



INSTITUTO SUPERIOR
UNIVERSITARIO

SUCE

**GUÍA GENERAL DE ESTUDIO
DE CONTAMINACIÓN Y
CONTROL**



Guía General de Estudio de Contaminación y Control

Héctor Xavier Pérez Acosta

Lenin Gonzalo Sáenz Martínez

María Gabriela Rodríguez Caicedo

Eugenia Katalina Sánchez Raza

Esta publicación ha sido sometida a revisión por pares académicos específicos por:

Oswaldo Wilfrido Alvarez Vasquez
Universidad Central del Ecuador

Corrección de estilo:

- Christian Fernando Granda Arévalo - Docente - Sucre

Diseño y diagramación:

- Freddy Javier Centeno Martínez - Docente - Sucre

Editorial RIMANA

Primera Edición
Quito – Ecuador

INSTITUTO SUPERIOR UNIVERSITARIO SUCRE

ISBN: 978-9942-590-11-4

Esta publicación está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-No Comercial-Compartir Igual 4.0 Internacional.





MISIÓN

Ser una Institución Superior Universitaria con estándares de calidad académica e innovación, reconocida a nivel nacional con proyección internacional.

VISIÓN

Formamos profesionales competentes con espíritu emprendedor, capaces de contribuir al desarrollo integral del país.

Los contenidos de este trabajo están sujetos a una licencia internacional Creative Commons Reconocimiento-No Comercial-Compartir Igual 4.0 (CC BY-NC-SA 4.0). Usted es libre de Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato. Adaptar — remezclar, transformar y construir a partir del material citando la fuente, bajo los siguientes términos: Reconocimiento- debe dar crédito de manera adecuada, brindar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante. No Comercial-no puede hacer uso del material con propósitos comerciales. Compartir igual-Si remezcla, transforma o crea a partir del material, debe distribuir su contribución bajo la misma licencia del original. No puede aplicar términos legales ni medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia. <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>



**Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual
4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0)**

Usted acepta y acuerda estar obligado por los términos y condiciones de esta Licencia, por lo que, si existe el incumplimiento de algunas de estas condiciones, no se autoriza el uso de ningún contenido.

Presentación de la asignatura	8
UNIDAD 1 PRINCIPIOS DE CONTROL Y CONTAMINACIÓN AMBIENTAL	9
Conceptos y Definiciones Básicas	9
Agentes Contaminantes	9
Contaminación	9
Control y contaminación	10
Calidad Ambiental.....	10
Tipos de contaminación y contaminantes	11
Especificidad	13
Sensibilidad y rango	13
Estabilidad.....	13
Tóxicos ambientales.....	13
Precisión y exactitud.....	14
Tiempo promedio de muestreo	14
Facilidades y costos.....	14
Calibración y estabilidad.....	14
Contaminantes y sustancias tóxicas	15
Temperatura y humedad.....	15
UNIDAD 2 CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA.....	16
Efecto Invernadero	16
Monitoreo Continuo	17
Monitoreo Integrado.....	17
Métodos de Referencia	18
Efectos de los contaminantes atmosféricos	19
Partículas Suspendidas Totales	20
Muestreador de grandes volúmenes.....	20
Fracciones de partículas suspendidas	21
Equipos de medición.....	21
Fracciones PST.....	22
Impactadores PM10.....	22
Medidas de mitigación.....	23
Método de la pararosanilina	24

Métodos de referencia para oxidantes fotoquímicos	24
Métodos de referencia para bióxido de nitrógeno	24
UNIDAD 3: CONTAMINACIÓN DEL AGUA	25
Fuentes puntuales y no puntuales de contaminación.....	25
Ciclo Hidrológico	25
Usos del Agua	26
Calidad del Agua.....	26
Monitoreo del Agua	26
Caracterización del Recurso	27
Parámetros Físicos.....	27
Parámetros Químicos	29
Parámetros Bacteriológicos	30
Cálculos de DBO, DQO, COT's	31
Conductividad	33
Aniones y Cationes.....	33
Medidas de mitigación y control.....	33
DBO ₅	33
DQO	34
Oxígeno Disuelto (OD).....	34
UNIDAD 4: CONTAMINACIÓN DEL SUELO.....	35
Fuentes puntuales y no puntuales de contaminación.....	35
Cambio y Uso del Suelo	35
Derrames de Combustibles	36
Contaminación por Lixiviación	36
Remediación de suelos	36
Identificación de contaminantes	37
Formación y capas del suelo	37
Composición y tipos de suelo	38
Contaminación por residuos sólidos	38
Residuos Peligrosos.....	38
Residuos Tóxicos.....	39
Residuos Sólidos Urbanos	39
Medidas de mitigación y control.....	39

Proceso de transformación de contaminantes.....	39
Mecanismos de transporte de contaminantes.....	39
Factores de Influencia por contaminantes.....	39
Tratamiento y remediación de suelos.....	40
Métodos Físicos	40
Biorremediación.....	41
Figura N°1	20
Figura N°2	21
Figura N° 3	22
Gráfica N°1.....	10
Gráfica N°2.....	17
Imagen N°1	11
Imagen N°2.....	35
Imagen N°3	36
Imagen N°4.....	37
Tabla N°1.....	18
Tabla N°2.....	28
Tabla N°3.....	30
Tabla N°4.....	30
Tabla N°5.....	38

Presentación de la asignatura

Ésta guía proporciona las bases conceptuales y técnicas para comprender los procesos de contaminación en aire, agua y suelo, así como las metodologías empleadas para su evaluación, prevención, control y mitigación; el estudiante deberá dominar el reconocimiento de fuentes contaminantes, la caracterización de emisiones y efluentes, la aplicación de normas ambientales vigentes, el uso e interpretación de indicadores de calidad ambiental, los principios de monitoreo, muestreo, y la selección de tecnologías apropiadas de tratamiento; además, se espera que el alumno desarrolle competencias para analizar impactos ambientales, interpretar datos de laboratorio y campo, proponer medidas correctivas y preventivas, y evaluar la eficacia de sistemas de control de contaminación, integrando criterios de sostenibilidad, gestión de riesgos y responsabilidad socioambiental en la toma de decisiones técnicas dentro de su futura práctica profesional en Gestión Ambiental.

Resultados del aprendizaje

Los estudiantes serán capaces de identificar y clasificar fuentes de contaminación en aire, agua y suelo, interpretar y aplicar la normativa ambiental vigente, ejecutar procedimientos básicos de muestreo y monitoreo con criterios de calidad, analizar datos ambientales para evaluar cumplimiento y riesgos, seleccionar tecnologías adecuadas de tratamiento y control de la contaminación, diseñar propuestas de mitigación con enfoque preventivo y correctivo, evaluar la eficiencia de sistemas de control mediante indicadores técnicos, integrar criterios de sostenibilidad, responsabilidad socioambiental y gestión del riesgo en la toma de decisiones, y comunicar con precisión los resultados e informes ambientales en contextos profesionales propios de la Gestión Ambiental.

UNIDAD 1 PRINCIPIOS DE CONTROL Y CONTAMINACIÓN AMBIENTAL

Conceptos y Definiciones Básicas

La contaminación ambiental se refiere a la introducción de sustancias, agentes físicos o formas de energía en el ambiente que alteran su equilibrio natural y generan efectos adversos sobre los ecosistemas y la salud humana.

Desde el enfoque de la toxicología ambiental, García Pinto (2021) destaca que el problema no es solo la presencia del contaminante, sino:

- Su concentración
- El tiempo de exposición
- La vía de ingreso al organismo
- La susceptibilidad del individuo

Agentes Contaminantes

Son sustancias, elementos o formas de energía que, al encontrarse en el ambiente en concentraciones superiores a las naturales, generan efectos negativos en los seres vivos o ecosistemas, ya que alteran procesos biológicos y químicos del medio (Zehnder et al., 2018).

Ejemplo: emisiones de dióxido de azufre producidas por industrias termoeléctricas.

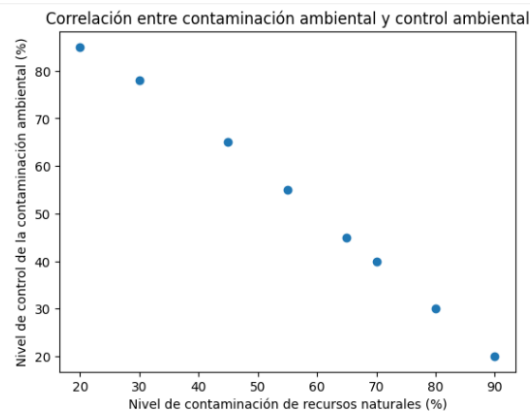
Contaminación

Es el proceso mediante el cual se modifican las condiciones naturales del aire, agua o suelo debido a la presencia o aumento de contaminantes, generando deterioro ambiental, reducción de calidad de vida y afectaciones a la salud (Zehnder et al., 2018).

