

LA FASCINANTE HISTORIA DE UN ÁTOMO DE HIERRO

Enrique J. Baran

Cuando pensamos en el hierro lo asociamos de inmediato con muchas de sus aplicaciones en la vida diaria. Siendo el constituyente esencial del acero, lo encontramos en la estructura de numerosas construcciones, en puentes y en vías férreas, en máquinas, motores y calderas. Tal vez también sepamos que luego del oxígeno, el silicio y el aluminio, el hierro es el cuarto elemento más abundante en la corteza terrestre, siendo también el componente mayoritario del núcleo del planeta. Menos conocida, pero importante, es la estabilidad nuclear del hierro que justifica su relativamente elevada abundancia cósmica manifestada, entre otros hechos, por su presencia en meteoritos. También sabemos que el hierro se encuentra en la Naturaleza bajo la forma de diferentes tipos de óxidos y que, por reducción de esos óxidos con carbón en los llamados "altos hornos", se obtiene el metal hierro. También recordamos que el hierro está presente en nuestra sangre y también en la de muchos animales, cumpliendo un papel fundamental en la respiración de los seres vivos.

La química del hierro, sumamente rica y variada, está asociada, fundamentalmente, a los estados de oxidación Fe(II) y Fe(III), aunque se conocen compuestos en los que el metal se presenta en otros estados de oxidación. Así, en el compuesto de fórmula $\text{Fe}(\text{CO})_5$ el hierro presenta formalmente el estado de oxidación cero y, lo que es más interesante, este compuesto es líquido a temperatura ambiente y por calentamiento pasa fácilmente a la fase gaseosa. Por otra parte en el anión FeO_4^{2-} , llamado ferrato, el hierro se encuentra formalmente como Fe(VI) y esta especie es fuertemente oxidante.

El hierro juega un papel importante en los fenómenos evolutivos de nuestro planeta que por algunos miles de millones de años, produjeron una gran variedad de sistemas biológicos y de procesos bioquímicos fundamentales. Para ilustrar estos aspectos vinculados con la importancia de la presencia del hierro en aquellos fenómenos, contaré una muy interesante historia. Tiempo atrás, luego de una larga jornada de trabajos vinculados con la química del hierro me dormí profundamente y en mis sueños se me apareció un "pequeño" átomo de hierro, en forma de una carita parlante que manifestó su deseo de contarme algunas facetas de su vida. Y esto fue lo que escuché:

- En realidad ya no me acuerdo bien cuando, cómo y donde fui generado y de la forma como arribé a la Tierra. Pero sí recuerdo bien que inicialmente formé parte de un sulfuro mineral al que, según creo, ahora llaman pirita. En esa época de alguna manera tomé conciencia que la Naturaleza estaba tratando de crear algo que ahora llaman formas primitivas de vida y también que de alguna manera se me quería involucrar en la creación de esas formas. Tiempo después me encontraba flotando libremente en las aguas de un océano disfrutando de increíble libertad junto a millones de mis átomos hermanos hasta que, finalmente, fui atrapado por una bacteria e

incorporado a una proteína. Curiosamente, observé que esa proteína hacía un trabajo novedoso e interesante: generaba oxígeno a partir del agua de mar, algo que hasta entonces no se había visto y que fue la etapa inicial de lo que después se llamó fotosíntesis. Creo que esa generación continuada de oxígeno empezó a afectar seriamente nuestras vidas. Al menos empecé a notar una gran inquietud entre mis hermanos ferrosos que todavía se movían libremente dentro del agua. Al tiempo noté en ellos cambios profundos; creo que estaban sufriendo alguna transformación importante, del tipo de la que los químicos llaman hoy cambio de estado de oxidación, y a medida que esa transformación avanzaba, se hacían más pesados. Finalmente, perdieron su movilidad y lentamente caían al fondo del mar donde quedaban inmovilizados y comenzaban a formar parte de depósitos minerales. A propósito creo haber escuchado, que recientemente esos depósitos han sido utilizados para determinar el tiempo en el que se comenzó a generar oxígeno en nuestra atmósfera.

