

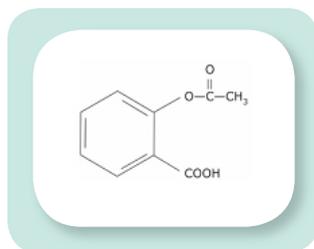
32 QUÍMICA PARA COMPRENDER AL MUNDO. DOS EJEMPLOS AMBIENTALES.

Dr. Luis Federico Sala

Profesor Titular, Área Química General. Departamento de Químico Física. Facultad de Ciencias Bioquímicas y Farmacéuticas, UNR. Investigador Principal Conicet Instituto IQUIR. Email: sala@iquir-conicet.gov.ar

Vivimos en un mundo de sustancias químicas, muchas son de origen natural y otras sintéticas. Las sustancias químicas están presentes en los alimentos, medicinas, vitaminas, pinturas, pegamentos, productos de limpieza, materiales de construcción, automóviles, equipos electrónicos, equipos deportivos, fibras naturales, fibras sintéticas, entre otros.

Las sustancias químicas difieren entre sí: *los compuestos químicos que se emplean en los fertilizantes difieren mucho de los que se utilizan en los herbicidas. La importancia de cada sustancia radica en la singularidad de sus propiedades químicas.* Los alimentos contienen muchos tipos de sustancias químicas, algunas de ellas suministran materia y de ellas se deriva el crecimiento y la energía que necesitan los organismos vivos; otras sustancias pueden ser tóxicas. Todos los fármacos, tanto los que se venden solamente bajo receta médica, como los de venta libre, contienen sustancias que sufren reacciones químicas en el interior del cuerpo, lo cual implica una situación de *riesgo-beneficio*; es decir, sus efectos benéficos van acompañados de efectos colaterales, por ello se deberá manifestar un equilibrio desplazado hacia los *beneficios* para la mayoría de las personas, y deben valorarse y comunicarse muy bien los riesgos de los medicamentos. Por ejemplo, la *aspirina*, es una sustancia química que mitiga la fiebre y el dolor, pero también puede agravar una úlcera o producir gastritis.



Fórmula química de la aspirina.
Su nombre tradicional es ácido acetilsalicílico.

Algunas sustancias químicas salvan vidas; otras pueden ser letales, lo cual nos lleva a la siguiente conclusión: *en potencia muchas sustancias son a la vez nocivas y útiles.* Un investigador de renombre internacional, Ralph Pearson (Pearson, 2005), lo denominó *la paradoja de la química*. Un ejemplo, que nos permite

tener una cabal idea de lo dicho anteriormente, radica en el elemento químico selenio (Se)¹. Cuando la presencia de ese elemento es mínima, resulta esencial para la vida (se dice que el elemento se encuentra a *nivel de traza o vestigio*), ya que actúa en los organismos superiores ayudando a eliminar los radicales libres² que conducen al *cáncer*. Por otro lado, si el elemento selenio está presente en concentraciones elevadas en el organismo, es sumamente tóxico. Las vacas que pastorean en campos cuyas hierbas son ricas en selenio desarrollan, al cabo de un tiempo, una enfermedad nerviosa, que se conoce como vértigo ciego, y mueren a causa de ella. Llegamos a la conclusión que lo que determina y marca la diferencia con respecto a una sustancia química *en cuanto a riesgo y beneficio*, es cómo se la utiliza, o la dosis en que se halla presente en el medio que nos rodea, o la cantidad que puede entrar en el metabolismo de los organismos vivos.

Por ello, decimos que necesitamos saber de Química para comprender al mundo en que vivimos.

Las sustancias químicas están en todas partes. Sin ellas, la vida misma sería imposible. Estemos preparados o no, todos somos químicos en potencia, porque trabajamos diariamente con sustancias químicas, por ejemplo, tanto en nuestra higiene, como en la selección y preparación de nuestros alimentos.