Ejemplo: contaminación atmosférica en ciudades donde hay exceso de vehículos.

Gráfica N°1

Niveles de contaminación vs. Nivel de control



Nota: La gráfica muestra la correlación que existe entre los niveles de contaminación de recursos naturales y niveles de control de la contaminación ambiental, tiene correlación inversamente proporcional.

Control y contaminación

Es el conjunto de estrategias, procedimientos e instrumentos que se aplican para reducir la liberación de contaminantes, mediante acciones como tratamiento de residuos, normatividad ambiental y monitoreo constante (Zehnder et al., 2018).

Ejemplo: uso de filtros de partículas en chimeneas industriales.

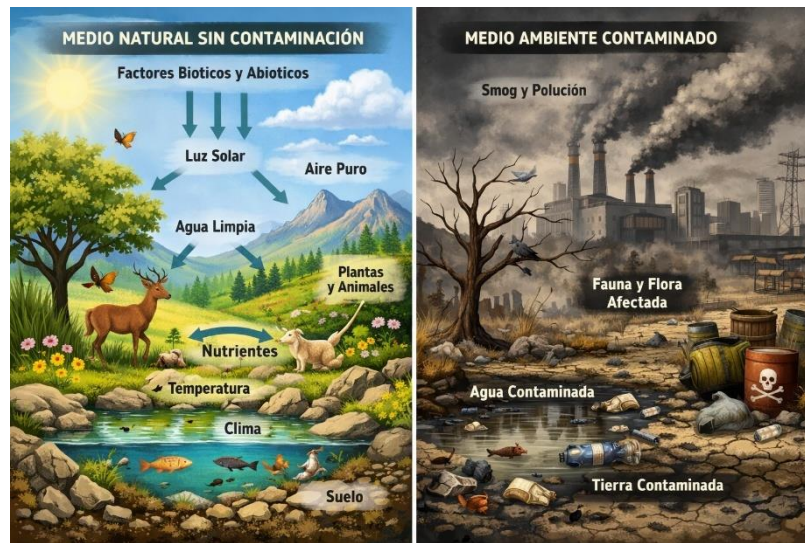
Calidad Ambiental

Es la condición del ambiente evaluada mediante parámetros como la presencia de contaminantes, salud de los ecosistemas, disponibilidad de recursos y equilibrio ecológico, midiendo qué tan favorable o saludable es dicho entorno para los seres vivos (Odum & Barrett, 2006).

Ejemplo: un lago con oxígeno disuelto adecuado y baja presencia de metales pesados.

Imagen N°1

Calidad Ambiental



Nota: La imagen muestra la diferencia que existe en un entorno contaminado y un entorno saludable, adicionalmente se indica las consecuencias de la contaminación cuando la naturaleza no ha podido asimilar la carga contaminante, la imagen fue realizada por los autores utilizando IA.

Tipos de contaminación y contaminantes

La contaminación ambiental puede clasificarse según el medio afectado y el tipo de agente contaminante.

Según el medio afectado

a) Contaminación del aire

Se produce por la emisión de gases y partículas a la atmósfera.

Principales contaminantes:

- Material particulado (PM_{10} y $PM_{2.5}$)
- Monóxido de carbono (CO)
- Óxidos de nitrógeno (NOx)
- Dióxido de azufre (SO_2)
- Compuestos orgánicos volátiles (COV)

Efectos en la salud:

- Enfermedades respiratorias
- Problemas cardiovasculares
- Irritación ocular y mucosas

b) Contaminación del agua

Ocurre cuando cuerpos de agua reciben sustancias que alteran su calidad natural.

Contaminantes frecuentes:

- Metales pesados (plomo, mercurio, cadmio)
- Plaguicidas
- Hidrocarburos
- Aguas residuales domésticas e industriales
- Impacto:
 - Enfermedades gastrointestinales
 - Bioacumulación en la cadena trófica
 - Afectación de ecosistemas acuáticos

c) Contaminación del suelo

Se origina por la acumulación de sustancias tóxicas en la matriz del suelo.

Fuentes comunes:

- Residuos sólidos mal gestionados
- Uso excesivo de agroquímicos
- Derrames industriales

Consecuencias:

- Pérdida de fertilidad del suelo
- Contaminación de alimentos
- Exposición indirecta del ser humano

Según el tipo de contaminante

- Químicos: Metales pesados, solventes, pesticidas
- Físicos: Ruido, radiación, calor

- Biológicos: Virus, bacterias, hongos, parásitos

Especificidad

Es la capacidad que tiene un método de medición para identificar de forma exclusiva el contaminante o parámetro objetivo sin interferencias externas que modifiquen la lectura verdadera (Zehnder et al., 2018).

Ejemplo: un sensor diseñado únicamente para detectar monóxido de carbono.

Sensibilidad y rango

Es la capacidad de un instrumento para identificar variaciones mínimas en la concentración de un contaminante y hacerlo dentro de límites cuantificables máximos y mínimos, manteniendo resultados confiables (Odum & Barrett, 2006).

Ejemplo: un analizador de ozono capaz de detectar valores desde 0,01 ppm hasta 5 ppm.

Estabilidad

Es la habilidad de un equipo o instrumento para mantener sus mediciones constantes durante cierto periodo, sin variaciones que alteren los resultados obtenidos (Zehnder et al., 2018).

Ejemplo: un sensor de pH que mantiene lecturas constantes por varios días.

Tóxicos ambientales

Los tóxicos ambientales son sustancias presentes en el entorno que pueden producir efectos dañinos en los organismos vivos, incluso a bajas concentraciones.

Los contaminantes de acuerdo con el origen pueden ser:

- Naturales (arsénico en aguas subterráneas, toxinas biológicas)
- Antropogénicos (productos industriales, plaguicidas, contaminantes urbanos)
- Características de los tóxicos ambientales
- Persistencia: Permanecen largos periodos en el ambiente.
- Bioacumulación: Se concentran en los tejidos de los organismos.
- Biomagnificación: Aumentan su concentración a lo largo de la cadena alimentaria.

- Toxicidad crónica: Producen efectos a largo plazo.

Ejemplos:

Mercurio: Neurotóxico, afecta el sistema nervioso.

Plomo: Daña el sistema nervioso y el desarrollo infantil.

Plaguicidas organoclorados: Disruptores endocrinos.

Precisión y exactitud

Se refiere a la repetibilidad de los resultados obtenidos bajo condiciones iguales, mientras que la exactitud indica qué tan cercano está el valor medido respecto a su valor real o estándar de referencia (Odum & Barrett, 2006).

Ejemplo: medir varias veces el nivel de cloro y obtener valores iguales y cercanos al valor real.

Tiempo promedio de muestreo

Es el tiempo necesario para obtener una muestra representativa o para que un instrumento proporcione una lectura fiable que represente correctamente la condición ambiental (Zehnder et al., 2018).

Ejemplo: recolectar muestras de aire durante 30 minutos para promedios reales.

Facilidades y costos

Incluye recursos humanos, infraestructura y gastos necesarios para obtener datos ambientales confiables, pues estos factores influyen en la frecuencia del muestreo y la capacidad de análisis (Odum & Barrett, 2006).

Ejemplo: adquisición y mantenimiento de un equipo de monitoreo continuo.

Calibración y estabilidad

Corresponde al procedimiento mediante el cual se ajusta un instrumento comparándolo con un estándar, garantizando que sus lecturas se mantengan dentro de valores confiables y sin desviaciones significativas (Zehnder et al., 2018).

Ejemplo: calibrar un espectrofotómetro con soluciones patrón antes de cada medición.

Contaminantes y sustancias tóxicas

Aunque los términos suelen usarse como sinónimos, es importante diferenciarlos:

Contaminantes: Son sustancias o agentes introducidos en el ambiente que alteran su calidad.

Pueden ser: No necesariamente tóxicos en bajas concentraciones, peligrosos cuando superan límites permisibles

Ejemplo: Nutrientes como nitratos en exceso en el agua.

Sustancias tóxicas: Son aquellas que tienen la capacidad inherente de producir daño biológico.

Se caracterizan por: Provocar efectos adversos específicos, actuar sobre órganos o sistemas determinados

Ejemplo: Arsénico, benceno, dioxinas

Relación entre contaminantes y toxicidad

Todo tóxico es un contaminante, pero no todo contaminante es necesariamente tóxico, depende de la dosis y exposición.

