

**Juan Carlos Torres Peters**

El autor es Licenciado en Ciencias con mención en Biología de la Universidad de Chile, obtuvo un M.A. en Biología en la Universidad de Princeton, y un Doctorado en Biología en la Universidad de Chile. Entre los años 1997 y 2002, se desempeñó en la Gerencia de Medio Ambiente, Vicepresidencia de Desarrollo, de Codelco Chile, dedicado a temas regulatorios nacionales e internacionales relacionados con los efectos de metales sobre la salud humana y el medio ambiente.

Juan Carlos Torres Peters

# **Cobre, Medio Ambiente y Salud**

---

## **Una Conexión Vital**

Comisión Chilena del Cobre  
Comisión Técnica Asesora para la revisión del contenido de cobre  
en la Guía del Agua Potable de la OMS

© Comisión Chilena del Cobre.

Inscripción N° 129.260

ISBN 956-8242-00-7

Editores: Comisión Chilena del Cobre

Agustinas 1161 4° Piso

Se terminó de imprimir esta primera edición de 1.000 ejemplares  
en el mes de diciembre de 2002

Impreso en Chile

Diseño y Diagramación: RTDiseño

No se permite la reproducción total o parcial de este libro, incluido el diseño de la cubierta, ni su incorporación a un sistema informático, ni su transmisión en cualquier forma o por cualquier medio, sea éste electrónico, mecánico, reprográfico, gramofónico u otro, sin previo aviso y por escrito del editor.

Este trabajo fue preparado por el señor Juan Carlos Torres Peters, Doctor en Biología, para la Comisión Técnica Asesora para la revisión de la Guía sobre Calidad del Agua Potable de la Organización Mundial de la Salud (OMS) en lo relativo al cobre. Las opiniones expresadas en este trabajo, son de la exclusiva responsabilidad del autor y pueden no coincidir con las de la Comisión.

El autor desea agradecer al equipo de la Gerencia de Medio Ambiente, Vicepresidencia de Desarrollo, de Codelco Chile durante el período 1997-2001, así como a los funcionarios de la Unidad de Asuntos Internacionales y de Medio Ambiente de la Comisión Chilena del Cobre, con quienes compartió y aprendió lo que hoy se vierte en este libro. En forma particular desea expresar su reconocimiento al señor Juan Enrique Morales, Vicepresidente de Desarrollo de Codelco, y gestor del Boletín "Cobre: Desafíos Regulatorios", que dio origen a las ideas de este libro.

Además, agradece al Sr. Santiago Torres, Gerente de Medio Ambiente de Codelco en ese período, a la Sra. Soledad Santa Ana, profesional de la Unidad de Asuntos Internacionales y de Medio Ambiente de Cochilco, y Secretaria Técnica de la Comisión Técnica Asesora mencionada, y al Dr. Patricio Rodríguez, Director del Laboratorio de Química y Ecotoxicología de Metales Traza del CIMM, por su apoyo, estímulo intelectual y comentarios críticos al texto.

Finalmente, agradece a Minera Escondida por facilitar las fotografías que aparecen en la portada de este libro.





## CONTENIDO

Prólogo	III
Introducción	VII

### PARTE I \_\_\_\_\_

<b>BREVE HISTORIA NATURAL DEL COBRE</b>	<b>1</b>
El Cobre, un Elemento Natural	1
Abundancia Natural y Flujos	2
El Cobre, un Elemento Esencial	4
Deficiencia de Cobre	7
Cobre y Enfermedades Genéticas	9
Cobre y Toxicidad	14
Efectos Agudos y Crónicos	18
El Cobre y los Seres Humanos	19
El Cobre y Otras Especies	20
Biodisponibilidad	24
El Modelo de Ligando Biótico	26

### PARTE II \_\_\_\_\_

<b>EI COBRE EN LOS ESCENARIOS REGULATORIOS</b>	<b>31</b>
Principio Precautorio	37
Criterios PBT: Persistencia, Bioacumulación y Toxicidad	40
- Persistencia	40
- Bioacumulación	41
- Toxicidad	43
Unión Europea: Evaluación de Riesgo	45
Concepto de Evaluación de Riesgo	45
El Proceso de EdR en la Unión Europea	47
Riesgos de una EdR	51



Proteína

<b>Clasificación de Peligrosidad: OECD</b>	51
Los Metales y su Clasificación de Peligro para la Vida Acuática	53
- Criterios Crónicos	54
a) Persistencia	54
b) Bioacumulación	55
- Criterio Agudo	56
Riesgos de la Clasificación de Peligrosidad de la OECD	59
<b>Desechos Metálicos - La Convención de Basilea</b>	60
El Sistema de Listas de Desechos	63
<b>El Escenario Regulatorio Nacional</b>	65
Anteproyecto de Normas de Calidad para la Protección de Aguas Continentales Superficiales	65
La Norma de Descarga de Residuos Líquidos a Aguas Superficiales	69
<b>PARTE III</b>	
<b>RIESGO, PRECAUCIÓN Y CIENCIA EN EL DESARROLLO DE REGULACIONES</b>	73
Ciencia y Decisiones Regulatorias	73
Riesgo y Percepción de Riesgo	76
<b>Referencias Bibliográficas y Lecturas Recomendadas</b>	81
Lista de Figuras	86
Lista de Tablas	87

