

QUIMICA AMBIENTAL

**Vino viejo en odres nuevos
Vino nuevo en odres viejos**

Ariel H. Guerrero

1. Presentación: vinos y odres

La Química es la disciplina de la Ciencia que estudia la composición de los sistemas materiales y sus cambios de composición. La relación entre los seres vivos y el ambiente puede simbolizarse en el diagrama:



y ser expresada para los seres humanos por la frase de Ortega y Gasset: "Yo soy yo y mi circunstancia", estructura y proceso del contorno. La Ecología interpreta esas relaciones tal como se presentan en la Naturaleza -"proceso normal"- y también cuando resultan deterioradas por fenómenos naturales ("natur-génicos") y/o por la actividad humana ("antropogénicos"), generalmente de tipo tecnológico ("tecnogénicos").

La Química Ambiental estudia esos temas desde el punto de vista químico, con enfoque integral ("holístico"), actitud preventiva, e intención curativa para entender los procesos de **contaminación**, verdadera patología del ambiente, y los de **protección** y defensa ambiental, por **depuración** hacia un ambiente sano. Las **técnicas y métodos** de la Química Analítica, originalmente diseñados para otros fines, son los medios apropiados para determinar los contaminantes e investigar los procesos en cuanto a las transformaciones físicas y a las reacciones químicas que en ellos ocurren, en particular:

- Microanálisis
- Espectroquímica
- Electroquímica
- Radioquímica y Química Nuclear
- Resonancia Magnética Nuclear
- Quimimetría

Las técnicas del Microanálisis han llegado a niveles no imaginados para muestras pequeñas y combinadas y con los métodos instrumentales han llevado el Análisis de Vestigios hasta límites que se creían inalcanzables (10^{-9}). La Espectroquímica de emisión y absorción reina en los laboratorios de excelencia, mediante fluorescimetría en el visible y por rayos X, absorción atómica y molecular-iónica (UV-Vis), infrarrojo (IR), microondas (MO) y resonancia magnética nuclear (RMN) entre las principales. Aunque no tan difundida, salvo potenciometría y polarografía con sus electrodos especiales y bioelectrodos, la Electroquímica dispone de varios métodos notables como ciertas variantes de la polarografía y, en particular, la voltametría cíclica que permite un rastreo cuali-cuantitativo de los procesos redox presentes en una muestra. La Radioquímica y Química Nuclear contribuyen con todos sus métodos analíticos, especialmente el de la activación, limitado por la instrumentación compleja pero con umbrales de sensibilidad insuperables. La Resonancia Magnética Nuclear y sus variantes, así como otras técnicas (p. ej.: las de efecto Mossbauer), pertenecen al grupo anterior, pero no han alcanzado uso común más allá del laboratorio de investigación por razones de costo.

La Quimimetría puede ser considerada una técnica intelectual para potenciar los métodos de la Química por medio de las herramientas matemáticas más elaboradas, los métodos estadísticos, la cibernetica y la teoría general de sistemas, así como de la informática superior (sistemas expertos, "inteligencia artificial"). Para completar el panorama de la Química Analítica falta mencionar las técnicas cromatográficas refinadas hasta un nivel inconcebible a mediados de este siglo, frente a los métodos separativos convencionales.

Para mostrar las adaptaciones e inadaptaciones del talento humano en la evolución histórica de la creatividad hemos clasificado algunos de los temas de la Química Analítica y Ambiental en vinos y odres, viejos y nuevos:

Vino Viejo:

ciclos de elementos y compuestos; límites de toxicidad; mecanismos de detoxificación; métodos analíticos clásicos (gravimetría, volumetría, y métodos instrumentales simples).

Vino nuevo:

cadenas y ciclos energéticos; eutrofización; biodegradación. Métodos analíticos instrumentales (espectroquímicos, electroquímicos, magnéticos, termogravimétricos, microcalorimétricos, etc.).

Odres nuevos:

ecología; contaminación; análisis de vestigios; calidad de vida; seguridad laboral; malapráctica profesional; desarrollo; crecimiento y maduración.

Odres viejos:

toxicología; higiene sanitaria; química forense; análisis químico; estudio de tiempo y fatiga ("threbligs"); progreso.

Surge claramente que gran parte de los temas y métodos ya existían antes de la Segunda Guerra Mundial. Lo que cambió fue el planteo social derivado del aumento extraordinario de la población y de la industria, con muchos problemas para solucionar, p.ej.: la contaminación del aire y del agua (el suelo, más lentamente, aunque sea inexorablemente alcanzado) y la aparición de nuevas tecnologías de difícil control, como la nuclear. La mayoría de esos problemas han entrado en el tramo de crecimiento exponencial, fenómeno natural no previsto por los dirigentes ni por los seres humanos en general, que deberán ser enfrentados con decisión, capacidad y honestidad.

2. Problemas Ambientales

La prospectiva más optimista nos anticipa los siguientes datos para el siglo XXI, en trazos gruesos:

- La población mundial crecerá de los 4.000 millones de 1980 hasta 6.350 millones (más de 50%) y 90% de esos 2.350 millones aumentará en los países más pobres.
- La producción de alimentos se aumentará más, sólo en los países más desarrollados.
- El consumo de agua se duplicará, en casi la mitad del mundo.
- La tierra arable sólo aumentará 4%, grave disminución "per capita".
- La pesca mundial ya habrá descendido de su máximo y el petróleo habrá alcanzado el suyo, con tendencia declinante en ambos casos.
- La provisión de madera para construcciones disminuirá 50% y habrá desaparecido 40% de los bosques.
- El deterioro de suelos agrícolas se extenderá por el mundo debido a múltiples causas: erosión, desertificación, salinización, pérdida de materia orgánica, inundación, etc.
- Las concentraciones de dióxido de carbono y de ozono, el primero por exceso y el segundo por defecto, amenazarán el clima del mundo.