En ese momento lo interrumpí y le pregunté:

- ¿Y no observaste otros cambios o la aparición de nuevos seres en tu vecindad.?

Pensó un rato y luego, sonriendo, me respondió:

- Sí, en ese tiempo muy interesante y lleno de novedades, aparecieron otros átomos que nunca se habían visto antes. Por ejemplo, unos muy bonitos de color azul y otros de color verde. Supongo que a ellos les ocurrió algo parecido a lo de mis hermanos, pero en forma inversa, esto es, nacieron inmovilizados y la presencia de oxígeno les dió movilidad y libertad. Pero a mi también me ocurrieron cosas. La bacteria que me alojaba finalmente murió y entonces empecé a sentir yo también algunos cambios, fui atrapado por otra bacteria y formé parte de un hermoso cristal de magnetita, de caras perfectas, brillantes y pulidas y creo que "mi dueño" usaba ese y otros cristalitos semejantes para orientarse en el campo magnético de la Tierra.

- O sea formabas parte del sistema de orientación de las llamadas bacterias magnetotácticas que todavía existen y nos sigue intrigando acerca de la forma en que son capaces de generar esos cristales tan perfectos de Fe_3O_4 . Hoy, estamos estudiando en el laboratorio como podemos lograr cristales de esa misma calidad y con las mismas propiedades magnéticas, para poder aplicarlos a sistemas de interés tecnológico.

- Me alegra mucho que me cuentes eso porque aunque mi asociación con esa bacteria no fue muy larga, de todas maneras constituyó una experiencia muy interesante. En ese entonces yo aspiraba a unirme con alguien más importante, cosa que finalmente logré al quedar incorporado a la metaloproteína de un organismo heterótrofo y allí viví otra experiencia muy emocionante: participé en procesos muy complejos en los que se generaban aminoácidos a partir del nitrógeno atmosférico. No sé cuanto tiempo pasé haciendo ese duro trabajo. Luego tengo como un vacío en mi memoria, pero, finalmente, recuerdo con emoción el día en que me encontré en un prado muy hermoso rodeado de pastos altos, flores y plantas. Creo que estaba en el interior de una gran hoja verde y a pesar de que gustaba del sol, la luz y el hermoso paisaje, siempre me encontraba molesto e incómodo porque era como si continuamente algo le pasara a mi estado de oxidación, era como si engordara o enflaqueciera, por ciclos. Algo muy molesto! ¿Tienes idea, de por qué me sentía así?

Al ver al pobre átomo tan confundido no pude menos que sonreír y entonces le respondí:

- Es claro. Evidentemente estabas formando parte de una ferredoxina vegetal, una de las proteínas de hierro/azufre que participa del transporte de electrones, que ocurre aprovechando tus dos estados de oxidación fácilmente accesibles. Por lo tanto, te sentías más flaco o más gordo, según la cantidad de electrones que quedan alrededor tuyo.

Puso cara de agradecimiento, lanzó un suspiro, y continuó:

- En esa época de mi vida también tomé conciencia de que mi trabajo de alguna manera estaba relacionado con el de otros metales vecinos. ¿Es correcta mi apreciación?

- Veo que eras muy buen observador! En las plantas verdes hay otros sistemas metálicos importantes que participan de los procesos de fotosíntesis. Por ejemplo las clorofilas que utilizan al magnesio, y otros sistemas que contienen manganeso. ¿Y dime, como prosiguió tú vida allí?

- En realidad esa vida también cambió muy rápido, un día de golpe se hizo la oscuridad y creo que eso ocurrió porque la hoja en la que vivía fue devorada por alguien. Y allí tengo un nuevo vacío en mi memoria, pero cuando vuelvo a recordar creo que "mi dueño" ahora era un pequeño animal silvestre, un conejo o algo así, y me encontraba en el medio de su torrente de sangre.