En la actualidad, los procesos productivos mineros son vistos, como se suele decir "desde la cuna a la tumba", o sea, son considerados en toda su extensión. Parten con la extracción y explotación de la materia prima, pasando por el refinamiento y manufactura de productos metálicos, el transporte de materiales y productos, la utilización de los mismos, hasta culminar en las etapas de recuperación o reciclaje y disposición final de los desechos.

En tanto, las expectativas y realidades esencialmente cambiantes de los países, hacen ineludible la necesidad de proponer enfoques ambientales alternativos tendientes a prevenir o disminuir la contaminación, a través de instrumentos como: estándares de eco-eficiencia de los productos; evaluación y/o manejo de riesgos ambientales; caracterización de peligrosidad de las sustancias para el ser humano y los ecosistemas; certificación y verificación del comportamiento ambiental; y, también, responsabilidad y transparencia ambiental, a todo lo cual se agrega, necesariamente, la dimensión social y económica bajo el concepto de sustentabilidad.

El progreso de la minería, en general, y del cobre en particular, han generado un gran impacto para la economía nacional, proyectando a la actividad minera como una fuente competitiva de desarrollo a escala mundial, responsable y generadora de riqueza. Lo anterior, ha sido apoyado por un modelo social, político y económico estable, respaldado por una política minera orientada a la explotación eficiente y ambientalmente limpia de sus abundantes recursos mineros, con una gestión de los procesos productivos integrada a nivel social y medio ambiental, capaz de producir impactos positivos para el país, al potenciar el surgimiento de encadenamientos productivos y contribuir al mejoramiento de la calidad de vida tanto de las regiones mineras, como del país en su conjunto.

Siendo Chile el primer productor mundial de cobre, la agenda regulatoria ambiental mundial constituye un balance de "pros" (oportunidades de mejoramiento ambiental) y "contras" (barreras, más o menos visibles, del mercado) para las exportaciones chilenas. En este contexto, los minerales y metales han ocupado un lugar importante en la agenda ambiental internacional de la última década y, sin lugar a dudas, lo seguirán teniendo en los próximos años. Los principales aspectos por los que han sido sometidos al escrutinio regulatorio son:



- Efectos sobre la salud humana,
- Efectos en los ecosistemas, y
- Efectos sobre la sustentabilidad de los recursos naturales y energéticos

Frente a este escenario, Chile ha efectuado un trabajo global y activo en torno al cobre, apoyado en la acción del Gobierno, con el objeto de examinar la conexión entre Cobre, Medio Ambiente y Salud, dentro del marco regulatorio ambiental internacional. Sobre la base de este trabajo científico, nuestro país ha contribuido a generar un mayor conocimiento de la conexión vital que existe entre estos elementos y la forma en que debiera proyectarse en la agenda ambiental el cobre como elemento esencial.

En efecto, uno de los objetivos del esfuerzo desplegado por Chile, ha sido responder, apoyado en una clara y sólida base científica, a complejas negociaciones internacionales en el ámbito del cobre, donde nuestros científicos, las autoridades de salud y medio ambiente, al igual que los expertos del sector minero nacional, han tenido y sostienen una activa participación ante los organismos internacionales.

El segundo objetivo, quizás más incidente en el rol de Chile en este ámbito, ha sido examinar en toda su dimensión ambiental y de salud la actividad productiva del cobre, reconociendo tanto su importancia económica nacional, como sus posibles riesgos, en función de la evidencia empírica y el compromiso ético de una gestión responsable. En tal contexto, el Gobierno de Chile ha fundado su acción sobre cuatro ejes centrales:

- Reconocer y difundir las características del cobre como metal esencial para la salud humana, a través de investigaciones científicas que miden el efecto del cobre en la salud humana y el medio ambiente.

- Procurar y proponer una discusión metodológica en materia de toxicidad y uso seguro de metales.

- Difundir la contribución de la actividad minera al desarrollo sustentable en su dimensión económica y social.

- Reconocer la reciclabilidad del cobre y otras propiedades intrínsecas y ambientalmente positivas de este metal.

Esta posición ha sido defendida durante los últimos diez años por un grupo de trabajo interministerial que, bajo la presidencia de la Comisión Chilena del Cobre, y con la participación de destacados

científicos y expertos nacionales, se ha radicado en una Comisión Técnica Asesora del Presidente de la República para apoyar al Gobierno de Chile en la discusión de la Guía sobre Calidad del Agua Potable de la Organización Mundial de la Salud (OMS), en lo relativo al contenido de cobre y la evaluación de riesgo de los metales.

