. Un alto OD, cercano a saturación, indica un río con bajo contenido de materia orgánica biodegradable. Por otra parte, una concentración de OD muy inferior a su nivel de saturación indica la presencia de una carga orgánica superior a la capacidad de aireación del sistema. La concentración de OD varía con la profundidad, siendo mayor en la superficie; en el lecho de casi todos los cuerpos de agua lacustres existe una capa anóxica en los sedimentos.

En las aguas naturales, las dos fuentes fundamentales de oxígeno son:

- el oxígeno atmosférico del aire.
- el oxígeno producido por las plantas y otros organismos fotosintéticos presentes en el agua.

Una corriente de agua con alta capacidad de aireación estará en condiciones de permitir una rápida descomposición de los materiales orgánicos, por parte de los microorganismos aerobios presentes. Cualquier condición que altere negativamente la oxigenación del agua contribuirá a su deterioro. Por ejemplo, los sólidos en suspensión y los contaminantes cromóforos reducen la transmisión de

luz hacia los organismos fotosintéticos de la columna de agua, con lo que se reduce la producción de oxígeno; por otra parte, los sólidos flotantes reducen el área disponible para la transferencia de oxígeno desde el aire e interfieren directamente sobre la luz que penetra a la columna de agua.

Cuando los nutrientes son utilizados aeróbicamente, una parte se consume en la generación de biomasa, aumentando así la población microbial. Si se reduce la cantidad de nutrientes disponibles para el crecimiento celular, algunos microbios morirán y se desintegrarán. Normalmente, cuando los organismos acuáticos mueren sus restos sedimentan y sufren descomposición anaeróbica. En los cuerpos de agua de cierta profundidad, existe una zona anóxica en el fondo, donde los organismos anaeróbicos metabolizan los compuestos orgánicos generados por la lisis de las células muertas.

c) Autodepuración en la aguas

La actividad viviente le otorga a un cuerpo de agua una cierta capacidad de autodepuración, ya que los compuestos orgánicos que se vierten en éste, son consumidos por los microorganismos heterótrofos. Como resultado de la actividad metabólica de los microorganismos, los compuestos orgánicos disueltos son transformados en biomasa celular, en CO₂ y en otros compuestos inorgánicos simples.

La capacidad de autodepuración es altamente dependiente de la disponibilidad de oxígeno disuelto en el agua. El oxígeno es el reactivo esencial en los sistemas aeróbicos. Cuando los organismos aerobios metabolizan, los nutrientes orgánicos consumen al mismo tiempo el oxígeno disuelto. Los altos requerimientos metabólicos de oxígeno se contraponen con su baja solubilidad en el agua (la concentración de saturación del oxígeno disuelto en agua, en contacto con el aire a presión atmosférica y temperatura ambiente, está en el rango 7-10 g/m³). Si la velocidad de transferencia de oxígeno desde el aire hacia el seno del agua es menor que la velocidad de consumo metabólico de oxígeno, su concentración en el agua disminuirá gradualmente, hasta constituirse en un reactivo limitante en las reacciones de oxidación intracelular. La reducción en la disponibilidad de oxígeno afectará, primeramente, a los organismos superiores de la cadena trófica. Ello provocará un desbalance en el equilibrio poblacional, generando un acelerado incremento de la cantidad de microorganismos en el cuerpo de agua. Como consecuencia de esto, el consumo de oxígeno aumenta, hasta llegar a generar un medio acuático anóxico. Bajo tales condiciones, la actividad metabólica aeróbica se detiene, dando paso a vías metabólicas anaeróbicas.