- O sea -le dije yo- finalmente llegaste a un organismo superior y quedaste atrapado en una metaloproteína llamada hemoglobina, que participa activamente en el transporte de oxígeno y en el proceso respiratorio del conejo en el cual residías. Pero lo que tal vez no sepas, es que tú no eres el único átomo útil e interesante para este tipo de funciones. En las arañas y cangrejos, por ejemplo ese trabajo lo realiza una proteína que contiene cobre, la hemocianina.

- Si. Yo me daba cuenta de que andaba en algo como lo que dices, ya que cuando "mi conejo" huía del ataque de otro animal debía trabajar en forma continuada y dura, y entonces la sangre en la que me movía circulaba a mayor velocidad. Pero un día, en el que el conejo también comenzó a correr muy velozmente, saltando y brincando, escuché una fuerte explosión y el animal se quedó quieto y poco después, la sangre dejó de circular. Entonces rápidamente me envolvió la oscuridad. Supongo que el conejo fue atrapado por algún cazador que, finalmente, se lo debe de haber comido ya que al tiempo me encontré en otro entorno, totalmente diferente y nuevo para mí, rodeado de muchísimos hermanos. El sistema era relativamente tranquilo, de vez en cuando algunos hermanos desaparecían, pero al tiempo otros se incorporaban. Era algo así como si estuviéramos confinados en una prisión, con entradas y salidas estrictamente vigiladas. No me imagino lo que hacíamos allí.

Lo interrumpí nuevamente, y le dije:

- Por lo que me acabas de describir, evidentemente estabas atrapado en lo que llamamos ferritina que es un sistema de almacenamiento o reserva de hierro, características de los mamíferos, y al cual se puede recurrir a medida que se necesita utilizar el hierro para incorporarlo a los diversos procesos biológicos del hombre. No

me extrañaría que en algún momento salieras de allí y aparecieras de nuevo trabajando en otra parte.

- Efectivamente, tiempo después noté que algo le estaba pasando al hombre, pues empecé a sentir un calor inusual. Observé que, casi todos los días, desaparecían algunos de mis hermanos, pero ninguno nuevo se incorporaba. Por lo que pude apreciar, el hombre había enfermado y casi no podía alimentarse, pero parece que al menos su metabolismo del hierro no se había interrumpido totalmente y eso me alegró, porque pensé que tal vez podíamos ayudarlo a sobrevivir, como realmente ocurrió. En realidad, yo fui uno de los pocos hermanos que quedaron encerrados casi hasta el final de su recuperación, pero finalmente también me liberaron del encierro pero luego de un tiempo me encontré atrapado en otra proteína en la que me reencontré con un viejo conocido, el oxígeno. Ahora trabajaba en destruir moléculas de agua oxigenada, que parecen ser muy tóxicas, transformándolas en oxígeno para que no se acumularan en los sistemas celulares. No entiendo bien lo que pasaba, pero tenía la sensación de que hacía algo importante. ¿A tí qué te parece?

- Has acertado. Tú función era realmente valiosa. Evitabas que se acumule el agua oxigenada, que es muy perjudicial para los sistemas celulares debido a su poder oxidante.

- Que bien! Eso me alegra. Pero escucha otra cosa muy interesante que pude observar. Había otros hermanos míos que hacían un trabajo similar, pero más sofisticado, ya que en lugar de destruir simplemente el agua oxigenada la usaban para hacer otras reacciones, aunque lo importante era que finalmente el agua oxigenada también desaparecía. En algún momento alguien también me comentó que había algunos sistemas con iguales funciones, pero no asociados con nosotros, que creo usaban un átomo relativamente grande que llamaban selenio. ¿Sabes tú, lo que es todo ésto?