Como resultado, se han logrado generar más de 30 publicaciones en revistas internacionales, sobre investigaciones realizadas en el INTA y en diversas Facultades de la Universidad de Chile y de la Pontificia Universidad Católica de Chile, además del Centro de Investigación Minera y Metalúrgica (CIMM), en consorcio con Universidades extranjeras, al igual que numerosas presentaciones científicas ante organismos internacionales (Organización Mundial de la Salud (OMS), autoridades ambientales y de salud de Gobiernos extranjeros, etc.), que dan cuenta de la conexión existente entre Cobre, Medio Ambiente y Salud.

Lograr entender y dar seguimiento al vasto y complejo escenario regulatorio ambiental internacional no ha sido una tarea simple. Un primer nivel de complejidad es la gran diversidad de foros internacionales en que los metales y minerales aparecen incorporados: la Convención de Basilea; la serie de normas ISO 14000 sobre Sistemas de Gestión Ambiental; el Convenio de Diversidad Biológica; el Convenio de Estocolmo sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes (POPs); y, recientemente, la Cumbre Mundial de Desarrollo Sustentable. Por tanto, resulta fundamental establecer prioridades que permitan maximizar la eficacia de capacidades limitadas en la participación de Chile.

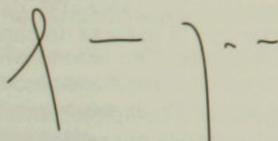
Es un escenario regulatorio complejo, en el que las posturas no siempre están respaldadas por evidencia científica adecuada y donde a menudo no es evidente la fuente de las presiones en uno u otro sentido, o el propósito último, muchas veces no explícito, de algunas medidas restrictivas. Por tanto, la negociación de Chile en el ámbito del cobre tiene un carácter técnico y político, lo cual requiere de equipos multidisciplinarios que den opiniones fundadas frente a aquellas regulaciones que pudieran afectar al sector, y así poder lograr negociaciones exitosas.

Quiénes negociaron, qué posiciones ambientales primaron, con quiénes consultaron, en qué información se basaron, son interrogantes que delimitan los alcances de una regulación

adoptada internacionalmente y las modificaciones que podría ocasionar su aplicación futura.

En términos del seguimiento, uno de los aspectos más complejos de abordar son los foros técnicos internacionales más restringidos para Chile (como la OECD, la Unión Europea, etc.), así como las restricciones ambientales exigibles a nivel de ciertos países, que podrían tener significativo impacto en las exportaciones chilenas hacia esos mercados.

En este contexto, la Comisión Chilena del Cobre se complace en presentar este libro, que entrega una mirada general a los aspectos científicos y técnicos más relevantes de la discusión regulatoria sobre los metales, en general, y el cobre, en particular. Nos parece que su autor, el Dr. Juan Carlos Torres, ha logrado sintetizar con singular maestría todos estos aspectos de manera accesible para el lector no especializado. Confiamos que la publicación de este libro, y su posterior difusión, permitan llenar un vacío existente, incluso entre quienes hemos participado, directa o indirectamente, en la defensa del cobre en diversos foros y, con mayor razón, de todos quienes desconocen la magnitud y naturaleza de los desafíos que enfrenta nuestra principal riqueza minera.



PATRICIO CARTAGENA DÍAZ

Vicepresidente Ejecutivo, Comisión Chilena del Cobre

Presidente de la Comisión Técnica Asesora para apoyar al Presidente de la República en las negociaciones con la Organización Mundial de la Salud (OMS) para revisar la Guía sobre la Calidad del Agua Potable

Santiago, Noviembre 2002

El propósito de este libro es exponer, usando un lenguaje no técnico, una serie de conceptos relacionados con la condición natural y efecto ambiental de los metales en general, y el cobre en particular, y mostrar cómo éstos se relacionan con el desarrollo de normativas cuyo fin es proteger el medio ambiente y la salud humana. Para la mayoría de las personas, no es evidente que éste sea un tema que revista particular interés en la agenda nacional. Sin embargo, como se espera mostrar en lo que sigue, el escenario actual de regulaciones ambientales en países desarrollados no es muy propicio para los metales, y se puede constituir en una barrera comercial importante en el futuro. Demás está decir que esto debe interesar al primer país productor de cobre del mundo.

La mayoría de las personas enfrentadas, por primera vez a este tema, reaccionan refiriéndose a los impactos de la minería sobre el medio ambiente y la salud humana. Si bien ésta es, sin duda, un área legítima de preocupación para países mineros, este libro no se refiere al tema de las regulaciones de emisiones de procesos mineros, sino a aquéllas que se aplican al cobre como producto, y a todos sus usos, aplicaciones y eventuales destinos tras su vida útil.