Principio fundamental de la toxicología: “La dosis hace al veneno” (Paracelso).

Temperatura y humedad

Son variables que influyen directamente en la concentración de contaminantes y en la respuesta de equipos de medición, ya que modifican la composición del aire y el comportamiento químico de las sustancias (Odum & Barrett, 2006).

Ejemplo: el incremento de humedad aumenta el peso de partículas suspendidas.

UNIDAD 2 CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

Efecto Invernadero

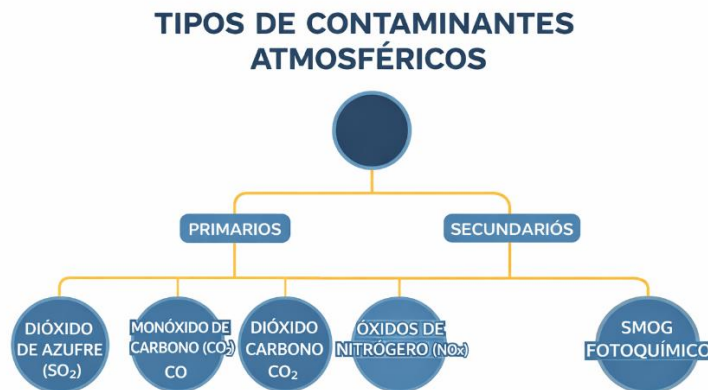
El efecto invernadero es un proceso natural que permite regular la temperatura del planeta y hacer posible la vida. Ocurre cuando la radiación solar atraviesa la atmósfera, es absorbida por la superficie terrestre y luego emitida en forma de radiación infrarroja; parte de este calor es retenido por los llamados gases de efecto invernadero (GEI), evitando que se disipe completamente hacia el espacio. Entre los principales GEI se encuentran el dióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4), el óxido nitroso (N_2O) y el vapor de agua, los cuales actúan como una capa térmica que mantiene el equilibrio energético de la Tierra.

Sin embargo, las actividades humanas han intensificado este fenómeno natural al incrementar de manera significativa la concentración de GEI en la atmósfera. La quema de combustibles fósiles, la deforestación, la agricultura intensiva, la ganadería y ciertos procesos industriales han provocado un efecto invernadero intensificado, responsable del aumento de la temperatura media global. Este desequilibrio energético está directamente vinculado al calentamiento global y al cambio climático, alterando los patrones climáticos normales y aumentando la frecuencia e intensidad de eventos extremos como sequías, inundaciones y olas de calor.

Las consecuencias del efecto invernadero intensificado se manifiestan tanto en el ambiente como en la sociedad. Entre los principales impactos se encuentran el deshielo de glaciares, el aumento del nivel del mar, la pérdida de biodiversidad y la degradación de ecosistemas, así como efectos adversos sobre la salud humana, la seguridad alimentaria y la disponibilidad de recursos hídricos. Frente a este escenario, la mitigación del efecto invernadero requiere la reducción de emisiones de GEI mediante el uso de energías renovables, la eficiencia energética, la reforestación y la adopción de prácticas sostenibles que contribuyan a restablecer el equilibrio climático.

Gráfica N°2

Diagrama de contaminantes atmosféricos



Nota: La gráfica muestra un esquema de los tipos de contaminantes atmosféricos, clasificados en primarios y secundarios. Los contaminantes primarios incluyen dióxido de azufre (SO_2), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2) y óxidos de nitrógeno (NO_x), emitidos directamente a la atmósfera. Los contaminantes secundarios, como el smog fotoquímico, se forman a partir de reacciones químicas entre contaminantes primarios en presencia de la radiación solar.

Monitoreo Continuo

Es el método mediante el cual se registran datos ambientales en tiempo real, permitiendo identificar fluctuaciones instantáneas en los niveles de contaminación y mantener vigilancia constante sobre las condiciones ambientales (Zehnder et al., 2018).

Ejemplo: estaciones automáticas de calidad del aire que reportan datos cada minuto.

Monitoreo Integrado

Consiste en recolectar muestras durante un periodo de tiempo determinado y promedian los resultados, reflejando condiciones ambientales acumuladas y no instantáneas (Zehnder et al., 2018).

Ejemplo: muestreos de partículas realizados durante 24 horas.

Métodos de Referencia

Son procedimientos estandarizados y validados científicamente que se establecen como base de comparación para evaluar la precisión de otros métodos de medición (Odum & Barrett, 2006).

Ejemplo: uso de un muestreador de alto volumen homologado como referencia comparativa frente a sensores portátiles.

Tabla N°1

Métodos de referencia (US EPA) para monitoreo de contaminantes atmosféricos

Contaminante	Método de referencia (US EPA)	Principio de detección
Dióxido de azufre (SO ₂)	Método de fluorescencia ultravioleta (UV)	El SO ₂ es excitado por radiación UV y emite fluorescencia proporcional a su concentración.
Partículas Suspendidas Totales (PST / TSP)	High Volume Sampler (Hi-Vol)	Captación gravimétrica: las partículas son retenidas en un filtro y la concentración se determina por diferencia de peso.
Monóxido de carbono (CO)	Método infrarrojo no dispersivo (NDIR)	Absorción selectiva de radiación infrarroja por el CO, proporcional a su concentración.
Oxidantes fotoquímicos (Ozono, O ₃)	Método fotométrico UV	El ozono absorbe radiación UV (≈254 nm); la atenuación de la señal se relaciona con su concentración.
Hidrocarburos no metano (NMHC)	Cromatografía de gases con detector de ionización de llama (GC-FID)	Separación cromatográfica y detección por ionización de compuestos orgánicos en una llama de hidrógeno.
Dióxido de nitrógeno (NO ₂)	Quimioluminiscencia	Reacción del NO con ozono produce luz; el NO ₂ se convierte previamente a NO para su medición indirecta.

Nota: En la tabla se puede verificar la relación que existe entre el agente contaminante, el método de referencia para su monitoreo y el principio de detección, la tabla fue elaborada por los autores considerando los métodos de referencia de la EPA.

Efectos de los contaminantes atmosféricos

Los contaminantes atmosféricos son sustancias o mezclas de sustancias presentes en el aire en concentraciones que alteran su composición natural y generan efectos adversos sobre la salud humana, los ecosistemas y los materiales. Entre los principales contaminantes se encuentran el material particulado (PM_{10} y $PM_{2.5}$), el dióxido de azufre (SO_2), los óxidos de nitrógeno (NO_x), el monóxido de carbono (CO), el ozono troposférico (O_3) y los compuestos orgánicos volátiles (COV). Estos contaminantes provienen principalmente de fuentes antropogénicas como el transporte, la industria, la quema de combustibles fósiles y la combustión de biomasa, aunque también existen fuentes naturales como erupciones volcánicas e incendios forestales.

La exposición a contaminantes atmosféricos tiene efectos significativos sobre la salud humana, los cuales dependen de la concentración, el tiempo de exposición y la vulnerabilidad de la población. El material particulado fino puede penetrar profundamente en los pulmones y alcanzar el torrente sanguíneo, provocando enfermedades respiratorias y cardiovasculares, mientras que gases como el SO_2 y los NO_x generan irritación de las vías respiratorias y agravan afecciones como el asma y la bronquitis. El ozono a nivel del suelo afecta la función pulmonar y reduce la capacidad física, y el monóxido de carbono interfiere con el transporte de oxígeno en la sangre, representando un riesgo elevado en exposiciones prolongadas o en espacios cerrados.

Además de los efectos sobre la salud, los contaminantes atmosféricos ocasionan impactos ambientales y socioeconómicos relevantes. Contribuyen a la formación de lluvia ácida, smog fotoquímico y al deterioro de suelos, cuerpos de agua y vegetación, afectando la productividad agrícola y la biodiversidad. Asimismo, algunos contaminantes participan en el incremento del efecto invernadero y el cambio climático, mientras que otros aceleran la corrosión de infraestructuras y monumentos. Estos efectos evidencian la necesidad de implementar medidas de control, monitoreo y reducción de emisiones para proteger la calidad del aire y el bienestar humano.

Partículas Suspensas Totales

Corresponden a las partículas presentes en el aire con diversos tamaños y composiciones químicas, las cuales permanecen suspendidas y pueden producir efectos negativos en la salud y el ambiente (Zehnder et al., 2018).

Ejemplo: polvo atmosférico generado por suelos secos y por actividades urbanas.

Muestreador de grandes volúmenes

Es un equipo que recolecta partículas suspendidas mediante el paso de un flujo alto de aire a través de filtros de fibra, permitiendo medir concentraciones promedio durante un periodo establecido (Odum & Barrett, 2006).