Los procesos químicos

Los procesos químicos simplemente están ocurriendo todo el tiempo en nuestro mundo. Por ejemplo, cuando clavamos un vara del metal hierro³ para que sirva de sostén a una planta que cultivamos en nuestro jardín, al cabo de un tiempo notamos que la vara ha adquirido un color rojizo y que al tocarla se desprende de ella un material rojo y poroso, que suele denominárselo en la jerga común: *herrumbre*. La *herrumbre* no es más que el resultado de la reacción en la superficie del metal entre sus átomos de hierro con el oxígeno⁴ del aire en un ambiente con humedad⁵, en un proceso conocido como *corrosión*. Entender por qué ocurre la corrosión, cuál es su mecanismo, la rapidez con que ocurre, las condiciones que la favorecen o la

1. Su símbolo químico es Se.

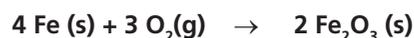
2. Radicales libres son sustancias químicas que presentan electrones desapareados y son causantes de la degeneración celular.

3. Símbolo del elemento hierro: Fe.

4. Símbolo del elemento oxígeno: O; símbolo de la sustancia gaseosa oxígeno: O₂.

5. Símbolo de la sustancia agua: H₂O.

detienen, requiere una gran cantidad de conocimientos químicos; sin embargo, la representación entre el estado inicial y final, de reactivos y productos, se puede representar en forma sencilla, mediante ecuaciones químicas balanceadas:



Un químico lee la ecuación anterior diciendo: cuatro moles del metal hierro (sólido) reaccionan en presencia de tres moles de oxígeno (un no metal gaseoso), para dar dos moles de óxido férrico sólido. Reactivos y productos tienen propiedades totalmente diferentes; el proceso necesita la presencia de agua, aunque el agua no está presente en el balance de reactivos y productos; la unidad "mol" tiene significado sobre las cantidades involucradas en esta reacción, ya sean estas cantidades el número de partículas involucradas, o las masas que deben pesarse para que no sobren ni falten reactivos y "todo" se convierta en productos.

Así, ejemplificado con el fenómeno de la *corrosión*, vemos que puede expresarse a través de una ecuación, pero queremos marcar que es un proceso muy complejo. Los químicos buceamos en esos problemas complejos para desentrañar los misterios de los procesos de la Naturaleza. Podemos tomar otro ejemplo, rescatado de procesos en los organismos vivos:

Las plantas (organismos autótrofos) producen compuestos vitales, como por ejemplo hidratos de carbono, a partir de materias primas inorgánicas como el dióxido de carbono atmosférico que captan sus hojas, el agua que toman por las raíces, y una maravillosa maquinaria de enzimas que aprovechan la luz solar gracias al pigmento *clorofila*. Es el proceso denominado fotosíntesis, que requirió gran parte del siglo XX para poder ser comprendido mediante la investigación de numerosos científicos.

La ecuación química sencilla que resume la formación, por ejemplo, de un mol de glucosa⁶ es:



Los químicos decimos que el carbono está *oxidado* en el compuesto gaseoso dióxido de carbono (CO₂) y que está *reducido*, cuando forma parte de la glucosa. Oxidación y reducción son procesos químicos inversos (un compuesto químico se oxida cuando en una reacción aumenta la proporción de oxígenos en su estructura final, o si pierde electrones; y, un compuesto químico se reduce cuando en una reacción aumenta la proporción de hidrógenos en su estructura final, o si logra una ganancia de electrones).

La glucosa tiene varias funciones en las células vegetales, fundamentalmente de sostén, pues es la unidad repetitiva para la formación del polímero celulosa.

Pero nos interesa señalar aquí que los organismos heterótrofos no pueden sintetizar glucosa de esta forma y, por lo tanto, la deben ingerir en los alimentos⁷. Las células animales, "queman" glucosa, para obtener energía, mediante complejos sistemas enzimáticos que oxidan glucosa, degradándola a moléculas más pequeñas, y logrando captar la energía liberada con formación de otras moléculas que la pueden "conservar", como el ATP (adenosín-tri fosfato). Para oxidar glucosa, los organismos necesitan reducir otro compuesto; y es nada menos que el oxígeno presente en la atmósfera. Esta parte del metabolismo es la denominada *respiración celular* y que ocurre en las mitocondrias de las células.