Esto abarca una multiplicidad de escenarios, desde los esquemas de clasificación de peligrosidad de productos, hasta las regulaciones del manejo y reciclaje de residuos metálicos, pasando por el impacto de cañerías y techos de cobre sobre la calidad de las aguas naturales. Es en esta área donde el cobre enfrenta las amenazas más directas y complejas, pues se trata de regulaciones cuyo desarrollo implica necesariamente definir escenarios especulativos y muy discutibles.

Si bien no es difícil llegar a acuerdo con respecto al efecto nocivo para la salud humana de emisiones masivas de anhídrido sulfúrico o arsénico, hacer lo mismo para el caso de milésimas, o millonésimas de gramos de cobre que pasan de la cañería de agua potable al alcantarillado, y de allí a los ríos o, vía lodos de plantas de tratamiento, a los suelos agrícolas, y estimar qué efecto tiene ese cobre sobre invertebrados acuáticos o gusanos de tierra, conlleva una infinidad de incertidumbres y desconocimientos. Son estos desconocimientos los que, en parte, han contribuido a ese escenario regulatorio preocupante al que nos referimos.



En la generación de este escenario se confabulan una serie de elementos disímiles. Sin duda, es importante el papel preeminente que ha llegado a jugar el tema "medio ambiente" en la imagería global en las últimas décadas. Tanto los medios de comunicación, como la opinión pública en general, prestan a los incidentes medioambientales un grado de atención, y a menudo de pasión, que tensiona fuertemente el proceso político de toma de decisiones en el área. Desafortunadamente, esta mayor atención no ha ido acompañada de un mayor grado de ilustración de los participantes en los aspectos científicos y técnicos involucrados. Para complicar más el tema, tales incidentes suelen configurar situaciones complejas, desde el punto de vista técnico y científico, para las que no hay necesariamente una respuesta única e irrefutable.

También está presente la imagen de las grandes corporaciones multinacionales de la gran minería, que grupos anti-mineros asocian exclusivamente a un historial de abusos sociales y políticos, rapiña paisajística, irresponsabilidad medioambiental...etc., desatendiendo la evidente contribución de la minería al desarrollo humano, a nivel local y global, así como las cualidades ambientalmente positivas del metal (alto grado de reciclabilidad y eficiencia energética). El uso del metal es asociado a la necesidad de extraerlo, o sea a esa minería "maligna". Por lo tanto, una manera de terminar con la gran minería es reducir o, en lo posible, eliminar el uso de los metales, promoviendo opciones supuestamente más ambientalmente "amables".

Por otro lado, está el tema de la competencia entre materiales alternativos. En algunos sectores productivos, es frecuente destacar el producto propio sobre la base de mostrar las desventajas del competidor. Claramente es una estrategia riesgosa, que induce al competidor a investigar y mostrar a su vez las desventajas del oponente. Mientras esto ocurra en relación a cualidades inocuas, por ejemplo "X limpia más blanco que Z", o "X comunica mejor que Z", se trata de competencia legítima y, posiblemente, saludable. Sin embargo, si un fabricante acusa a un producto competidor de dañar la salud humana o el ecosistema, entramos en un terreno pantanoso. Si hay pruebas contundentes de que sea así, se trata de una denuncia seria que debe seguir los cursos administrativos y judiciales que se dan los Estados.

En cambio, si se trata sólo de presunciones basadas en interpretaciones específicas de datos incompletos, entonces se abre el camino a enfrentamientos litigiosos o una abierta guerra comercial de acusaciones de similar peso.

El caso del CPVC, un plástico competidor del cobre en el mercado de las cañerías, ocurrido en California, y que se describe más adelante, demuestra que hay sectores productivos que están dispuestos a desprestigiar al cobre, sobre bases muy débiles, con el fin de ingresar a un mercado. Dentro de la industria del cobre, no faltaron quienes abocaron entonces por embarcarse en un programa de investigación sobre la posible liberación de sustancias cancerígenas desde las cañerías de plástico. Esto seguramente habría desembocado en una sangría de recursos para ambas industrias y sólo habría generado argumentos útiles para aquéllos que se oponen al crecimiento de ambas.

Estas y muchas otras son las variables a considerar en este escenario regulatorio que enfrentan los metales. Chile, a través de sus autoridades, y muchas empresas cupreras, han tomado conciencia de esta situación, participando activamente en los diversos foros en que se desarrollan temas regulatorios relacionados con metales. Sin embargo, con frecuencia los esfuerzos de defensa del cobre se tropiezan con brechas de conocimiento respecto al comportamiento del metal en el medio ambiente y su efecto sobre organismos silvestres y el ser humano. Tanto para Chile como para la industria internacional del cobre, es esencial ayudar a cerrar esas brechas, a través de investigación científica de calidad, así como asegurar que el conocimiento actualizado llegue a quiénes toman las decisiones regulatorias ambientales que hoy amenazan a nuestro primer producto.