Ejemplo: equipos de alto volumen utilizados para medición diaria de PST.

Figura N°1

Muestreador de Grandes Volúmenes (HI-VOL)



Nota: La figura muestra un equipo automático que sirve como muestreador y medidor en tiempo real, son sistemas sofisticados que ayudan a monitorear el aire de cualquier ciudad en tiempos prolongados, la figura ha sido realizada por los autores utilizando IA.

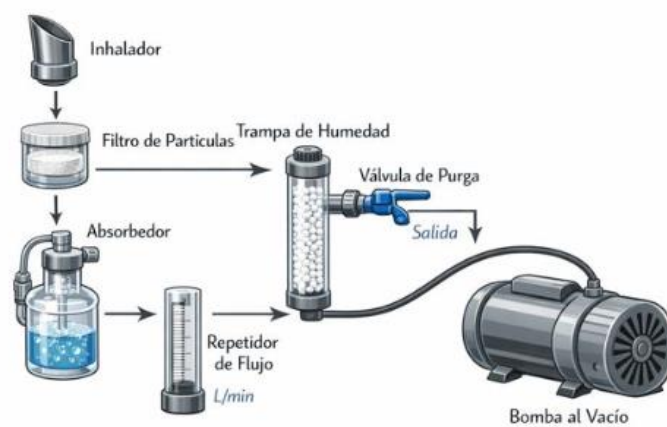
Fracciones de partículas suspendidas

Corresponden a subdivisiones de partículas atmosféricas según su tamaño aerodinámico, que determinan cómo ingresan y afectan el sistema respiratorio y los ecosistemas (Zehnder et al., 2018).

Ejemplo: PM10, PM2.5 y partículas ultrafinas.

Figura N°2

Tren de muestreo para material particulado periodos cortos



Nota: La figura muestra un equipo automático que sirve como muestreador y medidor en tiempo real, son sistemas sofisticados que ayudan a monitorear el aire de cualquier actividad económica por periodos cortos de tiempo, la figura ha sido realizada por los autores utilizando IA.

Equipos de medición

La modulación de contaminantes atmosféricos se refiere al conjunto de procesos y estrategias que permiten analizar, estimar y controlar la variación espacial y temporal de las concentraciones de contaminantes en la atmósfera. Esta modulación considera la interacción entre las fuentes de emisión, las condiciones meteorológicas (como viento, temperatura, radiación solar y precipitación) y las características físicas del entorno. A través de modelos matemáticos y herramientas de simulación, es posible representar el comportamiento de contaminantes como el material particulado, los óxidos de

nitrógeno, el dióxido de azufre y el ozono troposférico, facilitando la comprensión de su dispersión y acumulación en diferentes escenarios.

Los modelos de modulación atmosférica pueden ser empíricos, estadísticos o determinísticos, y se utilizan para predecir concentraciones de contaminantes bajo distintas condiciones ambientales. Estos modelos permiten evaluar el impacto de actividades humanas como el transporte, la industria y la quema de combustibles, así como el efecto de variables meteorológicas sobre la calidad del aire. La modulación resulta especialmente útil para identificar zonas críticas de contaminación, estimar la exposición de la población y analizar escenarios futuros asociados al crecimiento urbano o al cambio climático, constituyéndose en una herramienta clave para la gestión ambiental.

Desde el punto de vista de la planificación y el control ambiental, la modulación de contaminantes atmosféricos apoya la toma de decisiones orientadas a la reducción de emisiones y la protección de la salud pública. A partir de los resultados de los modelos, es posible diseñar estrategias de mitigación como restricciones al tráfico vehicular, optimización de procesos industriales y establecimiento de políticas de calidad del aire. En este sentido, la modulación no solo permite comprender el comportamiento de los contaminantes, sino también anticipar riesgos y evaluar la efectividad de medidas preventivas y correctivas en distintos contextos territoriales.

Fracciones PST

Son equipos diseñados para medir exclusivamente la fracción que conforma las partículas suspendidas totales mediante colectores de filtros donde el aire atraviesa un flujo regulado (Odum & Barrett, 2006).

Ejemplo: un colector de PST con flujo de 1,1 m³/min recolectando polvo ambiental.

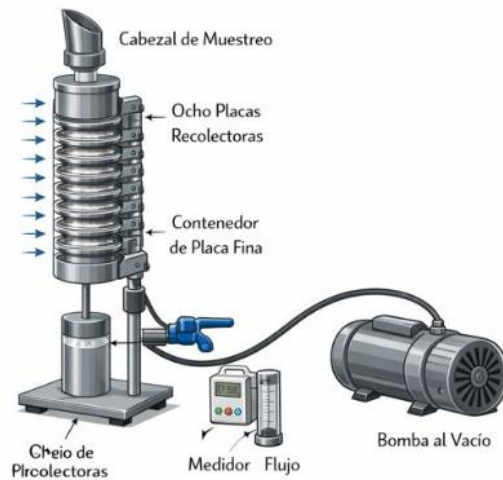
Impactadores PM10

Son equipos que separan mecánicamente partículas por tamaño, permitiendo recolectar únicamente aquellas menores a 10 micrómetros mediante un proceso de impacto aerodinámico (Zehnder et al., 2018).

Ejemplo: impactadores ciclónicos instalados en torres ambientales.

Figura N° 3

Esquema de Impactador de Cascada Anderson Modificado



Nota: La figura muestra un impactador de cascada Anderson modificado, es un equipo de muestreo de aire que permite separar y medir el material particulado según su tamaño. Opera por etapas con orificios decrecientes, reteniendo las partículas grandes primero y las finas en niveles inferiores, facilitando la evaluación de fracciones respirables y su impacto en la calidad del aire, la figura fue creada por los autores usando IA.

Medidas de mitigación

Las medidas de mitigación ambiental comprenden el conjunto de acciones, estrategias y tecnologías orientadas a reducir, controlar o prevenir los impactos negativos generados por las actividades humanas sobre el ambiente. En el contexto del control de la contaminación ambiental, estas medidas se aplican principalmente para disminuir la emisión de contaminantes al aire, agua y suelo, así como para minimizar los efectos adversos sobre la salud humana y los ecosistemas. Su implementación se basa en principios de prevención, eficiencia en el uso de recursos y responsabilidad ambiental, integrando aspectos técnicos, normativos y sociales.

Dentro del módulo de Control y Contaminación Ambiental, las medidas de mitigación se clasifican en medidas tecnológicas, operativas y de gestión ambiental. Las medidas tecnológicas incluyen el uso de equipos y sistemas de control como filtros, precipitadores electrostáticos, plantas de tratamiento de aguas residuales y tecnologías de producción más limpia. Por su parte, las medidas operativas se relacionan con la optimización de procesos productivos, el mantenimiento adecuado de equipos y la

reducción del consumo de insumos contaminantes. Las medidas de gestión abarcan la planificación ambiental, la aplicación de normativas, el monitoreo continuo y la capacitación del personal para asegurar prácticas sostenibles.

La incorporación de las medidas de mitigación en la guía de aprendizaje permite que el estudiante desarrolle competencias para identificar fuentes de contaminación, evaluar su magnitud y proponer soluciones viables acordes a la normativa ambiental vigente. Además, fomenta una visión preventiva y crítica frente a los problemas ambientales, promoviendo la toma de decisiones responsables y el compromiso con el desarrollo sostenible. De esta manera, el aprendizaje no solo se orienta al control de la contaminación existente, sino también a la prevención de futuros impactos ambientales.

Método de la pararosanilina

Es un procedimiento colorimétrico en el cual el dióxido de azufre reacciona con pararosanilina formando un compuesto coloreado cuya intensidad permite cuantificar la concentración de dicho gas (Zehnder et al., 2018).

Ejemplo: muestreo del aire urbano para determinar incrementos de SO₂ en zonas industriales.

Métodos de referencia para oxidantes fotoquímicos

Son métodos estandarizados que permiten medir gases formados en la atmósfera por reacciones químicas inducidas por energía solar, lo cual se relaciona directamente con procesos de contaminación secundaria (Odum & Barrett, 2006).

Ejemplo: medición de ozono ambiental generado por interacción de VOC y NO_x bajo radiación solar.

Métodos de referencia para bióxido de nitrógeno

Son procedimientos aprobados para determinar concentraciones de NO₂ mediante reacciones químicas específicas o mediante sensores validados comparados con estándares ambientales (Zehnder et al., 2018).

Ejemplo: determinación de NO₂ en avenidas con alta circulación vehicular.