La fórmula química de ecuación balanceada que señala cómo la glucosa puede ser nuevamente oxidada a CO₂ es:



Conocer los innumerables detalles y factores que intervienen han requerido la investigación de cientos de científicos. La comprensión de este fenómeno del área Química Biológica ha demandado gran parte del siglo XX, aunque sus preguntas más generales ya intrigaban a los hombres desde muchos siglos anteriores.

La Química y la Sociedad

La *Química* influye en la vida de todos en todo momento y sus procesos pueden ser localizados o afectar a todo el ambiente planetario. Cuando se quema un combustible de origen fósil, ocurren reacciones químicas que liberan energía capaz de suministrar potencia para el transporte, generación de electricidad para nuestros hogares y negocios, etc. Sin embargo... algunos de los productos secundarios de la combustión de grandes cantidades de estas sustancias están dañando nuestro ambiente planetario, dando lugar a lo que se conoce como *efecto invernadero* que produce profundas modificaciones en el clima. Los químicos podemos ayudar a la sociedad para trabajar sobre esta problemática, como también para superar otros procesos de alteración del ambiente mediante la preservación de recursos hídricos; el logro de mejores cosechas con el empleo de fertilizantes y pesticidas que presenten el menor riesgo posible para los organismos vivos, etc.

La comprensión química de un proceso ambiental: remediación para el caso del Lago Nyos, en Camerún.

En el continente Africano, se encuentran diferentes lagos, dos de ellos, se los conoce como los *Lagos asesinos de Camerún*.

6. La fórmula molecular de la sustancia D-glucosa es: C₆H₁₂O₆. Se trata de un monosacárido cuya molécula está formada por seis átomos de carbono, doce átomos de hidrógeno y seis átomos de oxígeno. Como podría escribirse C₆(H₂O)₆, a estos compuestos de los llama hidratos de carbono. Su estructura química es un ensamblaje muy específico de uniones entre estos átomos. Con esa misma fórmula molecular podemos tener más de 40 compuestos diferentes, cada uno con su nombre y sus propiedades particulares. No todos esos hidratos de carbono son moléculas que existen en los organismos vivos, pero los químicos los pueden sintetizar en el laboratorio.

7. Algunas células animales pueden sintetizar glucosa, pero nunca a partir de compuestos inorgánicos, como lo hacen las plantas fotosintetizadoras.

8. Esta ecuación es inversa a la anterior, de síntesis de glucosa... ¡Sin embargo, los mecanismos biológicos que hacen posible cada proceso son totalmente diferentes!

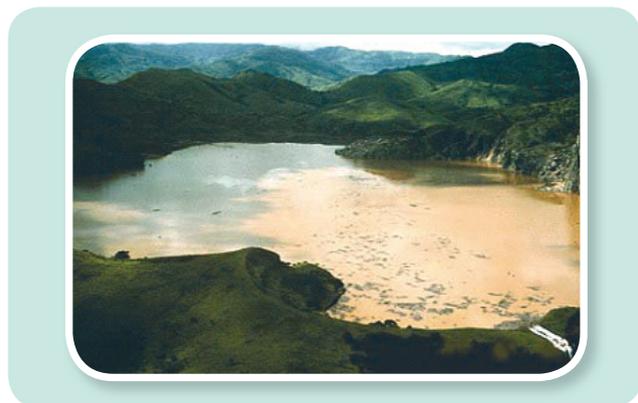


Figura 1: Lago Nyos en Camerun. África

Dos de dichos lagos: el Lago Nyos y el Lago Monoum que son lagos de cráteres, formados cuando los cráteres volcánicos fríos se llenaron de agua, provocaron una inmensa tragedia natural en el año 1986. El día jueves 21 de agosto de 1986, el Lago Nyos provocó en un instante, la muerte de 1700 personas y la de aproximadamente 4000 animales. Una enorme burbuja que contenía el compuesto gaseoso dióxido de carbono (CO_2), se elevó al aire desde el fondo del lago alcanzando una altura de 79 m y permaneció allí. Al explotar la burbuja, el dióxido de carbono liberado se desplazó a una velocidad de 72,4 km/h, y llegó a pueblos que se encontraban a una distancia de 19 km. El lago liberó aproximadamente un kilómetro cúbico de dióxido de carbono gaseoso, el cual desplazó el oxígeno necesario para la vida y provocó asfixia instantánea en las personas y animales. ¿Cómo puede una persona que tiene conocimientos de química, explicar lo ocurrido? El fondo del lago hay un basamento constituido por carbonato de calcio (CaCO_3) conocido comúnmente como *pedra caliza*, que cuando se ve sometido a temperaturas superiores a los 800°C se descompone para dar lugar a dióxido de carbono gaseoso y óxido de calcio sólido (CaO), conocido bajo el nombre vulgar de *cal viva*. Este último reacciona con el agua para dar lugar a hidróxido de calcio [$\text{Ca}(\text{OH})_2(\text{s})$] al que se lo conoce con la denominación vulgar de *cal apagada*.