## PARTE I BREVE HISTORIA NATURAL DEL COBRE

### El Cobre, un Elemento Natural

En realidad es casi redundante decir que un elemento químico es natural. Todo elemento químico, con excepción de los trans-uránicos, es por definición natural. Al examinar la Tabla Periódica de los Elementos estamos viendo de qué está compuesto el universo. Allí están las unidades básicas que componen toda la materia que existe, incluida la de aquellos objetos que reconocemos más fácilmente como naturales: rocas, agua, plantas, etc. Es una extraña peculiaridad de nuestra época que nos resulte difícil aceptar que el plomo o el uranio son tan naturales como un árbol o un pez. Esto se debe, en parte, a que asociamos los elementos químicos con el uso que les ha dado el hombre más que con su origen, pero también tiene un componente que proviene de las cualidades de "pureza" e "inocencia" que frecuentemente adjudicamos a la vida silvestre en la segunda mitad del Siglo XX.

Es importante distinguir entre elemento y compuesto químico. Si bien todos los elementos son, por definición, naturales, no ocurre lo mismo con los compuestos, que son combinaciones de elementos que tienen propiedades químicas características. Por ejemplo, el agua ( $H_2O$ ) es un compuesto natural consistente en dos átomos de hidrógeno asociados a uno de oxígeno. El DDT, en cambio, es un compuesto artificial en que se combinan varios elementos (carbono, oxígeno, cloro) para lograr un efecto bien específico (matar larvas de mosquitos). Los compuestos químicos, entonces, pueden ser naturales o sintéticos, pero siempre son combinaciones de elementos químicos.

Otra peculiaridad de nuestra época es la tendencia a adjudicar connotaciones benéficas a lo natural y maléficas a lo artificial o sintetizado por el hombre. Tan dominante es este mito que los publicistas lo explotan con insistencia, colocando el adjetivo de "natural" a todo producto que lo tolere, y cuando esto no es posible recurriendo a burdas asociaciones: "sabor natural", "ingredientes naturales", etc. Tales asociaciones no tienen ningún fundamento en la realidad. Tanto los venenos más poderosos como los antibióticos y medicamentos más efectivos pueden ser de origen natural o artificial. Sapos y hongos silvestres son fuentes de las toxinas más mortales para el ser humano y algunos vegetales muy exitosos entre los naturistas y vegetarianos (el



broccoli, por ejemplo) contienen dosis elevadas de compuestos que administrados en forma pura son potentes cancerígenos. La naturaleza no es benéfica o maléfica; más bien, el ser humano se ha adaptado a ella en la medida de lo posible. Por otra parte, la mayoría de los compuestos sintéticos no fueron diseñados para causarle daño al ser humano o medio ambiente, y si a veces lo hacen es debido a un efecto secundario no deseado.

Por ello, al calificar al cobre como un elemento natural no estamos diciendo más que esto: es uno de los bloques básicos que constituyen el mundo, tal cual lo conocemos. Ubicado en la Tabla Periódica, en el grupo de elementos que hemos denominado metales<sup>1</sup>, se encuentra presente en todos los medios del planeta y el universo, incluidos los seres vivos. Además, es importante recordar que los elementos naturales están aquí para quedarse. A diferencia de los compuestos, naturales o sintéticos, no pueden ser eliminados por degradación o tratamiento químico o físico, y por lo tanto el ser humano difícilmente puede controlar su concentración promedio en el planeta. Aunque esta afirmación parezca muy evidente, no han faltado quienes, al calor del debate, han propuesto la eliminación de los metales de la faz de la tierra. En realidad, de no mediar catástrofes planetarias o minería extraterrestre, la cantidad de cobre del planeta se mantendrá constante para siempre, siendo lo mismo aplicable al hierro, mercurio, plomo, zinc, etc. Esto ciertamente no implica que no debamos preocuparnos de cómo y en qué forma se distribuyen y se acumulan en los distintos medios del planeta (agua, suelo, rocas, etc).

## Abundancia Natural y Flujos

Si se ordenan los elementos naturales, desde el más abundante al más escaso en la corteza terrestre, el cobre ocupa el lugar 28. Su abundancia promedio es de 50 mg/kg; es decir en un millón de unidades de peso de la corteza hay 50 partes de cobre (a esto llamamos 50 partes por millón, abreviado como ppm). Si se considera que hay 92 elementos naturales, el cobre está entonces entre el 30% de los más abundantes. Pero el promedio no refleja la gran variabilidad de su distribución. Por ejemplo, en el mar puede encontrarse en concentraciones de 1 parte por billón (0,0000001%) mientras que en un depósito rico

<sup>1</sup> Metal: elemento caracterizado por alta conductividad térmica y eléctrica como también maleabilidad, ductilidad y alta reflectividad de la luz.

en mineral se lo encuentra a niveles millones de veces más altos (1%).