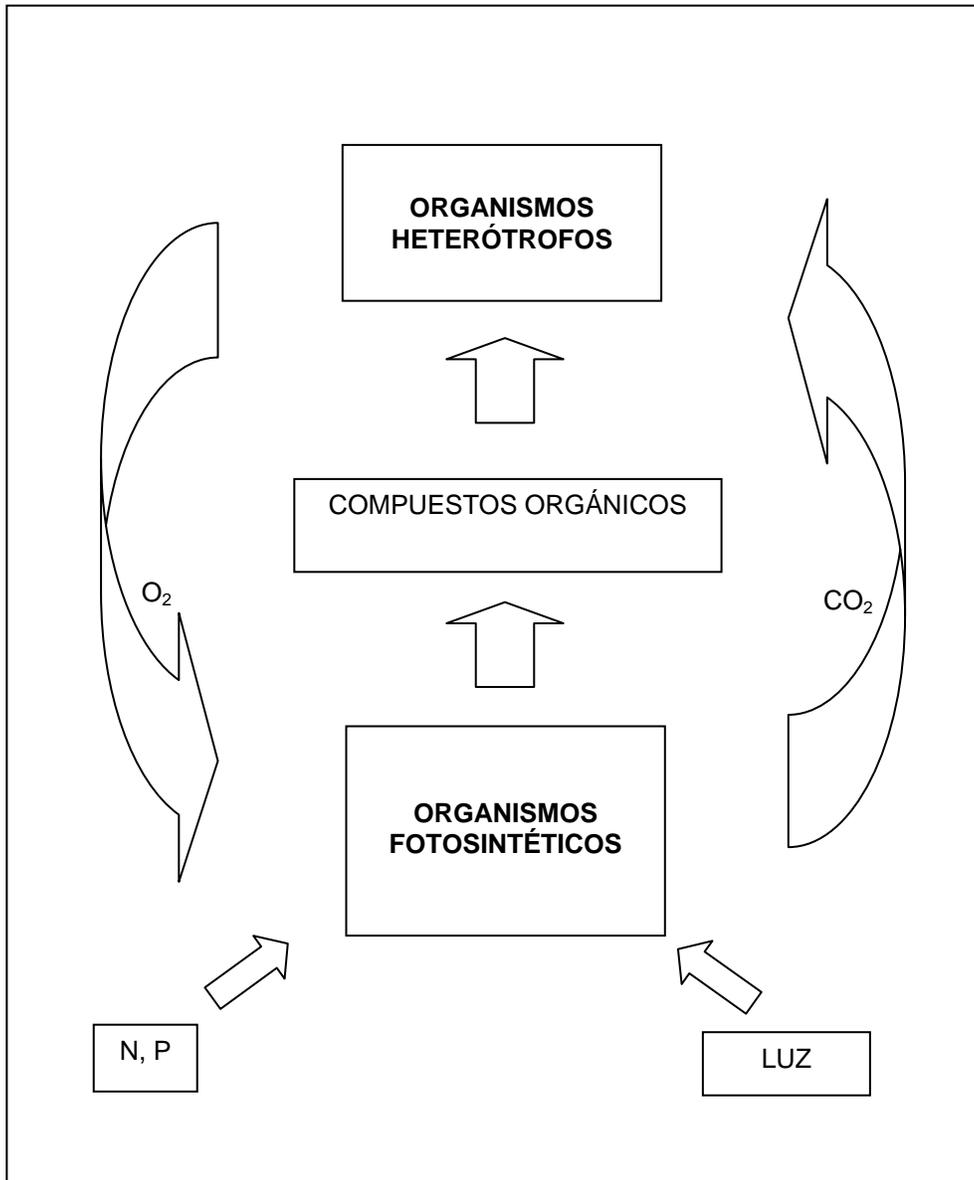


FIGURA 3.8: CADENA TRÓFICA SIMPLIFICADA

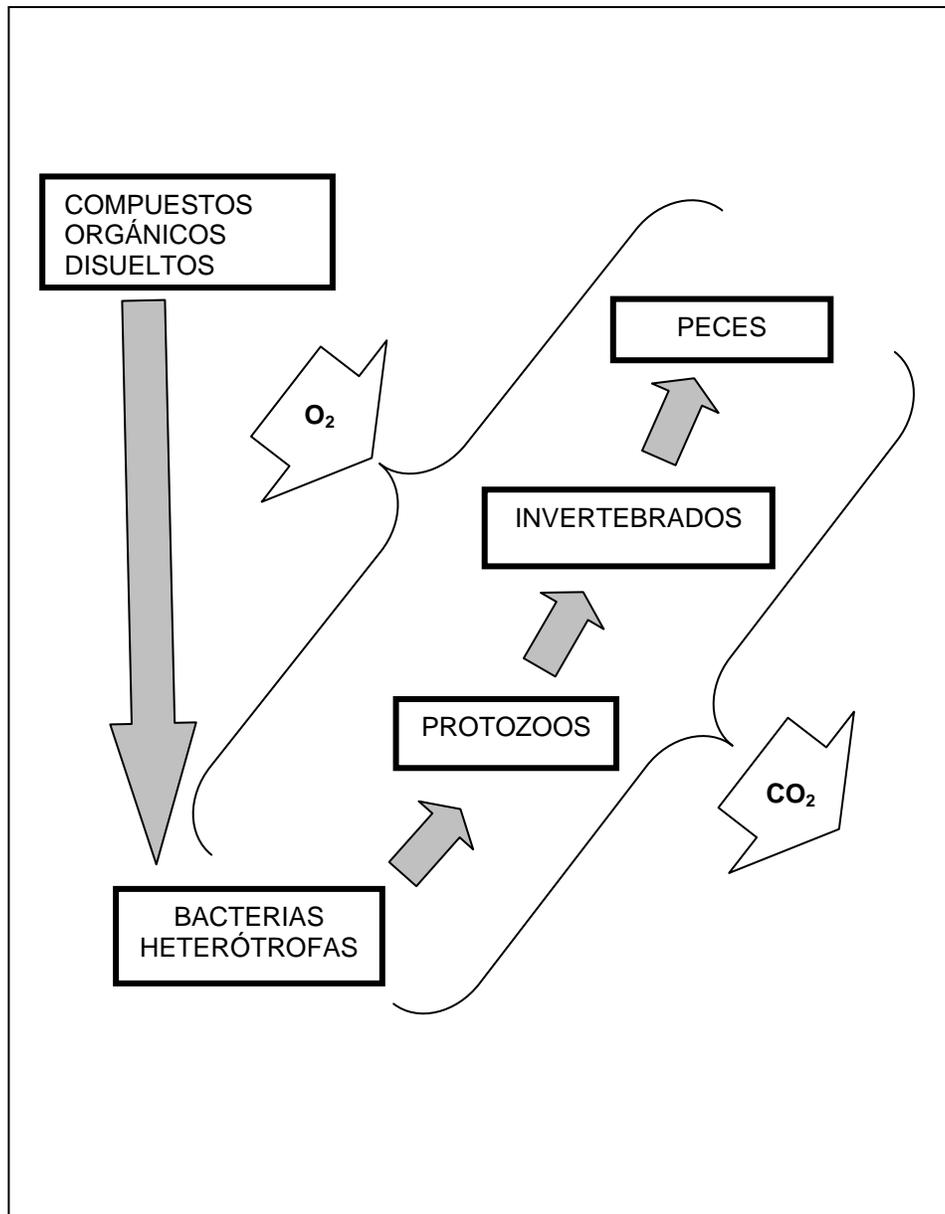


FIGURA 3.9: CADENA TRÓFICA AERÓBICA

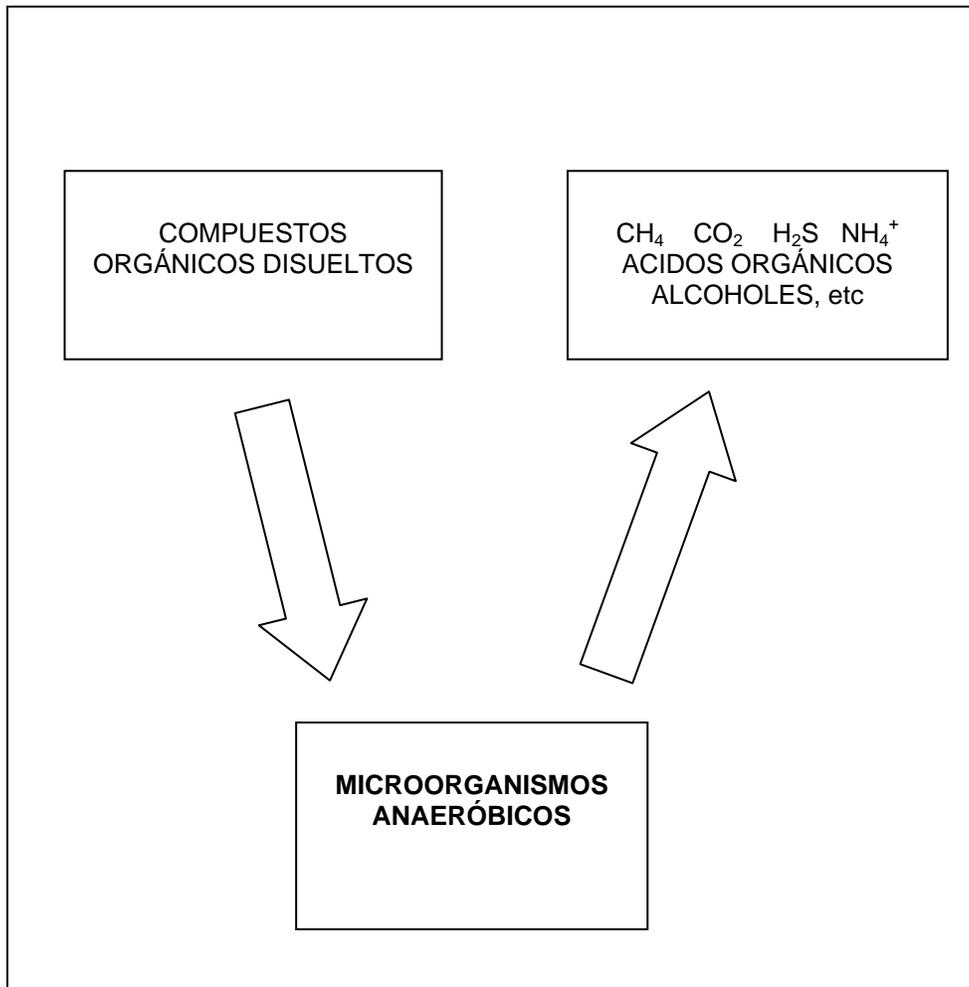


FIGURA 3.10: ACTIVIDAD ANAERÓBICA

3.2.3) Modelos de Calidad de Agua

Es importante contar con herramientas de modelación que permitan predecir el efecto de las descargas de contaminantes sobre la calidad de las aguas receptoras.

Los contaminantes que se vierten en un cuerpo de agua se diluyen en el medio, a través de mecanismos convectivos y advectivos, reduciendo así su concentración. Mientras mayor sea el volumen dentro del cual se vierte el contaminante, menor será su concentración en éste una vez que se diluya. La capacidad de dilución de un río, lago, o mar, depende entre otros factores de las características de las corrientes acuáticas, de la velocidad y turbulencia de los cursos, de la morfología del cauce, etc.

Además de su simple dilución en el medio, los contaminantes vertidos pueden sufrir transformaciones físicas, químicas y biológicas complejas que tienen lugar en el agua:

- Algunos de estos compuestos pueden ser transferidos a los sedimentos o al aire por cambio de fase (por ejemplo, volatilización, precipitación, adsorción).
- Pueden sufrir cambios químicos, por ejemplo, por degradación biológica, o por fotooxidación o hidrólisis química.
- Algunos compuestos entran en la cadena alimenticia, pero no sufren degradación ni excreción y se pueden bioacumular en los diversos componentes biológicos. Tal es el caso de algunos metales y compuestos orgánicos recalcitrantes (ej.: DDT).

