LA QUÍMICA DEL AIRE

Luis Pardillo Vela 29-02-2024

El término "atmósfera" se refiere a la capa de gases que rodea un cuerpo celeste, como Marte, Venus o la Tierra. Llamamos aire a la mezcla de gases que forman la atmósfera de la Tierra, la cual está dividida en varias capas, pero en nuestro estudio solo vamos a tratar con las dos primeras, la tropósfera, la más cercana y que alcanza unos 10 km de altura y la estratosfera que la sigue y llega hasta unos 50 km.

Vamos con la troposfera, que es la capa en la que vivimos y respiramos, es la más corta, pero contiene las $\frac{3}{4}$ partes de la masa total de gases de la atmósfera, cuya composición en $\frac{3}{4}$ en volumen como aire seco (la humedad la veremos aparte) según datos de la NASA de junio 2023 es: Nitrógeno ($\frac{3}{4}$) 78,08; Oxígeno ($\frac{3}{4}$) 20,95; Argón (Ar) 0,934; Dióxido de carbono ($\frac{3}{4}$) 0,042 y otros en cantidades menores.

Veamos cada uno de ellos de mayor a menor presencia en el aire.

El nitrógeno molecular N_2 presente en el aire es un gas inerte, pero fundamental en la vida animal y vegetal. Sin embargo, la mayoría del nitrógeno que forma parte de los seres vivos, procede de ciclos bioquímicos donde el N_2 atmosférico pasa al suelo, de ahí al mundo vegetal y luego el animal, pero no es algo tan simple, veamos.

El nitrógeno de la atmósfera es asimilado en un proceso denominado "fijación biológica del nitrógeno", proceso en el cual microorganismos presentes en el suelo, como azotobacter, cianobacterias y otros, toman el nitrógeno atmosférico y lo convierten en formas químicas más reactivas, como el amonio (NH_4^+). Luego sigue la nitrificación, proceso por el cual otras bacterias convierten el amonio (NH_4^+) en nitratos (NO_3^-), la forma más oxidada del nitrógeno, y que puede ser absorbida por las raíces de las plantas y utilizarlo en la síntesis de moléculas biológicas.

Algunas plantas, como las leguminosas, tienen nódulos en las raíces que forman simbiosis con bacterias fijadoras de N₂ atmósférico, de ahí la importancia de alternar cosechas de leguminosas con otros cultivos, como cereales, para reactivar la calidad del suelo.

También está la fijación abiótica o no biológica, mediante la cual el N₂ atmosférico, por la acción de la energía de los rayos de las tormentas, las altas temperaturas de los incendios forestales y volcanes, puede reaccionar con el oxígeno y formar óxidos de nitrógeno que luego son llevados por la lluvia al suelo o zonas de agua.

También se incluye aquí el proceso industrial Haber-Bosch que utiliza el N_2 atmosférico para combinarlo con el hidrógeno y producir amoníaco, que luego se convierte en otros compuestos nitrogenados, entre ellos los fertilizantes agrícolas.

La desnitrificación es el proceso contrario, por el cual ciertos microorganismos del suelo, en condiciones anaeróbicas, reducen los nitratos a nitrógeno molecular que vuelve a la atmósfera, cerrando el ciclo.

El oxígeno del aire O₂, al contrario que el nitrógeno, es de necesidad y uso directo por medio del aire para la respiración de todos los seres vivos, con la excepción de

los microorganismos anaeróbicos. Y si alguien está pensando en los peces hay que recordar que respiran el oxígeno del aire que está disuelto en el agua.

De forma muy escueta, la **respiración** de las plantas es la toma de O_2 del aire para descomponer la glucosa y obtener energía, a la vez que vierte CO_2 a la atmósfera.

El proceso contrario es la **fotosíntesis**, en el cual la clorofila con la energía de la luz, CO₂ y H₂O sintetiza glucosa a la vez que desprende oxígeno que va a la atmósfera.

Estos dos procesos están interconectados y ocurren simultáneamente en las plantas, aunque la fotosíntesis es dominante durante el día, mientras que durante la noche lo es la respiración.

En los animales, también de forma escueta, la respiración consiste en el transporte del oxígeno del aire desde los pulmones a las células por medio del hierro II de la hemoglobina de la sangre, luego, en las células ocurren una serie de reacciones químicas en las que el oxígeno reacciona con determinados compuestos orgánicos (carbohidratos, lípidos, proteínas ...), desprendiendo energía, CO₂ y H₂O, moléculas que serán transportadas por la sangre a los pulmones y que luego exhalamos.