La ecuación balanceada es:



El dióxido de carbono puede disolverse en agua, pero lo hace en forma muy limitada⁹.

La solubilidad del dióxido de carbono en agua disminuye con el aumento de la temperatura, por lo cual se explica el desprendimiento de la enorme burbuja de CO_2 (g). ¿Qué provocó el aumento de la temperatura en el fondo del lago? Los movimientos sísmicos y la continua elevación del magma candente de la tierra. No nos olvidemos que nuestro Planeta Tierra está "vivo".

¿Cómo pudo provocar el dióxido de carbono la muerte de tantas personas? Los seres vivos de la biosfera estamos rodeados por la atmósfera, estamos inmersos en un *océano gaseoso*; los gases tienen diferentes valores de densidad. Los podemos clasificar en gases menos densos como el oxígeno y el nitrógeno, cuyas densidades están por debajo de 1,2 g/L, y los más densos (densidad superior a 1,2 g/L). Entre estos últimos se encuentra el dióxido de carbono.¹⁰ Cuando la inmensa burbuja explotó, el dióxido de carbono liberado, se desplazó a gran velocidad hacia abajo, hasta el nivel del suelo y desplazó al oxígeno gaseoso necesario para la respiración, por lo tanto las personas y animales murieron por asfixia instantánea.

¿Como se remedió esta situación?

A principios de 2001, los científicos introdujeron en el lago un tubo de aproximadamente 200 m de alto. En la actualidad, la presión del dióxido de carbono que escapa da lugar a un chorro de agua que se eleva hasta 50 m en el aire. En el transcurso del año se liberan aproximadamente 20.000 L de gas.

Por ello, es necesaria una concientización en la sociedad con respecto a la comprensión que la Química nos brinda sobre fenómenos naturales. Hoy muchos libros de texto a nivel de enseñanza media, terciaria y universitaria, no sólo introducen los fundamentos de la Química sino que narran los hechos sociales y la importancia para la sociedad en el devenir del descubrimiento de dichos fundamentos a través de la Historia de la Química (Petrucci et al., 2003, Kotz et al., 2006).



Figura 2: Adaptación realizada en el Lago Nyos, para lograr la liberación de CO_2 (g) producido en forma natural en el fondo del lago.

La química de los metales involucrada en la biología: Química Bioinorgánica.

La gran actividad fabril desarrollada a partir de lo que se conoció como *Revolución Industrial* a mediados del siglo XIX, originándose principalmente en Inglaterra, conllevó a que el mundo lograra aumentar el bienestar de la sociedad a través de actividades

9. La concentración de ácido carbónico es insignificante; casi todo el CO_2 disuelto está como tal.

10. En el teatro o en salones de baile a veces se ambienta con la presencia de niebla; está se logra empleando el conocido hielo seco, que es dióxido de carbono sólido que se evapora a temperatura ambiente a dióxido de carbono gaseoso, sin pasar por el estado líquido. Allí podemos observar la nube de dióxido de carbono que se desplaza al ras del piso, hasta que se diluye entre los otros gases de la atmósfera.