UNIDAD 3: CONTAMINACIÓN DEL AGUA

Fuentes puntuales y no puntuales de contaminación

Las fuentes de contaminación del agua se refieren a los orígenes desde los cuales se incorporan sustancias contaminantes a los cuerpos hídricos, afectando sus características físicas, químicas y biológicas, y, por ende, su calidad y aptitud para distintos usos.

En el análisis de la calidad del agua y su gestión ambiental, resulta fundamental diferenciar entre fuentes puntuales y fuentes no puntuales, ya que esta clasificación permite comprender el comportamiento de los contaminantes en los sistemas acuáticos, facilitar su identificación y definir estrategias adecuadas de prevención, control y mitigación. El estudio de estas fuentes constituye un elemento clave para la evaluación de impactos, el diseño de programas de monitoreo y la toma de decisiones en la gestión sostenible del recurso hídrico.

Las fuentes puntuales de contaminación del agua son aquellas cuya descarga puede ser identificada de manera clara y localizada, ya que el contaminante ingresa al cuerpo de agua desde un punto específico y definido. Entre las principales fuentes puntuales se encuentran los efluentes industriales, las descargas de aguas residuales domésticas y municipales, los vertidos de plantas de tratamiento, así como las descargas provenientes de camales, hospitales y actividades mineras. Debido a su carácter localizado, estas fuentes permiten una mayor facilidad de monitoreo, control y regulación, mediante el análisis de parámetros de calidad del agua, la implementación de sistemas de tratamiento y el cumplimiento de los límites establecidos en la normativa ambiental vigente. Por su parte, las fuentes no puntuales de contaminación del agua se caracterizan por su origen difuso y disperso, sin un punto único de descarga identificable.

Este tipo de contaminación se genera principalmente a través de la escorrentía superficial, que transporta contaminantes hacia ríos, lagos, embalses y acuíferos. Entre las actividades asociadas a fuentes no puntuales se incluyen la agricultura intensiva (uso de fertilizantes y plaguicidas), la escorrentía urbana, la ganadería, la erosión del suelo y la deposición atmosférica.

El control de estas fuentes representa un mayor desafío para la gestión de la calidad del agua, ya que requiere enfoques integrales basados en la planificación del uso del suelo, la aplicación de buenas prácticas ambientales, la conservación de cuencas hidrográficas y la participación activa de los diferentes actores involucrados.

Ciclo Hidrológico

El ciclo hidrológico es el proceso natural mediante el cual el agua circula continuamente entre la atmósfera, la superficie terrestre y el subsuelo a través de la evaporación, condensación, precipitación, infiltración y escorrentía (Chow, Maidment & Mays, 1988).

Ejemplo: La evaporación del agua de los océanos, su condensación en nubes y posterior precipitación en forma de lluvia.

Usos del Agua

Los usos del agua se refieren a las distintas aplicaciones del recurso hídrico, incluyendo el consumo humano, la agricultura, la industria, la generación de energía y el uso recreativo, los cuales influyen directamente en su calidad y disponibilidad (Metcalf & Eddy, 2014).

Ejemplo: El uso del agua para riego agrícola o para abastecimiento de una ciudad.

Calidad del Agua

La calidad del agua se define como el conjunto de características físicas, químicas y biológicas que determinan su aptitud para un uso específico y su impacto en la salud humana y los ecosistemas (Chapman, 1996).

Ejemplo: El agua potable debe ser incolora, inodora y libre de microorganismos patógenos.

Monitoreo del Agua

El monitoreo del agua consiste en la observación sistemática y periódica de parámetros físicos, químicos y biológicos con el fin de evaluar el estado del recurso hídrico y detectar posibles fuentes de contaminación (Chapman, 1996).

Ejemplo: La toma mensual de muestras de un río para analizar su calidad.

Caracterización del Recurso

La identificación de contaminantes es una competencia esencial dentro del módulo de Control y Contaminación Ambiental, ya que permite al estudiante reconocer los agentes que alteran la calidad del ambiente y comprender su relación con las actividades humanas y los procesos naturales. En este sentido, se orienta al estudiante a analizar de manera crítica los distintos medios ambientales (aire, agua y suelo), considerando que un contaminante no se define únicamente por su presencia, sino por su concentración, persistencia y efectos sobre los sistemas naturales y la salud pública.

Durante el desarrollo de este tema, el estudiante fortalecerá la capacidad de clasificar e identificar contaminantes físicos, químicos y biológicos, de acuerdo con su origen y el medio afectado. Se abordarán contaminantes atmosféricos como gases y material particulado; contaminantes hídricos como metales pesados, nutrientes y microorganismos; y contaminantes del suelo como residuos peligrosos y compuestos orgánicos persistentes. Este proceso se apoyará en el uso de parámetros de calidad ambiental, registros de monitoreo y referencias normativas, promoviendo una comprensión técnica y contextualizada del problema.

Como resultado de aprendizaje, se espera que el estudiante sea capaz de identificar fuentes de contaminación, reconocer los principales contaminantes asociados y evaluar su impacto potencial, constituyendo una base sólida para la formulación de medidas de control y mitigación ambiental. Asimismo, este tema contribuye al desarrollo de una actitud responsable y preventiva frente a la gestión ambiental, reforzando la toma de decisiones informadas y el compromiso con el desarrollo sostenible en contextos locales y regionales

Parámetros Físicos

Los parámetros físicos del agua incluyen características observables y medibles como temperatura, color, turbidez, olor y sólidos suspendidos, las cuales influyen en su apariencia y uso potencial (Sawyer, McCarty & Parkin, 2003).

Ejemplo: La medición de la turbidez en un cuerpo de agua para evaluar la presencia de partículas en suspensión.

Tabla N°2

Requerimientos mínimos según parámetros Físicoquímicos para análisis

Parámetro	Tipo de frasco	Volumen mínimo	Preservación	Tiempo máximo de almacenamiento
Color	P o V	500 mL	Refrigerar a 4 °C	48 h
Conductividad	P o V	500 mL	Refrigerar a 4 °C	48 h
Turbiedad	P o V	500 mL	Refrigerar a 4 °C	48 h
Alcalinidad	P o V	500 mL	Refrigerar a 4 °C	48 h
Dureza	P o V	500 mL	Refrigerar a 4 °C	48 h
Sólidos (Totales, Suspendidos)	P o V	1 000 mL	Refrigerar a 4 °C	7 días
Cloro residual	P	250 mL	Analizar in situ	Inmediato
Cloruros	P o V	500 mL	Refrigerar a 4 °C	7 días
Fluoruros	P o V	500 mL	Refrigerar a 4 °C	7 días
Sulfatos	P o V	500 mL	Refrigerar a 4 °C	7 días
Cianuros	V	500 mL	pH > 12 con NaOH, refrigerar	14 días
Oxígeno disuelto	V	300 mL	Fijación in situ	Inmediato
DBO	V	1 000 mL	Refrigerar a 4 °C	48 h
DQO	V	500 mL	Acidificar con H ₂ SO ₄ , refrigerar	28 días
Aceites y grasas	V	1 000 mL	Acidificar con H ₂ SO ₄ , refrigerar	28 días
Hidrocarburos	V	1 000 mL	Refrigerar a 4 °C	7 días
Nitrógeno total	P o V	500 mL	Refrigerar a 4 °C	28 días

Nitrógeno amoniacal	P o V	500 mL	Refrigerar a 4 °C	7 días
Nitrógeno orgánico	P o V	500 mL	Refrigerar a 4 °C	28 días
Nitratos	P o V	500 mL	Refrigerar a 4 °C	48 h
Nitritos	P o V	500 mL	Refrigerar a 4 °C	48 h
Fósforo total	P o V	500 mL	Acidificar con H ₂ SO ₄ , refrigerar	28 días
Fósforo soluble	P o V	500 mL	Filtrar y refrigerar	48 h
Fósforo hidrolizable	P o V	500 mL	Refrigerar a 4 °C	28 días
SAAM	P o V	500 mL	Refrigerar a 4 °C	7 días

P: Plástico | V: Vidrio | B: Bolsa plástica sellada

SAAM: Sustancias Activas al Azul de Metileno

Registrar fecha, hora, punto de muestreo y responsable.

Nota: Esta tabla presenta los requerimientos mínimos para la toma y conservación de muestras de agua destinadas al análisis de parámetros fisicoquímicos, tales como color, conductividad, turbiedad, sólidos, nutrientes y compuestos orgánicos. Se especifica el tipo de frasco, el volumen mínimo requerido, las condiciones de preservación (principalmente refrigeración y/o acidificación) y el tiempo máximo de almacenamiento, con el fin de garantizar la representatividad y confiabilidad de los resultados analíticos (APHA, 2017).