Pasamos a describir los problemas específicos fundamentales, que han de ser investigados en primera instancia y controlados sistemáticamente mediante los métodos analíticos de la Química.

2.1. Agujero en la capa de ozono (Ver Ap. I)

Sin duda es el problema más espectacular y con mayor difusión en los medios de comunicación social. El ozono es un gas con olor característico muy potente, de ahí su nombre, que resulta de la combinación de tres átomos de oxígeno en su forma alotrópica trioxígeno (O_3). Se puede preparar en el laboratorio por descarga eléctrica "silenciosa" y por oxidación anódica electroquímica con temperatura baja.

Existe en la atmósfera cercana (tropósfera), pero en proporción muy pequeña; en cambio su concentración es mucho mayor en la estratosfera, principalmente por acción de la radiación ultravioleta, a la cual absorbe a su vez, por lo que actúa como pantalla protectora frente a esa radiación para los habitantes de nuestro planeta.

Hasta hace menos de diez años esta acción no era mencionada habitualmente en los libros de Química ni en las encyclopedias generales. A partir de 1984 se descubre el "agujero de ozono" sobre el continente antártico, cuyo tamaño aumenta gradualmente por lo menos desde los años de la década del setenta durante los meses de septiembre y octubre, al finalizar el invierno polar del sur. Con notable regularidad, cuando el Sol "calienta" suficientemente la estratosfera hacia noviembre, la capa de ozono se regenera hasta niveles de concentración casi normales. En 1986 se

iniciaron las campañas anuales de investigación NOZE (National Ozone Expedition de la National Science Foundation).

De las tres teorías propuestas: actividad solar exaltada, dinámica atmosférica peculiar de esa zona, y la descomposición de la molécula de ozono por reacción en cadena con átomos libres de cloro, la primera ha quedado descartada. En efecto, según ésta, la radiación solar de potencia descompone a la molécula de nitrógeno en átomos que deberían oxidarse a óxidos de nitrógeno ($\text{NO}_x = \text{NO}, \text{NO}_2$, etc.) y aumentar su concentración, cuando lo que se observa es lo opuesto. En la actualidad se acepta, aunque no definitivamente, la acción de los átomos libres de cloro, complementada por la de superficie en los cristalitos de hielo que forman las nubes polares estratosféricas.

Los átomos de cloro se originan, según esa teoría, en la descomposición de los clorofluohidrocarburos (p.ej. CCl_3F), utilizados como gases refrigerantes, propulsores, y materia prima para síntesis de polímeros (Apéndice I).

2.2 Lluvia ácida y smog

Las combustiones de combustibles fósiles (carbón y petróleo, así como sus derivados) por una parte, y la descomposición natural de los residuos vegetales (hojas, cortezas y vegetales muertos en general) producen dióxido con algo de monóxido de carbono, varios óxidos de nitrógeno (NO_x) y dióxido de azufre. Estos últimos, por acción del agua, se transforman en ácido nítrico, y por oxidación intermedia, en trióxido y luego en ácido sulfúrico.

La **lluvia ácida** resulta del arrastre del ácido nítrico atmosférico (líquido), y de los óxidos que lo van generando, por la lluvia, que provoca la consiguiente corrosión de los metales y el deterioro de la vegetación (Apéndice II). Los bosques son atacados lentamente, pero las aguas superficiales y costeras de lagos y lagunas actúan enérgicamente y afectan también la vida animal. La contaminación del aire por esos óxidos ataca a la vías respiratorias además de efectos específicos como la capacidad esterilizante, en el sentido genético, del dióxido y tetróxido de nitrógeno. En forma más general se considera que la lluvia ácida incluye al sulfúrico y algunos agregan el ozono que acompaña las reacciones de los óxidos de nitrógeno. No existe, en cambio, una buena explicación sobre el transporte de nitratos a larga distancia.

El **smog** (smoke: humo + fog: niebla, y tal vez + smut y smudge: tizne, hollín) es una niebla cuyas gotas tienen microgotas de sulfúrico que acompaña al núcleo de condensación contaminante. Para producirse se necesita que coincidan lugares "encerrados" como en ciertas megalópolis (Tokio, México), neblinosos o brumosos, en los cuales las combustiones de vehículos y/o de industrias acumulan cantidades sustanciales de sulfúrico: valle del Mosa (1930), Londres (1952: 4.000 muertos), y más recientemente Los Angeles y Santiago de Chile.

Al partir y sobre todo al llegar de un viaje en avión es posible observar ciudades populosas envueltas en una nube de grisácea a negra de smog, la cual da una idea del aire que se respira en ellas.

Por su relación con las combustiones, la lluvia ácida y el smog están ligados con la producción de CO₂ de ese origen, factor predominante de la sección siguiente.

2.3 Efecto invernadero

La luz del Sol pasa por la atmósfera sin mayor absorción; el calentamiento lo produce al incidir en la corteza terrestre, la cual emite una elevada proporción de radiación infrarroja. El calor que esto produce se disipa hacia el espacio exterior, pero el dióxido de carbono (CO₂) atmosférico absorbe esa radiación y retiene parcialmente la energía térmica. Esa absorción es la predominante, pues otros componentes contribuyen, pero el dióxido de carbono ha aumentado significativamente después del siglo XVIII, primero por las combustiones industriales a las que se agregaron luego los gases de escape de vehículos.