El hombre descubrió las propiedades del cobre como metal muy temprano en su historia. Hay evidencias de su uso que se remontan a alrededor de 6000 años A.C., y las primeras técnicas metalúrgicas a 3500 A.C. En esa época, nuestros antepasados inventaron las tecnologías para concentrar el cobre a partir de minerales, fundirlo y moldearlo para darle formas útiles. Desde la Edad del Bronce hasta antes de la Revolución Industrial, la producción de cobre aumentó gradualmente hasta alrededor de 100 mil toneladas por año. En el siglo XIX, la producción aumentó explosivamente hasta superar los 10 millones de toneladas a fines del siglo XX. La historia de la explotación y beneficio del cobre puede sintetizarse en el esfuerzo continuo por lograr un producto final que sea cobre en su forma más pura posible. La tecnología actual ha logrado un máximo de 99,9999% (Cátodo Grado A, Codelco Chile). Sin embargo, en muchos usos, el cobre se usa no en forma pura sino como parte de aleaciones.

Con la metalurgia nacieron las "fuentes antropogénicas" de cobre, es decir el hombre dio lugar a flujos de cantidades y formas de cobre que no existían en la naturaleza. Tanto los procesos productivos como el uso y eventual eliminación de los productos finales de cobre, constituyen modificaciones de cuánto metal y en qué forma se moviliza entre las distintas partes del medio ambiente. Por ejemplo, encontrar cobre en forma metálica (una estructura ordenada compuesta primordialmente de átomos de cobre) es muy difícil, ya que es naturalmente infrecuente y se encuentra en depósitos al interior de formaciones rocosas. Sin embargo, miles de años de metalurgia y usos tecnológicos y domésticos del metal, han implicado la confección, desgaste y eliminación de miles de toneladas de artefactos de cobre metálico. Aunque el cobre tiene un alto grado de reciclabilidad, una parte de ese cobre metálico ha pasado a medios naturales en los que antes no se encontraba.

**Tabla 1**  
Flujos anuales  
estimados de cobre  
a la atmósfera y  
océanos

Fuentes	Flujo (miles de toneladas por año)*	
	Atmósfera	Océanos
Naturales	28	1240
Antropogénicas	35	310

• Ambas estimaciones corresponden a inicios de la década de los años 80.

Se han hecho estimaciones de los flujos naturales y antropogénicos de cobre a la atmósfera y los océanos, los que se muestran en la Tabla 1. Las fuentes naturales más importantes son: volcanes, material particulado en suspensión, aerosol marino, incendios forestales. Las fuentes antropogénicas principales son: fundiciones y refinerías, operaciones mineras y plantas concentradoras, plantas de generación de energía e incineración de residuos.

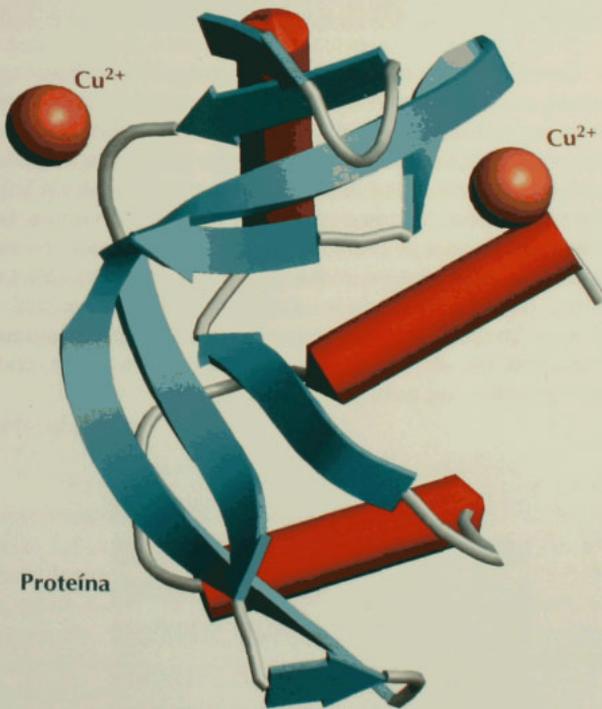
## El Cobre, un Elemento Esencial

Un elemento químico es esencial cuando es requerido por los seres vivos. Este requerimiento indica que el elemento participa en las reacciones químicas que hacen posible la vida y, por lo tanto, que es parte constituyente de un ser vivo funcional.