Parámetros Químicos

Los parámetros químicos describen la composición del agua en términos de sustancias disueltas, tales como pH, alcalinidad, dureza, oxígeno disuelto, nutrientes y compuestos orgánicos e inorgánicos (Metcalf & Eddy, 2014).

Ejemplo: La determinación del pH del agua para conocer su acidez o alcalinidad.

Tabla N°3

Requerimientos mínimos según parámetros metálicos para análisis

Metales

Parámetro	Tipo de frasco	Volumen mínimo	Preservación	Tiempo máximo
Metales (Cd, Cu, Cr, Mn, Pb, Zn, Fe)	P o V	500 mL	Acidificar con HNO ₃ (pH < 2), refrigerar	6 meses
Arsénico	P o V	500 mL	Acidificar con HNO ₃ , refrigerar	6 meses
Mercurio	V	500 mL	Acidificar con HNO ₃ , refrigerar	28 días

Nota: La tabla correspondiente a metales detalla los procedimientos básicos de muestreo y preservación para la determinación de metales pesados y metaloides en agua, incluyendo elementos como cadmio, plomo, cromo, arsénico y mercurio. Se destaca el uso de acidificación con ácido nítrico como método de preservación, así como los tiempos prolongados de almacenamiento, necesarios para evitar pérdidas, adsorción o precipitación de los analitos antes del análisis de laboratorio, (EPA, 2017).

Parámetros Bacteriológicos

Los parámetros bacteriológicos evalúan la presencia de microorganismos indicadores de contaminación fecal, como coliformes totales y fecales, que permiten estimar el riesgo sanitario del agua (Tchobanoglous et al., 2014).

Ejemplo: El análisis de coliformes fecales en agua destinada al consumo humano.

Tabla N°4

Requerimientos mínimos según parámetros Microbiológicos para análisis

Parámetro	Tipo de frasco	Volumen mínimo	Preservación	Tiempo máximo
Bacterias heterotróficas	V estéril	250 mL	Refrigerar a 4 °C	6–8 h
Coliformes totales y fecales	V estéril	250 mL	Refrigerar a 4 °C	6–8 h
Salmonella (A/P)	V estéril	1 000 mL	Refrigerar a 4 °C	24 h
Salmonella (NMP)	V estéril	1 000 mL	Refrigerar a 4 °C	24 h

Clostridios sulfato reductores	V estéril	250 mL	Refrigerar a 4 °C	24 h
Estreptococos fecales	V estéril	250 mL	Refrigerar a 4 °C	6–8 h
Vibrio cholerae (A/P – NMP)	V estéril	1 000 mL	Refrigerar a 4 °C	24 h
Clorofila	V oscuro	1 000 mL	Filtrar y congelar	7 días
Enteroparásitos	B o V	2–5 L	Refrigerar a 4 °C	24 h
Fitoplancton	V	1 000 mL	Fijar con Lugol	30 días
Zooplancton	V	1 000 mL	Fijar con formalina	30 días

NMP: Número Más Probable | A/P: Ausencia / Presencia

Mantener siempre cadena de frío durante el transporte.

Nota: Esta tabla describe los criterios de muestreo para el análisis microbiológico y biológico del agua, incluyendo bacterias indicadoras, patógenos, fitoplancton, zooplancton y enteroparásitos. Se enfatiza el uso de frascos estériles, la cadena de frío, los tiempos cortos de almacenamiento y, en algunos casos, la fijación química, con el objetivo de preservar la viabilidad o estructura de los organismos y asegurar resultados confiables en la evaluación de la calidad sanitaria y ecológica del agua, (WHO, 2017).

Cálculos de DBO, DQO, COT's

Los cálculos de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), Demanda Química de Oxígeno (DQO) y Carbono Orgánico Total (COT) son fundamentales para evaluar el nivel de contaminación orgánica en aguas naturales y residuales. En este módulo, el estudiante comprenderá que estos parámetros permiten cuantificar la carga contaminante y analizar el impacto que la materia orgánica genera sobre el oxígeno disuelto y el equilibrio de los ecosistemas acuáticos. Su correcta determinación e interpretación es clave para el diseño, operación y evaluación de sistemas de tratamiento de aguas. En el caso de la DBO, el estudiante aprenderá a calcularla a partir de la diferencia entre el oxígeno disuelto inicial y final, generalmente medida a los cinco días de incubación (DBO₅).

Ejemplo: si una muestra de agua presenta un oxígeno disuelto inicial de 8,5 mg/L y, luego de cinco días, un valor de 3,0 mg/L, la DBO₅ se calcula como:

$$DBO_5 = 8,5 - 3,0 = 5,5 \text{ mg/L.}$$

Este valor permite interpretar el grado de contaminación biodegradable presente en la muestra y su posible impacto sobre el cuerpo receptor.

Para la DQO, se enfatiza el cálculo a partir del consumo de un agente oxidante fuerte, generalmente dicromato de potasio, expresando la cantidad total de materia orgánica oxidable.

Ejemplo: a partir de datos de laboratorio, si el consumo equivalente de oxígeno es de 250 mg/L, este valor corresponde directamente a la DQO de la muestra.

La comparación entre DBO y DQO permite al estudiante analizar la proporción de materia orgánica biodegradable y no biodegradable, lo cual es esencial para seleccionar tratamientos adecuados.

En el caso del COT, el estudiante trabajará con datos obtenidos mediante equipos analíticos que cuantifican directamente el carbono orgánico presente en la muestra.

Ejemplo: si un análisis reporta un COT de 90 mg/L, este valor indica la concentración total de carbono orgánico, siendo útil para evaluaciones rápidas de contaminación y para el seguimiento de la eficiencia de procesos de tratamiento.

Se orienta al estudiante a relacionar el COT con los valores de DBO y DQO para una interpretación integral de la calidad del agua.

Como parte de las prácticas de aprendizaje, se propone la realización de actividades de laboratorio y análisis de casos, tales como:

Determinación experimental de DBO₅ en muestras de agua superficial o residual.

Cálculo e interpretación de DQO y COT a partir de datos reales o simulados.

Comparación de resultados antes y después de un proceso de tratamiento.

Análisis de cumplimiento de límites permisibles según normativa ambiental vigente.

Estas prácticas permitirán que el estudiante desarrolle habilidades técnicas, analíticas y críticas, fortaleciendo su capacidad para evaluar la contaminación hídrica y proponer medidas de control y mitigación ambiental fundamentadas en datos técnicos confiables.

Conductividad

La conductividad eléctrica del agua es una medida de su capacidad para conducir corriente eléctrica, la cual depende de la concentración de iones disueltos y se utiliza como indicador indirecto de salinidad (Sawyer et al., 2003).

Ejemplo: Valores elevados de conductividad en aguas subterráneas con alta concentración de sales.

Aniones y Cationes

Los aniones y cationes son especies químicas con carga negativa y positiva, respectivamente, disueltas en el agua, como cloruros, sulfatos, sodio, calcio y magnesio, que determinan muchas de sus propiedades químicas (Hem, 1985).

Ejemplo: La presencia de calcio y magnesio responsables de la dureza del agua.

Medidas de mitigación y control.

Las medidas de mitigación y control forman parte esencial de la gestión ambiental, ya que permiten prevenir, reducir o corregir los impactos negativos derivados de las actividades humanas sobre el ambiente. Las medidas de mitigación se orientan a disminuir la magnitud o intensidad de dichos impactos mediante acciones como la reducción de emisiones contaminantes, el uso eficiente de los recursos naturales, la aplicación de tecnologías limpias y la recuperación de áreas degradadas, pudiendo implementarse en las distintas fases de un proyecto o actividad.

Por su parte, las medidas de control se enfocan en el seguimiento y verificación del desempeño ambiental a través del monitoreo, la evaluación de indicadores, la inspección de procesos y el control de emisiones, descargas y residuos, asegurando el cumplimiento de la normativa ambiental vigente. La aplicación integrada de medidas de mitigación y control contribuye a una gestión ambiental preventiva y correctiva, orientada a la sostenibilidad, la reducción de riesgos y la mejora continua.

DBO₅

La Demanda Bioquímica de Oxígeno a cinco días (DBO₅) es la cantidad de oxígeno requerida por los microorganismos para degradar la materia orgánica biodegradable presente en el agua, y es un indicador clave de contaminación orgánica (Metcalf & Eddy, 2014).

Ejemplo: Un valor alto de DBO₅ en aguas residuales domésticas.