El aumento de dióxido de carbono desemboca en una especie de cúpula que rodea a la Tierra y retiene el calor del Sol más que antes. Este proceso continúa indefinidamente, como si viviéramos en un recinto cerrado por una capa rica en CO₂ que absorbe los rayos infrarrojos mediante los cuales la Tierra refleja y disipa el calor del Sol, proceso que origina el **efecto invernadero**. Su consecuencia inmediata es el aumento climático de temperatura, especialmente durante los veranos, y la mediata será la transformación de hielos polares en agua que inundará las partes más bajas de los continentes e islas. Las combustiones en aire producen inevitablemente pequeñas proporciones de monóxido de carbono (CO), un gas poderosamente tóxico, que aumenta si la combustión ocurre de manera imperfecta. Como en el caso de los óxidos de nitrógeno y de azufre existen sistemas catalíticos y de burbujeo para descontaminar los gases en todos estos casos, pero la eliminación de CO es particularmente importante en los gases de combustión de los derivados de petróleo por lo que se la enfoca sea por catalizadores o por reformulación de naftas.

2.4 Contaminación energética: térmica, vibratoria

El **agua caliente**, que ha sido utilizada para refrigeración en industrias y plantas generadoras de energía, es volcada inicialmente en el agua de los ríos. Esto no sólo provoca el recalentamiento del agua fresca, sino también influirá sobre el desarrollo de animales y vegetales y disminuirá la cantidad de oxígeno disuelto.

Las **vibraciones** de los edificios por medios de transporte, terrestres o aéreos, que hacen vibrar el suelo, en especial los subterráneos, o que sacuden al ser humano con frecuencias notables debido a motores y/o resonancias de la estructura, imponen al ser humano tensiones todavía no bien evaluadas en cuanto a sus efectos en plazos prolongados.

El **sonido** es la sensación resultante de vibraciones de las moléculas de los gases del aire, que llegan al oído como ondas de presión con una velocidad aproximada a los 330 metros/segundo. Cuando el sonido es desagradable y molesto se lo llama **ruido**, difícil de definir, cuyas consecuencias fisiológicas y psíquicas pueden llegar a ser sumamente nocivas para el ser humano al sobrepasar ciertos límites. La potencia del ruido se expresa mediante una escala logarítmica en unidades **decibelio** (dB) o decibel, que se mide como una diferencia exponencial relativa a un valor base: $dB = 10 \log(Pot_2/Pot_1)$. Se toma como referencia el umbral de audición para un buen oído (0 dB) y para dar una idea se calcula que en un estudio de radio el nivel es 25 dB; en una oficina privada, 50 dB; en un auto en medio del tránsito, 85 dB; 95 dB en un vagón de subterráneo, y más de 120 en una sala de máquinas. Recordemos p. ej. que el valor 50 dB corresponde a $\log(Pot_2/Pot_1) = 5$ por lo que la energía por unidad de tiempo en una oficina privada es $10^5 = 100.000$ veces mayor que el umbral, estando el límite superior en el orden de 150 dB que sobrepasa el límite doloroso del oído (130 dB: martillo neumático).

El ruido es una contaminación sonora (acústica) que habitualmente genera daños crónicos, pues al ser humano le resulta difícil reconocer la hipoacusia por falta de una potencia de base que sea simultánea o fácil de recordar. Es responsable de la mayoría de los errores en las tareas intelectuales y alrededor del 20% de los accidentes de trabajo.

El gran remedio consiste simplemente en bajar al mínimo los niveles de ruido habituales mediante disciplina y aislación acústica de las fuentes contaminantes, que incluyen las técnicas modernas de producción musical, más generosas en potencia sonora que en calidad.

2.5 Contaminación radiativa y radioactiva

Las **radiaciones** llamadas electromagnéticas pueden ser consideradas **ondas** durante su trayectoria y **partículas** (fotones) al chocar con la materia. Su energía radiante E es proporcional a la frecuencia en la relación quántica $E = h\nu$ donde h es la constante de Planck, el físico que la propuso para explicar la radiación del cuerpo negro (1900). Recordemos que la longitud de onda λ y la frecuencia ν tienen valores inversos relacionados por la velocidad de la luz c (constante: aprox. 300.000 km/s). El espectro de esas radiaciones es inmenso desde los rayos cósmicos hasta las radiofrecuencias de onda muy larga, desde las grandes energías a las más débiles.

Ese espectro se divide en dos sectores fotoquímicos: radiaciones ionizantes desde ultravioleta a cósmica; mientras que las no-ionizantes abarcan desde visible a radiofrecuencias. Recordemos sin embargo que la energía radiante depende también del número n de **fotones enfocados** sobre una zona molecular $E = nh\nu$ por lo que grandes valores de n pueden provocar ionización por radiaciones que comúnmente sólo producen efectos térmicos al ser absorbidas.

El ser humano del siglo XX vive, a diferencia de siglos anteriores, en un ambiente de **contaminación radiativa**, "bombardeado" por radiaciones que él mismo produce: radio, radar, rayos X, nucleares.

En un comienzo se pensó en las normas de seguridad frente a las ionizantes solamente, pero los efectos de las microondas de radares alertaron sobre los daños biológicos por las no-ionizantes y desde hace unos años se dispone de manuales de seguridad referidos a éstas, por ejemplo el redactado en la Argentina por Adolfo Portela et al.

La **contaminación radioactiva** resulta de sumar a la radioactividad natural de base la producida artificialmente por los seres humanos, principalmente durante las explosiones nucleares de prueba y los desechos radioactivos tecnológicos o accidentales. Los isótopos radioactivos liberados en las explosiones comprenden: ^{235}U y ^{239}Pu restos no consumidos del explosivo; los productos de fisión ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{131}I ; y los productos de neutrones de los elementos contenidos en suelo y agua ^{45}Ca , ^{24}Na . El estroncio 90 y el cesio 137 son los de vida más larga y por lo tanto los que mantienen su potencial dañino por más tiempo.