industriales tales como las dedicadas a la metalurgia: procesado de metales y al empleo de los derivados de la misma. Los metales cobraron una importancia aún mayor que lo ya desarrollado en la Antigüedad. No nos olvidemos que se habla de la *era del cobre*; los egipcios empleaban el metal cobre¹¹ para la elaboración de utensilios y armas de guerra. La invasión de los Hititas introdujo al hierro como un metal más resistente y eficaz, para lograr armas de guerra con mayor poder destructivo que el metal cobre. El devenir de los tiempos introdujo al aluminio¹² como un metal caro pero muy eficaz para la construcción por su resistencia a la *corrosión* bajo condiciones ambientales normales, y al mismo tiempo el elemento metálico cromo¹³ comenzó a reemplazar eficazmente al hierro y al aluminio. La utilización del cromo y sus compuestos derivados aumentó la eficacia económica de muchos procesos industriales, pero también introdujo riesgos de cáncer en la población mundial. La introducción de iones provenientes de estos metales en las aguas de desecho de origen industrial introdujo en general problemas de salud para todos los organismos vivos y por ello se debieron intensificar los estudios de carácter toxicológicos, que implicaron profundos estudios químicos que se relacionaron con una nueva disciplina de la química inorgánica, la química bioinorgánica. Esta última disciplina se puede interpretar como una rama de la química biológica, que estudia la participación de los iones metálicos en procesos biológicos. Ejemplificaremos cómo esa disciplina estudia los efectos del elemento cromo en los organismos vivos. El elemento cromo¹¹ se lo emplea en las industrias dedicadas al cromado, fabricación de pigmentos y colorantes, conservación de la madera, producción de soldaduras de acero inoxidable y curtiembre, entre otras. Los compuestos más empleados en la industria son los derivados del cromo en estado de oxidación hexavalente (Cr^{6+}) que se producen cuando el elemento al estado nativo ($\text{Cr}^0(\text{s})$) pierde por reacción química seis electrones y da lugar al ion positivo hexavalente (Cr^{6+}) bajo la forma de los compuestos conocidos como cromatos, siendo el más común el cromato de sodio: (Na_2CrO_4) o los muy difundidos dicromatos como el dicromato de sodio: ($\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$); se suman a éstos el trióxido de cromo u óxido de cromo (VI) (CrO_3) compuesto anticorrosivo por excelencia. Otro estado de oxidación muy difundido del elemento cromo, es el estado trivalente, que da lugar al cromo en estado de

oxidación positivo Cr^{3+} , siendo el óxido de cromo (III) (Cr_2O_3) el compuesto más frecuentemente utilizado en la industria porque de los minerales que lo contienen se obtiene el cromo metálico.