Existen modelos matemáticos para describir tales fenómenos con diferentes niveles de complejidad. Muchos de estos se encuentran disponibles en forma gratuita en los ficheros electrónicos de la Agencia de Protección Ambiental (EPA) norteamericana (ej.: QUAL2E).

En términos generales, la gran mayoría de los modelos utiliza balances de masa (dinámicos o en estado permanente) para establecer las relaciones matemáticas entre las diferentes variables. Normalmente, se requiere información acerca de las características físicas y químicas del cuerpo de agua y sus condiciones hidrodinámicas. En el caso de compuestos que se distribuyen en el aire, agua y sedimentos, se necesitan datos acerca de sus relaciones de equilibrio, solubilidades, presiones de vapor u otros.

En general, el balance de masa para una especie i considera los siguientes flujos:

$$\text{Entrada de } i - \text{Salida de } i - \text{Consumo de } i + \text{Generación de } i = \text{Acumulación de } i$$

La expresión para el consumo de i depende del fenómeno responsable de la desaparición del compuesto (degradación química o biológica, cambio de fase). Comúnmente, la velocidad de consumo de un compuesto, r_C , se aproxima a una cinética de primer orden:

$$r_C = -k[C]$$

donde $[C]$ es la concentración de la especie en el medio y k es la constante cinética de primer orden. En el caso de aquellos contaminantes que se generan producto de la actividad en el medio acuático (por ejemplo, formación de bacterias), se utilizan expresiones de primer orden similares para describir su tasa de crecimiento (sin el signo negativo).

La Tabla 3.7 ilustra algunos valores de constantes cinéticas de primer orden para varios compuestos orgánicos de interés, debido a su alta toxicidad (a modo de referencia, se presentan los correspondientes valores para su descomposición en aire).

TABLA 3.7: CONSTANTES CINÉTICAS PARA DEGRADACIÓN (1^{er} ORDEN) DE COMPUESTOS ORGÁNICOS EN AGUA Y EN AIRE ⁶

COMPUESTOS ORGÁNICOS	k Agua (día ⁻¹)	k Aire (día ⁻¹)
Benceno	0,1-0,7	0,7
Benzopireno	2,5	0,1-0,7
Tetracloruro de carbono	0,002-2,3	$9 \cdot 10^{-5}$
Clordano	0,001	0,02
Cloroformo	0,02-2,3	0,01
DDT	0,001-0,01	-
Dicloroetano	0,1-0,7	0,02
Formaldehído	0,2-0,8	0,9
Heptacloro	0,7	0,02
Hexacloroetano	0,07-0,6	$9 \cdot 10^{-5}$
Bifenilos policlorados (PCB)	0,05-0,3	0,01
Dioxina (2,3,7,8 TCDD)	$9 \cdot 10^{-4} - 2 \cdot 10^{-3}$	-
Tricloroetano	0,1-4,9	$4 \cdot 10^{-4} - 9 \cdot 10^{-4}$
Tricloroetileno	0,008-0,7	0,2
Cloruro de vinilo	0,1-0,7	0,6

Los amplios rangos de variación en algunos casos reflejan diferentes condiciones ambientales de temperatura, luminosidad y biota existentes en el medio acuático.

⁶ Adaptado de Masters G.M., "Introduction to environmental engineering and science", 2ª ed., Prentice-Hall International Editions, London, 1998

Para el caso de un río de morfología sencilla, es común utilizar un modelo simple donde se supone un flujo pistón. En el caso de una descarga puntual y continua, la solución en estado estacionario permite obtener el perfil axial de concentración, aguas abajo de la descarga:

$$[C] = [C]_0 e^{-kx/v}$$

Donde:

- [C] = concentración de contaminante disuelto en el río, x (m) aguas abajo de la descarga (mg/l)
 [C]₀ = concentración de contaminante disuelto en el río, en el punto de descarga, considerando que el vertido se mezcla instantáneamente con el río (mg/l)
 k = constante cinética de 1^{er} orden para el consumo de contaminante (día⁻¹)
 x = distancia desde el punto de descarga, en dirección aguas abajo (m)
 v = velocidad media del río (m/s)