Los desechos de la industria de productos nucleares, desde la extracción de minerales y su procesamiento hasta el funcionamiento de los reactores, producen isótopos contaminantes de larga vida cuya acumulación constituye uno de los problemas acuciantes de nuestra época.

Uno de los peligros fundamentales es la contaminación radioactiva indirecta por la cadena: suelo + agua \longrightarrow vegetales + animales \longrightarrow alimentos \longrightarrow seres humanos. Algunos organismos intermedios son concentradores: algas 10^3 , plancton 5×10^3 , y aún más ciertos organismos acuáticos. Las medidas deben ser preventivas pues la contaminación, tanto radiactiva como radioactiva, puede llegar a provocar daños irreparables en los seres humanos. Las normas son estrictas pero las fallas técnicas y humanas son posibles, aunque de baja probabilidad; sin embargo, cuando se producen, sus resultados son catastróficos.

2.6 Tóxicos y microorganismos

Las normas internacionales para agua potable establecen límites para cinco clases de contaminantes: tóxicos, productos químicos nocivos, biológicos, radioactivos, y deteriorantes de características.

En los dos primeros grupos encontramos:

- Elementos tóxicos, libres y/o combinados: arsénico, cadmio (cobre, cromo, etc.), mercurio, plomo y selenio.
- Compuestos tóxicos: cianuros, pesticidas (insecticidas, herbicidas, fungicidas) y anabólicos; nitratos, detergentes y en general compuestos no-biodegradables; petróleo y derivados.

Los mínimos tolerados para la mayoría no sobrepasan las partes por millón (ppm=10⁻⁶) desde plomo 10⁻¹ ppm hasta mercurio 10⁻³ ppm (=ppb)*.

Esta contaminación se ha agravado por el creciente uso de plomo y cadmio en acumuladores eléctricos, así como de mercurio en general, que puede formar mercuriodimetilo concentrable en peces cuya ingestión es mortífera o deja secuelas gravísimas.

Cianuro es un anión cuyas sales son sumamente tóxicas (máximo tolerado 5x10⁻⁸); fluoruro es medianamente tóxico, pero su límite terapéutico para caries (aprox. 1ppm en agua) no está demasiado alejado del umbral de toxicidad. Los nitratos y nitritos, menos tóxicos, son en cambio indicadores de contaminación bacteriana.

Insecticidas como el DDT y herbicidas como el 2-4-D son concentrados por peces con factor 10 en algunos casos y las cadenas tróficas llevan esa contaminación a niveles tóxicos estables en materias primas utilizadas como alimentos por el ser humano, problema igualmente grave con otras sustancias como fungicidas y anabolícos, complicado aún más por refuerzos sinérgicos.

Los detergentes, tensioactivos, forman en su mayoría espumas que inhiben la acción bacteriana de biodegradación y la solubilización del oxígeno por lo que reducen al mínimo el proceso de autopurificación de aguas servidas. Los fosfatados pueden favorecer la proliferación eutrófica de algas y plantas acuáticas, y junto con otros aniones la formación de insolubles y barros perjudiciales.

El petróleo y sus derivados pueden llegar a las corrientes de agua, lagos y lagunas, mares y océanos, a partir de diferentes orígenes y por variados caminos: lluvias que lavan carreteras impregnadas de alquitrán, aceites y combustibles; desechos de grandes industrias petroquímicas y de tanques de barco; vaciamiento y naufragio de grandes petroleros, así como otros descuidos, desidias culposas y accidentes. Se estima que los seres humanos echan al mar anualmente varios millones de toneladas de petróleo que destruyen la vida de peces, aves y mamíferos como, lamentablemente, nos enteramos por los medios de difusión.

- La contaminación de las aguas por microorganismos es un hecho bien conocido en todo el mundo desde el siglo pasado. En general las contaminaciones bacterianas pueden ser graves, pero el síntoma típico de las comunes es la diarrea y se pueden remediar con antibióticos como base del tratamiento. Una de las más graves es el cólera que constituye en la actualidad una amenaza para el continente americano. Entre las parasitosis, la más difundida en nuestro continente es una esquistosomiasis que se transmite por caracoles y afecta en particular al sur de Brasil, por lo que su peligro se cierne sobre el litoral argentino. El remedio es nuevamente preventivo por tratamiento del agua y sobre todo por agregado de cloro activo en la etapa final. Aquí vale la pena mencionar el dete-

* 10⁻³ ppm=1 ppb (partes por billón anglosajón)= 10⁻⁹

rior de las características del agua por la presencia de microorganismos que reaccionan con el cloro y difunden al agua ciertos productos (tal vez clorofenoles), los cuales le confieren un sabor desagradablemente amargo.

3. Soluciones posibles, problemáticas y ucrónicas

3.1 El agujero en la capa de ozono no es un problema perfectamente diagnosticado. Sin embargo es de suponer que el gas impulsor de los aerosoles volverá a ser el aire a presión mediante el sistema aspirante-impelente perfeccionado en envases plásticos de pulverizadores (vieja nomenclatura) ahora llamados atomizadores. Para quienes insistan en un gas sin necesidad de presión mecánica, queda el butano, tal vez en recipientes algo más pequeños dado el riesgo por combustión y explosión. Creo que continuará el uso del freón como fluido refrigerante pues implica pérdidas mínimas, poco significativas.

Resultaría absurdo volver al amoníaco y no se vislumbra ningún sustituto con las propiedades requeridas, que al mismo tiempo más que inerte sea extinguidor frente al fuego, como lo es el freón. Mientras tanto ha de seguir la vigilancia sobre la capa antártica de ozono para completar el diagnóstico y buscar un remedio definitivo.