La respiración celular puede parecer una simple reacción de combustión, pero es mucho más compleja y ocurre en varias etapas donde la energía de la reacción se utiliza para formar el ATP, que luego se utilizará en una variedad de procesos celulares que proporciona la energía necesaria para llevar a cabo actividades vitales. Aparte de los procesos biológicos, el oxígeno del aire interviene en los procesos de combustión, ya sea en un motor de gasolina, una barbacoa o un incendio. En todo proceso de combustión se producen los óxidos de los elementos que componen la molécula del combustible, así si es metano CH₄ se produce CO₂ y H₂O, lo mismo que si es glucosa C₆H₁₂O₆ ya que el oxígeno se incorpora a los óxidos, pero si la molécula contiene N o S formarán NO_x y SO₂, y precisamente de estos hablaremos después. El oxígeno del aire actúa directamente en procesos de oxidación de metales, la más conocida es la oxidación del hierro, dando lugar al óxido férrico que conocemos como herrumbre. También actúa negativamente en la oxidación y deterioro de alimentos, ya sea directamente o a través de hongos y bacterias, por ello debemos protegerlos cubriéndolos y poniéndolos en la nevera (el frio lentifica las reacciones). La descomposición de la materia orgánica, tanto en entornos naturales como en procesos controlados, implica la participación de microorganismos que utilizan el oxígeno del aire en el proceso de descomposición. Así, en el tratamiento de las aguas residuales, el oxígeno atmosférico se utiliza en los procesos de aireación para promover la actividad de microorganismos aerobios que descomponen la materia orgánica presente en aguas residuales.

El argón es el siguiente elemento en el aire, es un gas inerte que representa casi el 1% del aire (0,934), y se obtiene puro, mediante la destilación del aire licuado. El argón se empleó en las lámparas incandescentes mientras estaban en el mercado. Actualmente tiene usos científicos, médicos, propulsor de espray o preservación de

alimentos usado como atmósfera protectora y segura para alimentos (aditivo E938). El siguiente es el CO₂, pero sobre el hablaremos después.

Comencé hablando sobre la composición en % en volumen del aire seco, y la razón de emplear la composición en aire seco es debida a que la presencia del vapor de agua en el aire es variable y local, desde poco más de un 4% a mínimas trazas. Por ello cuando se habla del agua en el aire no se emplea la composición en % del volumen, se usa un término independiente y específico para el agua denominado humedad relativa, muy importante en la meteorología y en la sensación ambiental. La humedad relativa se expresa en %, donde 0% indica que el aire no contiene vapor de agua, y 100% indica que el aire contiene la máxima cantidad de vapor de agua que puede retener a la temperatura y presión a la que se encuentra. Veamos una situación real: a 1 atm y 21°C el aire con 100% humedad relativa contiene 18,4 g de vapor de agua por m³ de aire (humedad absoluta), pero si a esa temperatura solo contiene 14,7 g/m³ significa que solo contiene el 80% del que podría tener como máximo, es decir, su humedad relativa es del 80%. Pero si entonces la temperatura bajara de los 21 a 14ºC solo podría contener un máximo de 12,1 g/m³, y la diferencia entre los 14,7 g que contiene y los solo 12,1 g que puede contener, significa que esos 2,6 g de exceso de vapor de agua por m³ se condensarán como agua líquida, es el fenómeno que conocemos como rocío o sereno, quedando el ambiente con una humedad relativa del 100% o muy cercana. El rocío se convierte en escarcha si la temperatura está en cero o por debajo.

La humedad relativa es muy importante para nuestro confort, temperaturas superiores a los 30° con humedad muy alta con son agobiantes, pero son más llevaderas con bajos niveles de humedad, aunque esto afecte a nariz y garganta.

Pero vamos con el CO₂ que lo habíamos dejado atrás.

El CO₂ es crucial para la vida, sin él no existiría la fotosíntesis y en consecuencia no existirían las plantas ni la vida tal cual la conocemos. Su equilibrio en la atmósfera es esencial para mantener un *adecuado y natural efecto invernadero*. Veamos, gran parte de la radiación solar atraviesa la atmósfera y calienta la tierra que luego emite radiación infrarroja, pero parte de esa radiación infrarroja emitida por la superficie terrestre es reflejada de nuevo hacia ella por determinados gases de la atmósfera, en particular por el CO₂, manteniendo la temperatura a un nivel adecuado para el desarrollo de la vida. Pero el exceso de CO₂ debido al uso abusivo de combustibles fósiles **ha hecho que el efecto invernadero aumente** y se refleje mucha más radiación, con un incremento constante de la temperatura de la Tierra, y los efectos de cambio climático que ya estamos observando. Es un efecto semejante al que se consigue con el plástico o cristal de un invernadero, de ahí su nombre.