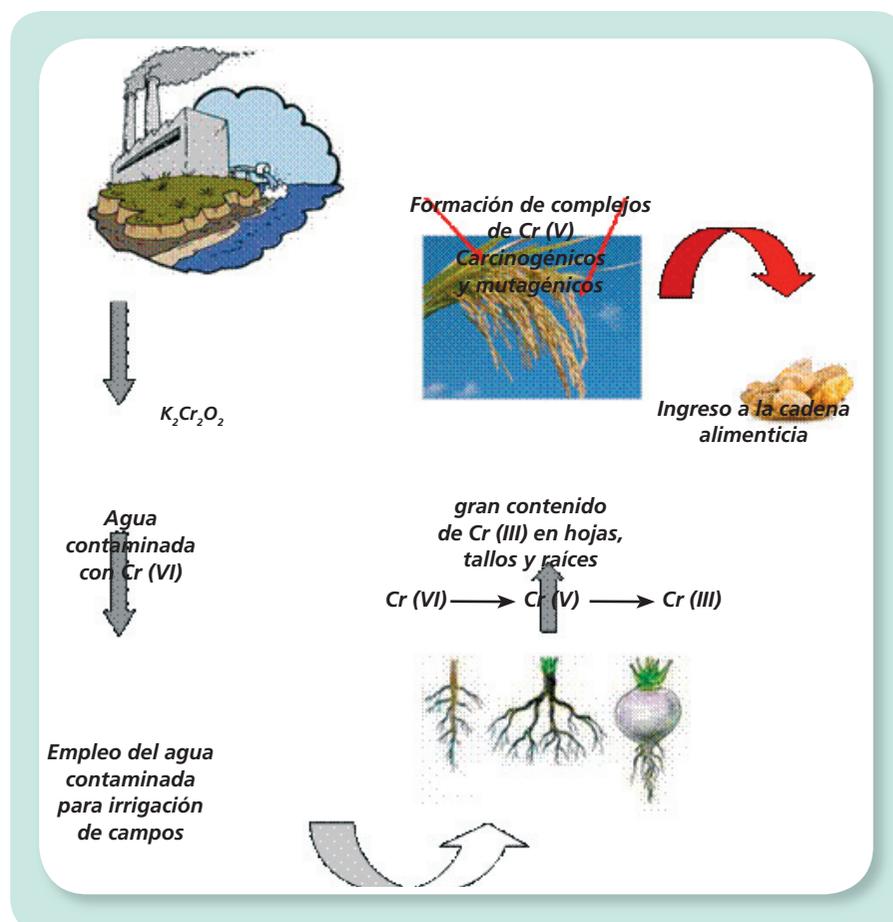


Figura 3: Ciclo de Contaminación e introducción en la cadena alimentaria del elemento cromo, diagramado por el grupo de investigación dedicado al estudio de la Bioinorgánica del elemento cromo¹¹ dirigido por el Dr. Luis Federico Sala.

El elemento cromo¹¹ puede ser perjudicial para la salud de los organismos vivos de acuerdo al estado de oxidación en el que se encuentre en la cadena alimentaria, siendo introducido a la misma por la actividad industrial que emplea al mencionado metal o sus derivados. En la siguiente gráfica podemos apreciar la introducción del elemento cromo¹¹ en la cadena alimentaria por el accionar de una curtiembre que utiliza dicromato de sodio ($\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) o sulfato de cromo (III) ($\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3$).

El cromo hexavalente (Cr^{6+}) da lugar a compuestos muy solubles en agua, por lo cual se dice que tiene gran movilidad, en cambio el cromo trivalente (Cr^{3+}) da lugar a compuestos muy insolubles en agua (principalmente hidróxido de cromo) y, por lo tanto, se lo clasifica como no móvil. Las industrias que eliminan al medio compuestos que contienen Cr^{6+} , como dijimos, muy solubles, pueden contaminar en demasía a los cuerpos acuíferos; la eliminación de compuestos de

11. Símbolo del elemento cobre: Cu.

12. Símbolo del elemento aluminio: Al.

13. Símbolo del elemento cromo: Cr

Cr^{3+} , en cambio, no producen gran contaminación por ser insolubles en agua, quedaría en el fondo de los cuerpos acuíferos. Sin embargo, si ese suelo contiene un compuesto oxidante tal como el dióxido de manganeso (MnO_2), éste puede reoxidar al Cr^{3+} a Cr^{6+} , y volver a reiniciar el ciclo de contaminación.

Cuando se ingiere agua contaminada con cromo hexavalente, bajo la forma de ion cromato ácido [$\text{HCrO}_4(\text{ac})$], éste logra entrar dentro de la célula empleando el canal utilizado por el anión sulfato (SO_4^{2-})¹⁴. Dentro del ambiente celular el Cr^{6+} es reducido por los componentes naturales de la célula, tal como el compuesto glutatión, a Cr^{3+} , pasando por los estados intermedios Cr^{5+} y Cr^{4+} que son muy cancerígenos porque dañan con mucha facilidad e intensidad a los componentes celulares. El último estadio de reducción del Cr^{6+} es Cr^{3+} el que produce desdoblamiento de las hebras del ADN nuclear, lo que conlleva a la degeneración de la célula y por último al cáncer.

La comprensión química de los procesos permite una remediación

Existen dos vías para lograr solucionar esta posibilidad de desarrollar cáncer por ingesta de iones proveniente de metales pesados como el cromo:

(a) Suministrar a los trabajadores expuestos a esta ingesta ácido ascórbico. Este compuesto actúa extracelularmente, reduciendo el Cr^{6+} a Cr^{3+} ; como este catión tiene muy poca capacidad de atravesar la membrana celular, no provocará daño del ADN celular.