3.2 Las soluciones para el smog y la lluvia ácida existen pero implican sacrificios económicos, cambios difíciles en el esquema cultural de los seres humanos, y búsqueda de sustitutos (no siempre disponibles, de rendimiento parejo y no contaminantes). La combustión de compuestos orgánicos produce inevitablemente agua, pero el carbono puede oxidarse al máximo (CO_2) o no (CO , hollín) y a su vez, exista o no nitrógeno en el compuesto, se formarán sus óxidos (NO_x) debido al nitrógeno del aire.

Tanto el smog en general como la lluvia ácida en particular combinan todos estos productos que contaminan el aire y son transportados por éste a zonas extensas, por lo que ni la ciudad ni el campo están a salvo. La solución reside en controlar los gases de combustión respecto de los óxidos mencionados y de otros compuestos orgánicos volátiles que se forman simultáneamente (hidrocarburos sin quemar, craqueados, ciclados o parcialmente oxidados), así como de metales tóxicos, y aplicar una adecuada legislación de acuerdo con los mejores modelos existentes.

La descontaminación de partículas, la absorción o eliminación de gases y líquidos, y la oxidación catalítica total de los gases de combustión de motores, están resueltas desde el punto de vista tecnológico, aunque no completamente desde el punto de vista económico.

3.3 La solución del efecto invernadero por aumento en la concentración de CO₂ en la atmósfera del mundo es difícil dadas las combustiones que los seres humanos provocan para obtener energía, por las razones económicas mencionadas en 3.2 (técnicas de decontaminación por absorción u oxidación catalítica total). Esto requerirá una acción cooperativa internacional, sin olvidar que la lenta oxidación de residuos vegetales y los incendios de bosques contribuyen en proporción no bien conocida al efecto invernadero.

Una novedad importantísima de fines de 1991 es la ofrecida por los combustibles oxigenados para lugares fríos, donde los gases de escape producen excesivo monóxido de carbono, y las naftas reformuladas para evitar la contaminación por ozono generado en los motores.

Los combustibles oxigenados son más "limpios" porque contienen agregados como el éter metílico-terbutílico en refinerías, o etanol (metanol) en las estaciones de expendio, para que lleguen en promedio de 2,7% de oxígeno, lo cual reducirá cerca de 20% del monóxido.

Se anuncia que las naftas reformuladas serán provistas por las refinerías de EE.UU. hacia 1995, contendrán no más de 1,3% de benceno en volumen y 2,1% en peso de oxígeno en promedio, además de determinada volatilidad y otros requisitos, con lo cual rebajan los niveles de ozono producido. Estas parecen soluciones más accesibles que la de catalizar la oxidación de los gases de escape.

3.4 Las contaminaciones energéticas –térmica, vibratoria, sonora– son atacadas primariamente mediante legislación y decisiones técnicas adecuadas. Sin embargo, hay mucho por hacer en la educación de los individuos, sobre todo en cuanto al enfoque preventivo.

3.5 Existen normas de seguridad estrictas para la contaminación tanto radiativa como radioactiva, de manera que la conducta a adoptar deriva de la actitud preventiva y de la decisión para imponer el efectivo cumplimiento de las normas

3.6 Las cinco clases de contaminantes del agua potable son "vino viejo", controlado por "odres viejos y nuevos", pues muchos métodos son clásicos y otros fueron desarrollados hace menos de cincuenta años. Las normas existen desde principios de siglo y se les han agregado las de productos nuevos como insecticidas y herbicidas que, por extensión, son controlados en alimentos, aunque no siempre de manera efectiva. Los microorganismos son eliminados por acción del cloro, sin olvidar el uso cada vez más frecuente de coagulantes que ayudan a sedimentar partículas y a absorberlos en sus geles.

En todos estos casos, la acción preventiva es nuevamente lo usual, sustituyendo o eliminando las sustancias que producen contaminación. Existen problemas de difícil solución como la biodegradabilidad de ciertas moléculas, en especial

plásticos, para algunos de cuyos casos no se avizora cuáles son las respuestas eficientes.

3.7 Naturalmente en esta sección aparecen los problemas más acuciantes y no la totalidad, imposible de cubrir, especialmente los de largo plazo y escala mundial: la diseminación de policíclicos y oncogénicos en general, así como de los agentes de infección con gran mortalidad, sin olvidar los epidémicos.

Las soluciones reales efectivas son complejas y multidisciplinarias porque los problemas lo son. Agréguese a esto la existencia de cadenas, ciclos y redes de transformación, los organismos concentradores, y las interacciones cruzadas entre contaminantes y procesos de purificación, para comprender la necesidad de un tratamiento integral de los problemas. Un ejemplo actual es la situación planteada después del informe de Naciones Unidas sobre ambiente mundial, en el que se recomienda eliminar los clorofluocarburos (CFC's) y los "halones", en general, hacia el año 2000. Se considera que para esa fecha, el nivel presente 3,4 ppb continuará aumentando hasta un máximo alrededor de 4 ppb, nivel que debe rebajar hasta 2 ppb, existente en 1970 cuando comenzó a formarse el agujero en la capa de ozono; ésta es la disminución prevista para que nos libremos de esa amenaza en la segunda mitad del siglo XXI.

Varias compañías han prometido cesar con la fabricación de los compuestos cuestionados hacia 1996, pero lo sorprendente es que la pérdida de ozono en la baja estratosfera causa un enfriamiento que puede compensar el calentamiento por efecto invernadero, incluyendo el originado por CFC's. Esta situación es típica de los dilemas que se presentan cuando se estudian problemas complejos con interacciones múltiples. El tratamiento aconsejable es integral, enfoque en el cual debe incluirse un estudio comparativo de métodos y legislaciones en diferentes países, pues hay mucho para aprender de ciertos sistemas de control que imponen a cada empresa descontaminar sus efluentes y entregar el resto a una planta central que lo purifica en la proporción restante como servicio vigilante ineludible con tarifa pareja (Alemania).