DQO

La Demanda Química de Oxígeno (DQO) mide la cantidad de oxígeno necesaria para oxidar químicamente la materia orgánica e inorgánica presente en el agua, proporcionando una estimación rápida de la carga contaminante total (Sawyer et al., 2003).

Ejemplo: La determinación de DQO en efluentes industriales.

Oxígeno Disuelto (OD)

El oxígeno disuelto es la cantidad de oxígeno molecular presente en el agua, esencial para la vida acuática y ampliamente utilizado como indicador del estado ecológico de un cuerpo de agua (Chapman, 1996).

Ejemplo: La medición de oxígeno disuelto en un río para evaluar si es apto para la vida de peces.

UNIDAD 4: CONTAMINACIÓN DEL SUELO

Fuentes puntuales y no puntuales de contaminación

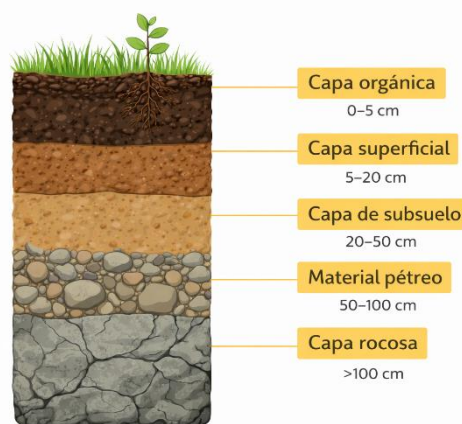
Las fuentes de contaminación del suelo se clasifican en puntuales y no puntuales según su grado de localización y control. Las fuentes puntuales corresponden a actividades claramente identificables, como industrias, estaciones de servicio o rellenos sanitarios, mientras que las fuentes no puntuales se originan de manera difusa, asociadas a prácticas agrícolas, escorrentía urbana y cambios en el uso del suelo. Esta clasificación permite priorizar acciones de monitoreo y control ambiental en función del riesgo y la extensión del impacto.

Cambio y Uso del Suelo

El cambio de uso del suelo genera alteraciones significativas en su estructura, permeabilidad y capacidad de retención de contaminantes. Cuando un suelo natural es reemplazado por infraestructura urbana, la infiltración disminuye notablemente y la escorrentía superficial aumenta, facilitando el transporte de sedimentos y contaminantes. En áreas donde la cobertura vegetal se reduce en más del 70 %, la pérdida de suelo y nutrientes se incrementa, afectando la calidad ambiental del entorno.

Imagen N°2

Capas del suelo en detalle



Nota: Perfil esquemático de las capas del suelo, donde se identifican la capa orgánica (O), la capa superficial (A), el subsuelo (B), el material parental o pétreo (C) y la capa rocosa (R). Cada horizonte se representa con profundidades aproximadas, mostrando la transición desde la zona rica en materia orgánica y alta actividad biológica en la superficie, hasta la roca madre consolidada en los estratos

más profundos. Este esquema permite comprender la estructura vertical del suelo y su importancia en los procesos de fertilidad, retención de agua y soporte de la vegetación, imagen elaborada con IA.

Derrames de Combustibles

Los derrames de combustibles constituyen una fuente frecuente de contaminación del suelo por hidrocarburos. La liberación accidental de grandes volúmenes de gasolina o diésel puede generar concentraciones elevadas de compuestos aromáticos en el suelo, los cuales presentan alta movilidad y riesgo de infiltración hacia acuíferos. Estos eventos afectan la biota del suelo y pueden inutilizar el terreno para usos agrícolas o residenciales.

Contaminación por Lixiviación

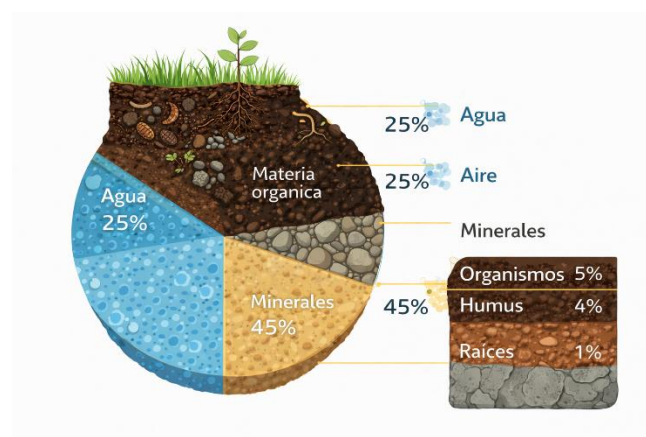
La lixiviación ocurre cuando el agua se infiltra a través del suelo y moviliza contaminantes solubles hacia capas más profundas. En sistemas de disposición de residuos sin control adecuado, la generación de lixiviados puede alcanzar volúmenes considerables, transportando nutrientes, metales pesados y compuestos orgánicos hacia aguas subterráneas, lo que representa un riesgo ambiental y sanitario (FAO, 2018).

Remediación de suelos

La remediación de suelos comprende un conjunto de técnicas orientadas a reducir la concentración de contaminantes o limitar su movilidad, considerando el uso actual y futuro del terreno, el nivel de riesgo y la viabilidad técnica.

Imagen N°3

Detalle de la composición del suelo



Nota: Los porcentajes de composición del suelo presentados corresponden a valores referenciales para un suelo mineral promedio. La proporción de agua y aire puede variar en función del contenido de humedad, la textura del suelo, el grado de compactación y las condiciones climáticas. La materia orgánica incluye organismos del suelo, humus y raíces, cuya distribución depende del uso del suelo y de la actividad biológica presente.

Identificación de contaminantes

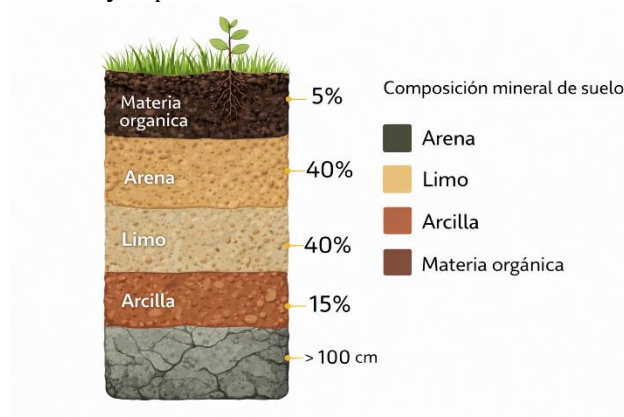
La identificación de contaminantes es una fase esencial del diagnóstico ambiental, ya que permite establecer el tipo de sustancia presente, su concentración y su comportamiento en el suelo.

Formación y capas del suelo

El suelo se forma por procesos de meteorización física, química y biológica, organizándose en horizontes con propiedades diferenciadas. Las capas superficiales suelen presentar mayor contenido de materia orgánica, lo que incrementa la capacidad de retención de contaminantes, especialmente de origen orgánico.

Imagen N°4

Composición mineral del suelo y capas



Nota: La composición mineral del suelo proviene de la desintegración de la roca madre y se organiza en capas. La capa superficial contiene minerales finos y es la más fértil, el subsuelo acumula minerales arrastrados desde arriba, y las capas más profundas conservan el material pétreo y la roca original, que son la fuente de los minerales del suelo.

Composición y tipos de suelo

La textura del suelo influye directamente en la movilidad de contaminantes. En suelos arcillosos, la alta capacidad de intercambio catiónico favorece la retención de metales pesados, mientras que en suelos arenosos la elevada permeabilidad facilita la migración vertical de contaminantes hacia capas profundas.

Tabla N°5

Características químicas del suelo

Símbolo	Nombre del elemento	Número de oxidación común	Peso atómico (g/mol)	Forma iónica común	Peso iónico (g/mol)
N	Nitrógeno	-3	14,01	NO ₃ ⁻	62
P	Fósforo	5	30,97	PO ₄ ³⁻	94,97
K	Potasio	1	39,1	K ⁺	39,1
Ca	Calcio	2	40,08	Ca ²⁺	40,08
Mg	Magnesio	2	24,31	Mg ²⁺	24,31
S	Azufre	6	32,06	SO ₄ ²⁻	96,06
Fe	Hierro	0,666667	55,85	Fe ²⁺ / Fe ³⁺	55,85
Mn	Manganeso	2	54,94	Mn ²⁺	54,94
Zn	Zinc	2	65,38	Zn ²⁺	65,38
Cu	Cobre	2	63,55	Cu ²⁺	63,55
B	Boro	3	10,81	BO ₃ ³⁻	58,81

Nota: Características químicas de elementos presentes en el suelo. El cuadro presenta los principales nutrientes y elementos químicos relevantes en la química del suelo, indicando su símbolo, nombre, número de oxidación común, peso atómico y forma iónica predominante. Esta información permite comprender el comportamiento químico de los elementos en el suelo, su disponibilidad para las plantas y su interacción con los procesos de intercambio iónico, fertilidad y calidad del suelo.