La esencialidad de algunos elementos es más evidente que la de otros. Por ejemplo, la composición química promedio de un ser vivo revela que estamos constituidos en un 63% de oxígeno y un 9,5 % de carbono, en promedio. En cuanto a metales, sólo un 0,006% y un 0,001% de nuestros tejidos corresponden a hierro y cobre, respectivamente. Estas relaciones cuantitativas también se reflejan en la cantidad de cada elemento que el ser vivo necesita asimilar a diario para funcionar apropiadamente. Un adulto promedio necesita consumir entre 1 a 2 kilogramos de agua, 0,015 gramos de hierro y 3,5 miligramos de cobre por día. Cualitativamente, sin embargo, todos los elementos esenciales son igualmente esenciales. Su ausencia en la dieta produce enfermedad y muerte.

¿Qué funciones desempeña el cobre en la biología de un ser vivo? En general el cobre, como otros metales esenciales,

actúa en las células en íntima asociación con enzimas. Recordemos que las enzimas son proteínas cuya función es acelerar la velocidad de las reacciones químicas que ocurren en la célula. El metal, gracias a sus singulares propiedades eléctricas, hace posible un paso esencial de la reacción, generalmente la transferencia de un electrón entre dos moléculas. Muchas reacciones químicas que ocurren en la célula involucran la transferencia de un electrón entre dos compuestos. El metal participa de esta reacción formando parte de la enzima funcional. La Figura 1 muestra la estructura de una RNAsa (enzima que degrada ácido ribonucleico, ARN) con dos átomos de cobre asociados. Las enzimas que requieren un metal para su función, se denominan metaloenzimas.



**Figura 1**  
Representación gráfica de una RNAsa dependiente de Cu. Los cilindros y cintas representan distintos motivos estructurales de la cadena de aminoácidos. Las RNAsas son enzimas que actúan sobre el Ácido Ribonucleico, parte del sistema celular por el cual se expresa la información contenida en el DNA.

La Tabla 2 muestra cuatro de las más de 25 funciones biológicas en que se ha determinado la participación del cobre, en especies que van desde las bacterias a los mamíferos, junto al nombre de la enzima respectiva. Como se puede apreciar, la falta de cobre puede tener efectos múltiples sobre la salud de un individuo.

**Tabla 2**  
Algunas  
cuproenzimas  
y sus funciones en  
el cuerpo humano

Enzima	Función
Aminoácido oxidasa	Metabolismo de aminoácidos
Ceramida galactosil transferasa	Síntesis de mielina (envoltorio de axones de neuronas)
Lisil oxidasa	Síntesis de colágeno y elastina
Dopamina-B-hidroxilasa	Síntesis de norepinefrina

Como el cobre está presente en todo tipo de tejidos de seres vivos, es fácil entender que los seres humanos necesitamos ingerir nuestra dosis diaria de cobre primordialmente de los alimentos, que son generalmente otros seres vivos. El agua puede ser, en algunos casos, una fuente secundaria del metal. La Tabla 3 muestra contenidos típicos de cobre de algunos alimentos. Las legumbres, el hígado, el chocolate y las ostras tienen niveles particularmente elevados de cobre. Al considerar estas cifras es importante recordar que, dependiendo de una diversidad de condiciones (preparación del alimento, en qué combinación y forma se consume, etc.), sólo una fracción de este cobre, como de otros nutrientes, es asimilada por el cuerpo.

**Tabla 3**  
Algunos alimentos  
y su contenido  
promedio de cobre.

Alimento	Contenido de Cu (mg/kg)*
Carne de vacuno	1
Hígado	39
Manzanas	0,25
Atún	0,64
Ostras	15
Cocoa en polvo	6
Porotos	30

\*mg= miligramo o milésimas de gramo; se expresa en peso húmedo, es decir tal como se suelen consumir, excepto la cocoa en polvo.

Otros animales también reciben su dosis de cobre gracias al contenido de cobre de sus presas o los vegetales que forman su dieta. Las plantas, por su parte, asimilan el metal contenido en el agua de los suelos por absorción activa a través de las raíces. Animales más simples de vida acuática pueden absorber el cobre y otros metales directamente desde el agua que los rodea. Como veremos más adelante, esto tiene importantes consecuencias para los efectos negativos del exceso de metal, pues estos animales son los más vulnerables a la exposición ambiental a metales.

El hecho que el cobre sea un elemento esencial tiene una consecuencia importante de considerar por parte de las personas que "regulan" (o norman) la cantidad de cobre que debe contener el agua. Por ser un elemento que es parte de los seres vivos y participar en las funciones que les permiten estar vivos, el cobre está sometido a los mecanismos biológicos de regulación que son característicos de todo ser vivo. Es decir, el ser vivo es capaz de regular el ingreso y la salida del cobre hacia y desde su medio interno para mantener su concentración en ese medio interno dentro de un rango apropiado. De hecho existen proteínas cuya única función es capturar átomos de cobre y movilizarlos entre tejidos y órganos dependiendo del balance metabólico. Todo mecanismo regulatorio, sin embargo, tiene límites de tolerancia y puede ser incapaz de restablecer ese balance cuando el nivel del metal es demasiado bajo o muy elevado, gatillándose enfermedad o toxicidad.