Como en todos los problemas humanos, el fondo es moral, las consecuencias son económicas, y las soluciones son técnicas, cuya plataforma de despegue es la **educación** general de la población con el propósito de alcanzar, mediante el estudio y la investigación, una **calidad de vida** decorosa.

4. Reflexiones sobre formación universitaria en Química Ambiental

Hemos recorrido un análisis somero de los problemas fundamentales y la descripción de las soluciones, que ofrecen una armónica combinación de la Ecología y la Protección Ambiental con la Química, para mejorar las condiciones en que vivimos los seres humanos.

Recomendamos formar, en el nivel universitario, profesionales con dominio básico de las tres grandes disciplinas de la Naturaleza: Física, Química y Biología, con Matemática como marco, formación multidisciplinaria con actitud interdisciplinaria, para entenderse con profesionales de otras carreras y colaborar en planteles heterogéneos de convivencia, gracias al hábito de "conversar en el lenguaje de los otros", para resolver problemas que abarcan variados sectores del conocimiento. Con ese fin, preferimos una carrera integral dentro de los carriles que hemos propuesto aquí.

En esa carrera profesional y en el Magister que proyectamos como licenciatura superior especializada -nuevo enfoque de las viejas orientaciones y especialidades- se debe difundir una metodología que comprenda los siguientes temas:

- * Estudio
- * Investigación
- * Creatividad

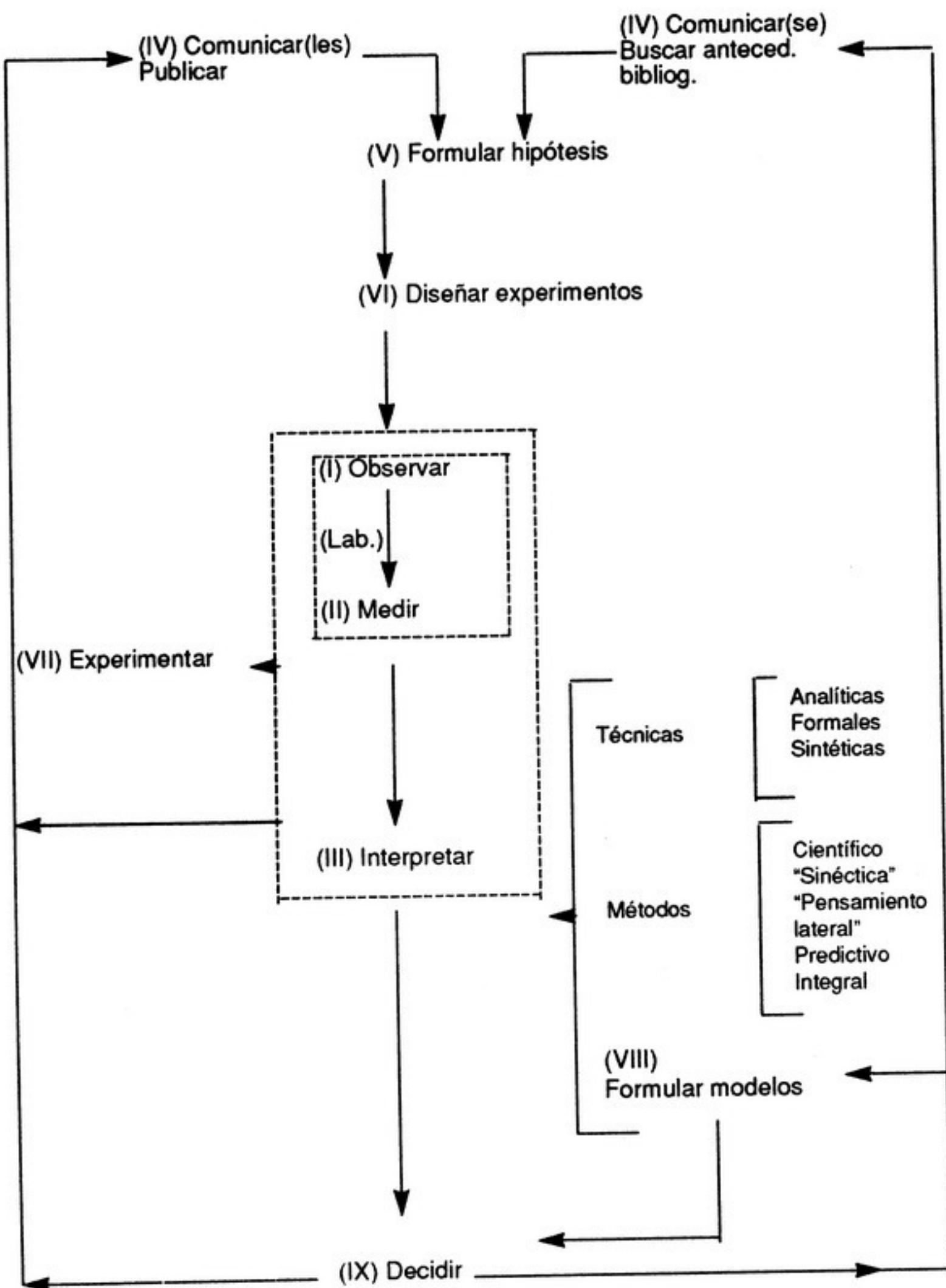
que desde el curso de ingreso han de ser explicados y practicados. Como es natural, el énfasis se pone sobre el método de **estudio** hasta el tercer año en el cual se desplaza hacia el **método científico** y la investigación creativa, parte activa de todos los cursos en el trabajo de laboratorio y sistemáticamente enseñado en cuarto año (Métodos de Investigación, actualmente Métodos de Síntesis y Análisis).