Contaminación por residuos sólidos

Residuos Peligrosos

Los residuos peligrosos contienen sustancias que pueden generar efectos adversos sobre el ambiente y la salud humana. La disposición inadecuada de residuos como baterías, aceites usados o solventes puede liberar metales pesados y compuestos tóxicos capaces de contaminar extensas áreas de suelo.

Residuos Tóxicos

Los residuos tóxicos incluyen sustancias químicas persistentes que afectan la biodiversidad y la salud humana. En suelos agrícolas, la acumulación progresiva de pesticidas puede superar valores aceptables, reduciendo la productividad del suelo y generando riesgos por bioacumulación.

Residuos Sólidos Urbanos

Los residuos sólidos urbanos, cuando no son gestionados adecuadamente, generan lixiviados y gases que deterioran la calidad del suelo. En botaderos a cielo abierto, la producción continua de lixiviados favorece la contaminación del suelo y de las aguas subterráneas circundantes.

Medidas de mitigación y control.

Las medidas de mitigación y control incluyen la segregación en la fuente, el tratamiento adecuado de residuos, el monitoreo ambiental y la aplicación de barreras físicas. La implementación de sistemas de impermeabilización y captación de lixiviados reduce de forma significativa la infiltración de contaminantes al suelo.

Proceso de transformación de contaminantes

Los contaminantes presentes en el suelo pueden sufrir transformaciones físicas, químicas y biológicas que modifican su toxicidad y movilidad.

Mecanismos de transporte de contaminantes

Los contaminantes pueden desplazarse mediante procesos de advección, difusión, escorrentía y volatilización. En suelos expuestos, los compuestos orgánicos volátiles pueden migrar hacia la atmósfera, mientras que los contaminantes solubles tienden a desplazarse hacia capas profundas.

Factores de Influencia por contaminantes

Factores como el pH, la humedad, la temperatura y la actividad microbiana influyen en el comportamiento de los contaminantes. En suelos con pH ácido, la movilidad de metales pesados aumenta, incrementando su biodisponibilidad y riesgo ambiental (FAO, 2015).

Tratamiento y remediación de suelos

Métodos Físicos

Los métodos físicos de remediación incluyen la excavación, el confinamiento y el lavado de suelos contaminados. Estas técnicas permiten reducir rápidamente la concentración de contaminantes en áreas críticas, aunque pueden implicar altos costos operativos.

Ejemplo de balance de masas: Derrame de hidrocarburo en el suelo

1. Descripción del caso

Se produce un derrame accidental de diésel sobre un suelo agrícola.

- Volumen derramado: 50 litros
- Densidad del diésel: 0,85 kg/L
- Área afectada: 10 m²
- Profundidad del suelo impactado: 0,20 m
- Tiempo de evaluación: 24 horas

2. Cálculo de la masa derramada (Entrada)

$$\begin{aligned} \text{Masa derramada} &= \text{Volumen} \times \text{Densidad} \\ \text{Masa derramada} &= 50 \text{ L} \times 0,85 \text{ kg/L} = 42,5 \text{ kg} \end{aligned}$$

Entrada total al sistema = 42,5 kg de diésel

3. Identificación de salidas

Tras el análisis del sitio, se estima que:

- Evaporación: 15 %
- Escorrentía superficial: 10 %
- Infiltración profunda: 20 %

4. Cálculo de pérdidas (Salidas)

- Evaporación:

$$42,5 \times 0,15 = 6,38 \text{ kg}$$

- Escorrentía:

$$42,5 \times 0,10 = 4,25 \text{ kg}$$

- Infiltración:

$$42,5 \times 0,20 = 8,50 \text{ kg}$$
$$\text{Pérdidas totales} = 19,13 \text{ kg}$$

5. Acumulación en el suelo

$$\text{Masa acumulada} = \text{Masa derramada} - \text{Pérdidas}$$
$$42,5 - 19,13 = 23,37 \text{ kg}$$

Masa retenida en el suelo = 23,37 kg

6. Balance de masas final

Entrada = Salidas + Acumulación

$$42,5 = 19,13 + 23,37$$

El balance se cumple.

7. Interpretación ambiental

- Más del 55 % del contaminante permanece en el suelo, representando un riesgo para cultivos y aguas subterráneas.
- Se justifica la aplicación de medidas de remediación, como biorremediación o remoción de suelo contaminado.
- Este balance sirve como base para evaluar impactos y costos de recuperación.

Biorremediación

La biorremediación utiliza microorganismos para degradar contaminantes orgánicos bajo condiciones controladas de oxígeno, nutrientes y humedad. Este método ha demostrado ser eficaz en la reducción de hidrocarburos en suelos impactados, constituyéndose en una alternativa sostenible y de bajo impacto ambiental (UNEP, 2019).

Ejemplo de biorremediación: Derrame de hidrocarburo en el suelo

Tipo de biorremediación seleccionada

Se aplica biorremediación in situ, mediante bioestimulación, que consiste en estimular los microorganismos nativos del suelo para acelerar la degradación del diésel.

1. Técnicas utilizadas:

- Aireación del suelo (labranza superficial)
- Adición de nutrientes (N y P)
- Control de humedad (60–80 % de capacidad de campo)
- Ajuste de pH (6,5 – 7,5)

2. Supuestos del proceso

Para fines académicos, se consideran los siguientes supuestos:

- Eficiencia de biodegradación: **70 %**
- Tiempo de tratamiento: **90 días**
- Condiciones ambientales controladas

3. Cálculo de la degradación biológica

$$\begin{aligned} \text{Masa degradada} &= \text{Masa acumulada} \times \text{Eficiencia} \\ 23,37 \text{ kg} \times 0,70 &= 16,36 \text{ kg} \end{aligned}$$

Diésel degradado biológicamente = 16,36 kg

4. Masa remanente tras la biorremediación

$$\text{Masa residual} = 23,37 - 16,36 = 7,01 \text{ kg}$$

Contaminante residual en el suelo = 7,01 kg

5. Balance de masas con biorremediación

Concepto	Masa (kg)
Derrame inicial	42,50
Pérdidas iniciales	19,13
Acumulación inicial en suelo	23,37
Biodegradación	16,36
Residual en suelo	7,01

6. Interpretación ambiental

- La biorremediación reduce la contaminación del suelo en aprox. 70 %.
- El contaminante residual puede tratarse con una segunda fase o técnicas complementarias (fitorremediación).
- El suelo recupera progresivamente su funcionalidad agrícola.
- El proceso es económico, sostenible y alineado con los ODS 12, 13 y 15.

7. Conclusión técnica

La aplicación de biorremediación in situ mediante bioestimulación resulta una estrategia viable y eficiente para la recuperación del suelo contaminado por diésel, disminuyendo significativamente la masa del contaminante y el riesgo ambiental asociado.

Referencias Bibliográficas (NIVEL 1)

Chapman, D. (1996). Water quality assessments: A guide to the use of biota, sediments and water in environmental monitoring (2nd ed.). UNESCO/WHO/UNEP. <https://unesdoc.unesco.org>

Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). Applied hydrology. McGraw-Hill.

FAO. (2015). Status of the world's soil resources. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org>

FAO. (2018). Soil pollution: A hidden reality. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org>

García Pinto, C. L. (2021). Toxicología ambiental. Editorial universitaria de acceso abierto.

Hem, J. D. (1985). Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water. U.S. Geological Survey. <https://pubs.usgs.gov>

Metcalf & Eddy, Inc. (2014). Wastewater engineering: Treatment and resource recovery (5th ed.). McGraw-Hill Education.

Odum, E. P., & Barrett, G. W. (2006). Fundamentals of ecology (5th ed.). Thomson Brooks/Cole.

Sawyer, C. N., McCarty, P. L., & Parkin, G. F. (2003). Chemistry for environmental engineering and science (5th ed.). McGraw-Hill.

Tchobanoglous, G., Burton, F. L., & Stensel, H. D. (2014). Wastewater engineering: Treatment and reuse. McGraw-Hill.

UNEP. (2019). Environmental pollution and soil degradation. United Nations Environment Programme. <https://www.unep.org>

Zehnder, A. J. B., et al. (2018). Environmental pollution and control. Open academic publication.

SUCRE



ISBN: 978-9942-590-11-4



 [SUCREInstitutooficial](#)  [@SUCREInstituto](#)  [@SUCREInstituto](#)