En el caso de las descargas de material orgánico biodegradable, interesa predecir su efecto sobre la concentración de oxígeno disuelto. Uno de los primeros modelos para predecir tal efecto en los cuerpos fluviales fue presentado por Streeter y Phelps en 1925. Dicho modelo considera el río como un reactor de flujo pistón, y establece un balance para el oxígeno disuelto y el material biodegradable, bajo condiciones de estado estacionario. En el caso del balance de oxígeno, se incluye la entrada de oxígeno por transferencia desde el aire, también expresada por un modelo de primer orden. En versiones posteriores, se toma en cuenta, además, el aporte de oxígeno por vía fotosintética. La solución analítica del modelo de Streeter y Phelps para una descarga puntual y continua, permite estimar la concentración de oxígeno disuelto a lo largo de un río:

$$[O_2] = [O_2]_{SAT} - \frac{k_D [C]_0}{k_A - k_D} \left(e^{-(k_D x/v)} - e^{-(k_A x/v)} \right) - ([O_2]_{SAT} - [O_2]_0) e^{-(k_A x/v)}$$

donde:

- [O₂] = concentración de oxígeno disuelto en el río a x (m) aguas abajo de la descarga (mg/l),
 [O₂]₀ = concentración de oxígeno disuelto en el río, inmediatamente aguas arriba de la descarga (mg/l)
 [O₂]_{SAT} = concentración de saturación de oxígeno disuelto en el río, a la temperatura media del agua (mg/l)
 [C]₀ = concentración de material orgánico disuelto en el río, en el punto de descarga, considerando que el vertido se mezcla instantáneamente con el río. Está expresada como Demanda Biológica de Oxígeno, DBO₅ (mg/l) (este concepto se explica en detalle en la sección 6.2.2)
 k_A = constante cinética de primer orden para la transferencia de oxígeno desde el aire (aireación) (día⁻¹)
 k_D = constante cinética de primer orden para el consumo de oxígeno por

acción metabólica (día^{-1})

Como resultado de los fenómenos de consumo biológico de oxígeno y reposición física de éste, se presenta un perfil axial típico de concentración de oxígeno disuelto aguas debajo de una descarga de material orgánico biodegradable (ver la Figura siguiente):

- Inicialmente, la alta demanda biológica de oxígeno impuesta por la descarga de material orgánico tiende a reducir la concentración de oxígeno disuelto en el río. Si dicho efecto es mayor que la velocidad de aireación del río, la concentración de oxígeno disuelto disminuirá sostenidamente.
- La ecuación de Streeter y Phelps demuestra que la concentración de material orgánico disuelto disminuye gradualmente a medida que nos alejamos del punto de descarga, lo que implica también una reducción de la velocidad de consumo de oxígeno.
- Cuando la velocidad de consumo de oxígeno alcanza el mismo nivel que la velocidad de aireación del río, la concentración de oxígeno disuelto llega a su valor mínimo, y comenzará a aumentar gradualmente a partir de dicho punto crítico.
- Aguas abajo del punto crítico, la velocidad de consumo de oxígeno es menor que la velocidad de aireación y, eventualmente, la concentración de oxígeno disuelto en el río alcanzará su valor de saturación.

El punto de máximo impacto, x^* , donde se constata la concentración de oxígeno disuelto mínima en el río, $[O_2]_{MIN}$, debido a la descarga de material orgánico, se puede estimar en base a:

$$x^* = \frac{v}{k_A - k_D} \ln \left\{ \frac{k_A}{k_D} \left[1 - \frac{([O_2]_{SAT} - [O_2]_0)(k_A - k_D)}{k_D [C]_0} \right] \right\}$$

La concentración mínima de oxígeno disuelto debido a la descarga se obtiene reemplazando el valor de x^* en la ecuación de Streeter-Phelps

A pesar de ser un modelo muy simplificado, permite obtener resultados que pueden ser utilizados como una primera aproximación en la predicción del impacto causado por una descarga de material orgánico.