La base es la aplicación parcial o total de las nueve etapas de nuestro diagrama (ver página siguiente) en general y en los miniproyectos de investigación, proyectos metodológicos breves cuya meta es el aprendizaje del método científico, para lo cual el instructor prepara una guía inductiva que promueve la emisión de hipótesis y el diseño de experimento pertinentes, por los estudiantes. Esta práctica es exitosa desde su implantación universitaria en 1988, y en la enseñanza media fue propuesta y utilizada por nosotros con resultados sorprendentes desde 1974(1). En esa fecha comenzaron los cursos sobre creatividad que culminaron en el libro(2) donde desarrolló el Método Integral, compilación del método científico, la sinéctica, el pensamiento lateral y la prospectiva.

De esa manera, la investigación científica dejará de ser una especie de privilegio exclusivo del postgrado y pasará a constituir un componente sustancial del Sistema Educativo, en el cual también se incorporará la creatividad por sí y como parte de cada asignatura. Con más razón formará parte de un **Magister en Química Analítica y Ambiental**, el cual incluirá Ecología, Química Analítica, Gestión de la Calidad y Calidad de Vida como núcleo y un trabajo final de investigación pro-diploma.

1. **Metodología**, Bs.As., Instituto Nacional de Enseñanza de la Ciencia 1974.
2. **Curso de Creatividad: Personal. Científica. Gerencial**, Bs.As., Ed. El Ateneo, 1989, 2da. ed. 1992.

METODO CIENTIFICO
Diagrama



Los universitarios formados en esa línea ocuparán un espacio científico-tecnológico definido y realizarán un servicio a la Sociedad, que en la actualidad no tiene unidad académica definida. La enseñanza personalizada e integral seguirá diplomando así profesionales **creativos, emprendedores**, con dignidad individual y sensibilidad social, diferenciados del actual egresado de planes convencionales, nutridos en recetas para conocer los "cómo", pero insuficientes para entender los "por qué".

Con el fin de insertar los conceptos expuestos en la sociedad será necesario difundir la "conciencia ecológica" y conseguir que los dirigentes se decidan a enfrentar los problemas preventivamente, para que no se transformen en "cadáveres" irrecuperables, eludiendo las soluciones simplista a corto plazo que han predominado hasta ahora. Porque en última instancia una buena conducción consiste en hacer políticamente posible lo que es técnicamente necesario.

NOTA:

La bibliografía consultada sobre el tema es muy amplia y general como para enumerarla, sin embargo, recomiendo consultar los artículos especializados sobre problemas ambientales que publica la revista de la American Chemical Society: **Chemical and Engineering News** desde hace varias décadas y continúan hasta la fecha.

Agradecimientos al:

- Prof. Dr. Adán Edgardo Pucci (Univ. del Sur), por su asesoramiento en cuanto al programa de Química Ambiental, curso que dirige desde hace años.
- Prof. Lic. Enrique Cantilo por su benévola crítica y agudas sugerencias.

Apéndice I

AGUJERO EN LA CAPA DE OZONO

El proceso químico por el cual disminuye la concentración de ozono en la estratosfera antártica ha sido intensamente estudiado en los últimos años, dada la importancia de este componente como filtro protector de los procesos naturales frente a la radiación ultravioleta, de la cual es un potente absorbente. En particular, los seres humanos sometidos a ese tipo de radiaciones pueden sufrir graves perturbaciones en su salud, sobre todo como afecciones de la piel y perjuicios en la vista.

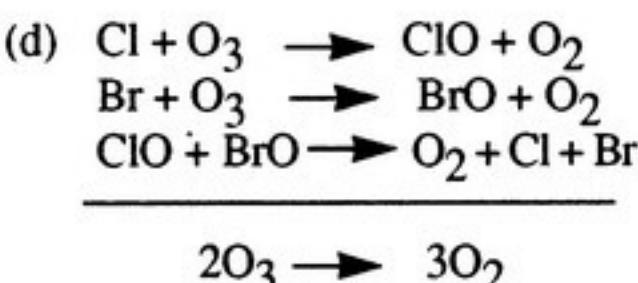
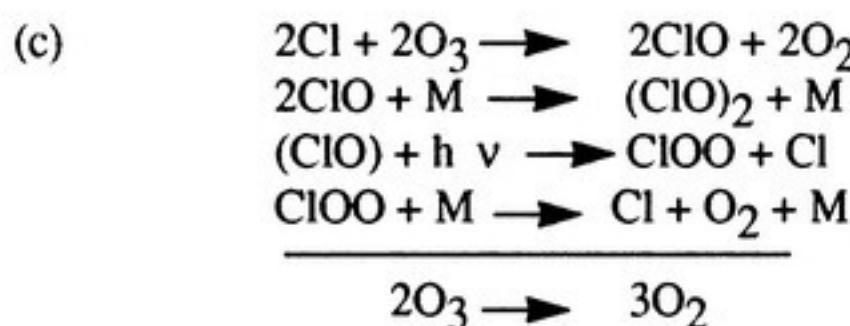
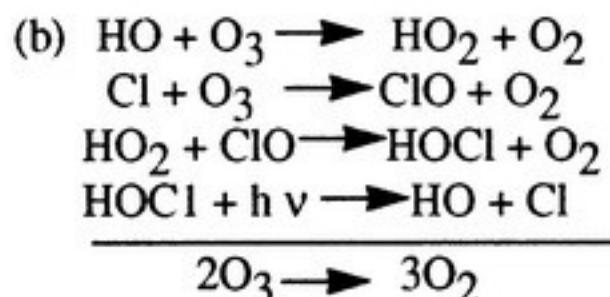
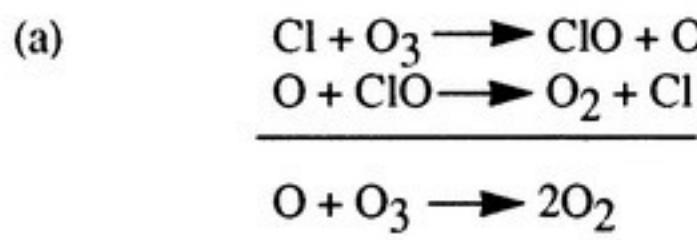
La reacción central para la destrucción excesiva del ozono se atribuye al aumento de la concentración de átomos de cloro "libre" en la estratosfera, debido a la descomposición en esa zona de los clorofluorocarburos producidos industrialmente, por efecto de la radiación ultravioleta que llega sin interferencias a esa altura.