(b) Eliminar el elemento cromo en sus diferentes estados de oxidación del agua que los contiene. Para este último caso existen muchas metodologías de "limpieza de aguas" que se conocen bajo el término general de *Remediación*. Algunos procesos de *Remediación* son simples, por ejemplo, el agregado de compuestos que logren la reducción del Cr^{6+} a Cr^{3+} , o la precipitación química como hidróxido de cromo ($\text{Cr}(\text{H}_2\text{O})_3(\text{OH})_3$) que por ser insoluble, quedará precipitado en el fondo del sistema acuífero. Otras técnicas de *Remediación* son más complejas como por ejemplo: la ósmosis reversa. Otro método muy económico desarrollado en los últimos años, a partir de la década del 90 del siglo XX, es el que utiliza biomasa muerta, como por ejemplo, los desechos agrícolas, porque son capaces de adsorber y reducir el Cr^{6+} sobre sus superficies y retener en forma eficiente el Cr^{3+} producido en el proceso de reducción, con lo cual el agua, queda exenta o con una cantidad de Cr^{6+} o Cr^{3+} admitido por la legislación vigente para el agua potable. Las regulaciones al respecto, son fijadas por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (Environmental Protection Agency; USA) y adoptada por la mayor parte de los países del mundo occidental y oriental. El siguiente esquema nos resume el proceso mencionado anteriormente que se conoce con el término genérico de *Biosorción*.

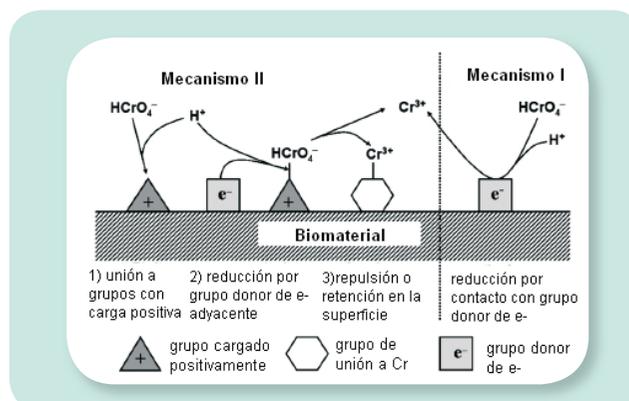


Figura 4: Remoción de $\text{Cr}(\text{VI})$ por biomateriales; mecanismo de Biosorción. (Park et al, 2007)

La mayor parte de las biomasas muertas, operan por el mecanismo II, lo cual garantiza que prácticamente el metal bajo la forma de sus iones, puede ser eliminado con facilidad (e^- significa electrón).

Consideraciones finales

En este capítulo quisimos mostrar ejemplos que permiten valorar cómo la comprensión de fenómenos químicos, naturales o provenientes de acción del hombre, nos muestran caminos posibles para mejorar situaciones ambientales que ponen en peligro a partes de la sociedad.

La Química está en todas partes, los compuestos químicos nos forman, conforman, contienen, rodean, y los procesos químicos caracterizan las formas orgánicas e inorgánicas de nuestro mundo. El mundo es Química y la Química es un mundo donde hay aún mucho para descubrir.

14. El anión sulfato no es una especie nociva para los organismos vivos.

Referencias bibliográficas:

Kotz J.C., Treichel P.M., Weaber G. (2006) Química y reactividad química., 6ta Edición, Editorial Thomson

Park, D. Lim, S. Yun, Y. Park, J., (2007) Reliable evidences that the removal mechanism of hexavalent chromium by natural biomaterials is adsorption-coupled reduction, Chemosphere, 70, 298-305.

Pearson, R. G. (2005) Chemical hardness and density functional theory J. Chem. Sci. 117 (5): 369-377.

Petrucci R.H., Harwood W.S., Geoffrey H (2003). Química General. Principios y Aplicaciones Modernas. 8va edición, Prentice Hall Hispanoamericana.



Agradecimientos:

El autor está muy agradecido a los Dres. Galagovsky y Fasoli por sus invaluables sugerencias y modificaciones al texto, que han permitido una mayor claridad de transmisión del sentido químico del capítulo. El autor agradece a la Universidad Nacional de Rosario y al Consejo de Investigaciones Científicas y Técnicas por la ayuda económica para el desarrollo de su Carrera Académica.