La constante cinética de primer orden para la degradación biológica del material orgánico disuelto, k_D , está dentro del rango 0,1 - 0,7 (día^{-1}), dependiendo del tipo de material orgánico, de las características de la biota bacteriana y de la temperatura del agua.

Por su parte, la constante de aireación, k_A , depende de las características del sistema hídrico y de la temperatura. Esta constante es mayor en aquellos ríos que presentan una alta velocidad y gran turbulencia superficial. Algunos valores típicos obtenidos de literatura se presentan en la Tabla 3.8:

TABLA 3.8: CONSTANTES DE AIREACIÓN (1^{er} ORDEN) PARA DISTINTOS CUERPOS DE AGUA.

TIPO DE CUERPO DE AGUA	CONSTANTE DE AIREACION, DE 1 ^{er} ORDEN, k_A (día ⁻¹)
Lagunas	0,1-0,2
Lagos de mayor tamaño	0,2-0,3
Ríos de baja velocidad	0,3-0,5
Ríos con velocidad normal	0,5-0,7
Ríos rápidos y con caídas de agua	0,7-1,5

Existen varios modelos para predecir la constante de aireación, k_A . Se puede utilizar la fórmula de O'Connor y Dobbins :

$$k_A = \frac{3,9v^{1/2}}{p^{3/2}}$$

donde p es la profundidad media del río en (m), v es la velocidad media en (m/s) y k_A se expresa en (día⁻¹) a 20°C.

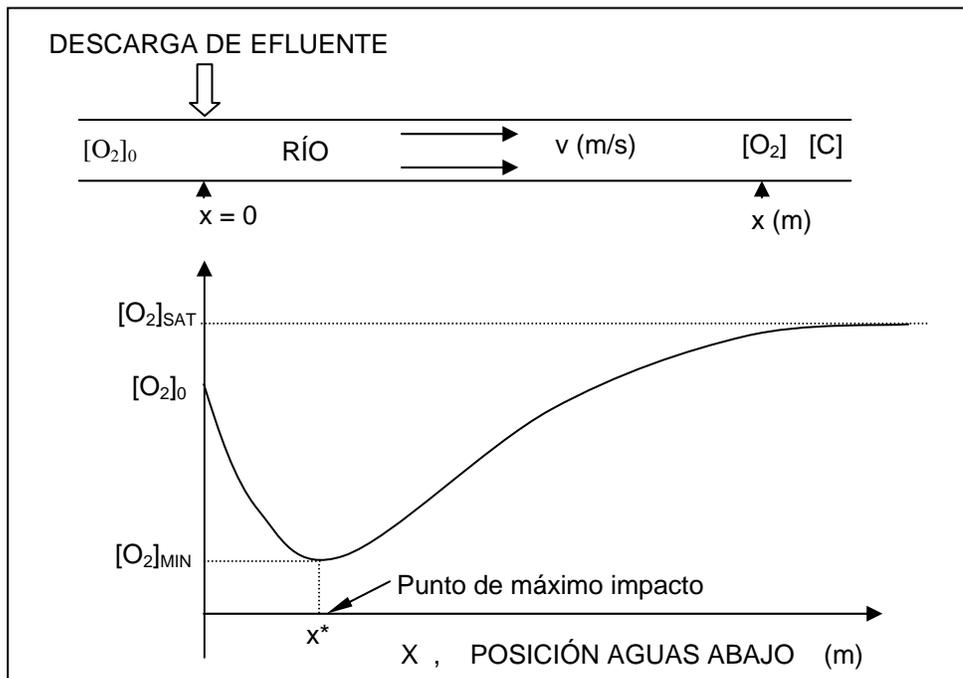


FIGURA 3.11: EFECTO DE UNA DESCARGA DE MATERIAL ORGÁNICO BIODEGRADABLE, SOBRE EL OXÍGENO DISUELTO EN UN RÍO.