- Sí, tus observaciones son correctas. Los sistemas que utilizan agua oxigenada en algunas reacciones de oxidación son las peroxidasas y, tal vez te interese saber que una clase especial de ellas, llamadas haloperoxidasas, es capaz de producir la halogenación de ciertos sustratos orgánicos en forma muy eficiente. Ah! Otra cosa muy interesante: recientemente se ha descubierto que en algunas algas, hongos y líquenes estos sistemas que utilizan agua oxigenada contienen vanadio en lugar del hierro. Los átomos de vanadio deben ser primos lejanos tuyos. También es correcta tú observación respecto del selenio ya que forma parte de un sistema enzimático muy complicado llamado glutatión-peroxidasa que también ayuda a degradar al agua oxigenada y ciertos peróxidos orgánicos, defendiendo así a las membranas celulares del ataque de estos oxidantes. Observé que se concentraba para comprender mis respuestas. Luego, tomando nuevo impulso, agregó:

- Lo último que quería contarte es que en algún momento detecté que entraban en el organismo de "mi hombre" muchos hermanos míos, asociados a algunas moléculas sencillas. Creo que ellos finalmente iban a parar a ese lugar que tu llamaste ferritina. No entendí bien la razón de este hecho, pero tengo la impresión que después de un tiempo el organismo del hombre funcionaba bastante mejor. ¿Puede ser?

- Es así!! Hemos encontrado diversas vías para suplementar a hombres y animales con elementos esenciales. Probablemente "tu hombre" como consecuencia de la enfermedad que había sufrido, tenía una cierta deficiencia de hierro y para esos casos la farmacología ha desarrollado una variedad de compuestos útiles para revertir ese problema. Se trata muchas veces de complejos sencillos que son fácilmente absorbidos e incorporados al metabolismo normal del hombre. Y de paso, te comento también, que a veces hay personas que sufren enfermedades asociadas a excesos de elementos esenciales, incluso tú y tus hermanos están frecuentemente involucrados en esos desórdenes. Para esos casos también existen tratamientos, llamados genéricamente *quelatoterapias*, que permiten remover con bastante eficacia esos excedentes.

En ese momento comencé a despertar y vi, todavía entre las brumas de la somnolencia, al "pequeño" átomo que me sonreía nuevamente, mientras me decía:

- No te parece fascinante todo lo que he visto y vivido en estos larguísimos años?

En el momento en que iba a responderle sonó el despertador y mientras me despejaba definitivamente continué pensando en las maravillosas historias que había escuchado. Esta pequeña historia sirve para mostrar diversos aspectos de la Ciencia actual que hacen al avance del conocimiento, a las interrelaciones disciplinarias, a las aplicaciones de la ciencia y la cultura, entre ellos:

- la abundancia relativa de los elementos en la corteza terrestre y su impacto cósmico (hierro en meteoritos);
- la forma natural de los elementos (hierro en forma de óxidos) y los procesos metalúrgicos (el alto horno);
- la fuerte interrelación entre los ciclos geológicos, químicos y bioquímicos;
- la importancia de los metales en relación al origen de la vida;
- los sistemas de datación geológica;
- la particular importancia del hierro para todas las formas de Vida, desde los microorganismos hasta el Hombre y su participación en un variado número de procesos fundamentales tales como el transporte de oxígeno (hemoglobina) o el de electrones (ferredoxinas), así como su presencia en centros catalíticos (catalasas y peroxidasas);
- la importancia de otros metales y elementos en sistemas biológicos (p. Ej., Mg, Mn, Cu, Se);
- el descubrimiento reciente de la actividad biológica de ciertos metales (haloperoxidasas dependientes de vanadio);
- el diseño racional de metalofármacos (suplementación de hierro) y la utilización de quelatoterapias (remoción de un exceso de elemento);
- la investigación de sistemas biológicos con el objeto de mejorar la calidad y el diseño de materiales de interés actual (lo que algunos ya denominan tecnologías "bioinspiradas").

Si uno analiza el breve panorama aquí presentado y medita acerca de todas sus implicancias podrá concluir que el estudio de las Ciencias de la naturaleza, abre la puerta a mundos novedosos y fascinantes, y de problemas no resueltos que constituyen muy atractivos desafíos intelectuales. También percibirá, que en la Ciencia actual hay una fuerte tendencia hacia las actividades interdisciplinarias y a una

estrecha e intensa cooperación entre científicos de muy diversa formación, en la búsqueda de soluciones a problemas de interés común.