La lluvia ácida. Es un fenómeno atmosférico causado por la emisión a la atmósfera de gases como dióxido de azufre (SO₂) y óxidos de nitrógeno (NO_x). Estos contaminantes provienen principalmente de emisiones industriales y por el uso de

combustibles fósiles, aunque también, en menor grado, por fenómenos naturales como tormentas, volcanes o incendios forestales.

Cuando el SO₂ y los NO_X se emiten a la atmósfera, pueden reaccionar con el vapor de agua y el oxígeno presentes en el aire y formar ácido sulfúrico (H₂SO₄) y ácido nítrico (HNO₃). Estos ácidos, disueltos en la lluvia, la nieve o la niebla pueden dar lugar a precipitaciones ácidas, con efectos dañinos en la vegetación y acidificando los suelos y las aguas, afectando también a estructuras, edificios y monumentos, en particular los materiales como piedra caliza y mármol. Por otra parte, aunque la lluvia ácida en sí misma no es directamente dañina para la salud humana, los contaminantes que la causan, SO₂ y NO_X si contribuyen a problemas respiratorios y de calidad del aire.

Para abordar la lluvia ácida, se han cursado regulaciones y tecnologías para reducir las emisiones de estos gases, mediante la eliminación del S de los combustibles en las refinerías y los NO_X con los catalizadores en los tubos de escape. Con ello se ha conseguido disminuir la incidencia de la lluvia ácida, pero sigue siendo un problema en regiones donde las emisiones de contaminantes son elevadas.

Vamos ahora a la estratosfera (10 km a los 50 km de altitud). Esta zona de la atmósfera es muy importante ya que en ella se encuentra la capa de ozono (moléculas triatómicas de oxígeno, O_3). Esta capa se extiende aproximadamente de los 15 km y los 35 km de altitud, reúne cerca del 90 % del ozono presente en la atmósfera, y son las moléculas que absorben \approx 90 % de UVB y \approx 98 % UBC, radiaciones nocivas para los seres vivos.

De forma simplificada, la interacción de la radiación ultravioleta B y C con el oxígeno en la estratósfera produce continuamente ozono y estas moléculas de ozono absorben igualmente radiación UV volviendo a dar moléculas de oxígeno.

Todo ello ocurre de forma natural y manteniendo de forma equilibrada la cantidad de ozono mientras se produce la absorción de la radiación UVB-C evitando que produzcan efectos dañinos en los seres vivos.

Pero durante las décadas de 1930 a 1980, compuestos clorofluorocarbonados (CFC) y otros productos que se utilizaron ampliamente en refrigeración, aire acondicionado y como gas propelente en aerosoles, provocaron una disminución del ozono. Sin profundizar en las reacciones, el cloro que contiene esos gases se libera en la estratosfera por acción de la radiación UV y a continuación reacciona con el O₃ destruyendo la molécula, pero el problema es que en otra reacción posterior ese mismo átomo de cloro se libera y continúa destruyendo más moléculas de ozono.

El mexicano Mario Molina junto con el americano Rowland y el danés Crutzen compartieron el premio Nobel de Química, en 1995, por sus estudios sobre estas reacciones y las amenazas de los CFC para la estabilidad de la capa de ozono, que ya habían predicho 20 años antes.

El Protocolo de Montreal de 1987, para reducir y posteriormente prohibir el uso de los CFC y otras sustancias que afecten a la capa de ozono, dio resultado y actualmente se ha observado una recuperación parcial de la capa de ozono. También se ha disminuido la lluvia ácida, pero está costando demasiado disminuir el efecto invernadero, se sigue utilizando mucho combustible fósil a pesar de los intentos por disminuirlos. El consumo de energías alternativas aumenta en % pero la alta demanda de energía ocasiona que siga aumentando el consumo de energía fósil y la producción de CO₂. Como dato: en 1990 el CO₂ en la atmósfera era el 0,035% en volumen, en 2000 era el 0,037%, en 2010 el 0,039 y en 2023 el 0,042%.