Esos átomos de cloro reaccionan con el ozono como intermediarios catalizadores que pasan alternadamente a monóxido de cloro, el cual se dimeriza a (ClO) y luego se descompone regenerando cloro atómico, disponible para reiniciar un nuevo ciclo de destrucción del ozono hacia su final estable como oxígeno común.

Los freones, entre los que son más usados (F11 y F12), son descompuestos por la radiación ultravioleta:



El cloro atómico puede descomponer el ozono según cuatro caminos:

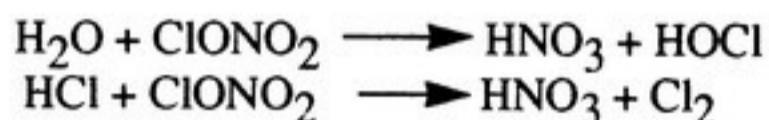


También: $\text{ClO} + \text{BrO} \rightarrow \text{Br} + \text{OCIO}$

El camino de reacción (c) es considerado el más probable, sin embargo, ninguno de los cuatro sería muy efectivo en fase homogénea dado que la especies activas (Cl, ClO, HOCl) se encuentran en concentraciones débiles, porque se transforman en moléculas "reservorio" inertes frente al ozono (HCl, ClONO₂)



En cambio se adopta el camino de fase heterogénea, por descomposición de estas moléculas estables, sobre los cristalitos de hielo de las nubes polares estratosféricas:



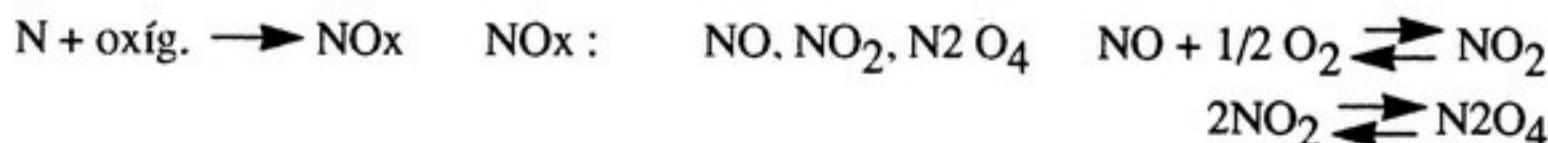
Las sustancias formadas son activadas por fotólisis y sus productos de descomposición catalizan la destrucción del ozono.

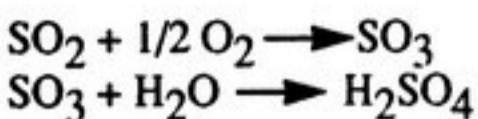
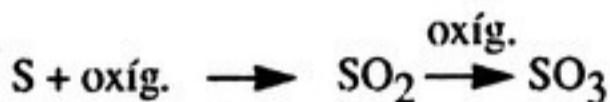
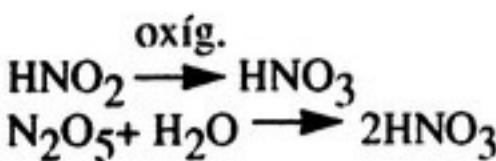
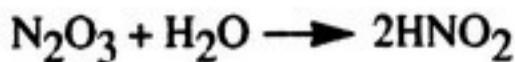
Apéndice II

LLUVIA ACIDA

Aunque a menudo se habla de lluvia ácida como si estuviera constituida solamente por ácido nítrico diluido, debe incluirse también el sulfúrico. Ambos compuestos resultan de la hidratación por la humedad del ambiente -eventualmente niebla o lluvia- a partir de los óxidos respectivos, provenientes de combustiones industriales y de "motores a explosión", y en el caso del azufre, principalmente de los procesos para el tratamiento de minerales y reacciones habituales de la industria metalúrgica.

De manera muy simplificada, a partir del nitrógeno atmosférico (N₂) y del azufre combinado, comúnmente como sulfuro (S²⁻) en los minerales, se puede esbozar el siguiente esquema de oxidación por el oxígeno del aire (se utilizan aquí los símbolos N y S como nombres de estos elementos).





Las reacciones son más complejas aún pues durante la formación de los óxidos de nitrógeno, por ejemplo, se produce ozono: el sistema $\text{NO} + 1/2 \text{O}_2 \rightleftharpoons \text{NO}_2$ es catalizador en la oxidación del dióxido a trióxido de azufre; y ambos se realimentan e intervienen en las etapas previas.

Las legislaciones de los países desarrollados, sin embargo, se centran en el azufre y sus productos de oxidación, tal vez porque son más fáciles de controlar que los óxidos de nitrógeno. Por otra parte, existen técnicas para eliminar los óxidos de nitrógeno de gases de escape en motores, como ácido cianúrico, un heterociclo inocuo, que por calor pasa a isociánico, el cual reacciona con NOx y forma gases prácticamente no contaminantes.