## Deficiencia de Cobre

La falta de cualquier nutriente puede provocar enfermedad y, eventualmente, la muerte. En el caso del cobre, su falta resultará en un funcionamiento insuficiente o inadecuado de las enzimas que lo requieren. Aunque infrecuente en adultos, se han observado casos de deficiencia de cobre en niños y lactantes, generalmente asociados a bajo peso corporal y desnutrición general. Los síntomas incluyen anomalías óseas, defensas debilitadas y problemas de desarrollo del sistema nervioso.

La deficiencia de cobre puede deberse a varias causas,

por ejemplo, que se ingiere demasiado poco cobre en la dieta o que el que está presente no se asimila bien. Esto se ha observado preferentemente en niños que tienen un requerimiento aumentado de cobre, como son los prematuros muy pequeños o los niños desnutridos que se están recuperando de su desnutrición; en ambos casos los requerimientos son muy altos y la posibilidad de no comer suficiente cantidad de cobre aumenta. En estos casos se produce anemia, que no responde al tratamiento con hierro, que es el tratamiento habitual de la anemia. También se puede producir alteraciones a los huesos, y en los casos de deficiencia grave el pelo pierde su coloración, se altera el crecimiento, y aumentan las infecciones porque se deterioran las defensas del organismo.

La Organización Mundial de la Salud establece para todos los nutrientes un Rango Aceptable de Ingesta Oral (más conocido como AROI) que define la cantidad mínima y máxima del nutriente que las personas deben ingerir, por vía oral, para asegurar un buen estado de salud. La cantidad mínima del AROI para cobre es 0,05 miligramos por kilogramo de peso corporal al día (o sea, para un adulto de 70 kg, esto corresponde a 3,5 miligramos de cobre por día). Bajo ese límite, existe el riesgo de deficiencia nutricional.

En una evaluación global del cobre respecto a la salud humana y el medio ambiente, realizada en 1998, la Organización Mundial de la Salud encontró que, en países desarrollados, la ingesta oral promedio de cobre fluctúa entre 0,9 y 2,2 mg de cobre por día, dependiendo de la composición de la dieta y de las prácticas de procesamiento del alimento, entre otros factores. De allí que este estudio concluyó lo siguiente:

“A partir de los datos sobre exposición humana en todo el mundo, pero especialmente en Europa y América, hay un riesgo mayor de efectos de salud debido a deficiencia de ingesta de cobre que debido a exceso de ingesta de cobre”.

Esta conclusión encierra un importante mensaje para quienes suponen que los problemas de los metales para la salud humana están siempre asociados a exceso de exposición y no a falta de ellos.

## Cobre y Enfermedades Genéticas

El metabolismo del cobre por parte de un ser vivo requiere de una maquinaria molecular y celular que lo absorba, lo transporte a los distintos tejidos y lo elimine de acuerdo al balance metabólico existente en un momento dado. Existen, por lo tanto, proteínas dedicadas fundamentalmente a cumplir estas funciones, así como órganos que almacenan y distribuyen el cobre (por ejemplo, el hígado.) Una falla en el funcionamiento de esas proteínas puede conducir, en ciertas condiciones ambientales, a un desequilibrio metabólico generalizado del elemento, lo que mantenido en el tiempo puede configurar una enfermedad. Existen varias enfermedades genéticas asociadas al metabolismo del cobre y a continuación revisaremos las más importantes.

La Enfermedad de Menkes es un desorden de origen genético (asociado al cromosoma X): una mutación que lleva a la producción de una forma no funcional de la principal proteína encargada de la absorción del cobre en el intestino y su entrega hacia el interior del organismo. La consecuencia es que el cobre absorbido por la pared intestinal no llega a los tejidos que lo requieren, produciéndose un cuadro extremo de deficiencia de cobre. La condición se caracteriza por anomalías del esqueleto, retardo mental y muerte en etapas tempranas de la infancia. Los síntomas se correlacionan claramente con las funciones de las diversas enzimas que usan cobre como parte de su estructura molecular. Por ejemplo, debido a la deficiencia en la función de la lisil oxidasa (ver Tabla 2) que cataliza la estructuración del colágeno, se presentan lesiones del tejido conectivo. En la mayoría de los casos, la enfermedad es letal y no existe terapia para revertirla. Su incidencia es de 1 en 200 mil nacimientos.

La Enfermedad de Wilson también resulta de una mutación genética que produce una proteína no funcional, pero en este caso la proteína está involucrada en la eliminación de cobre desde el hígado a la bilis. La falla de la proteína provoca una acumulación excesiva de cobre en el hígado y, en algunos casos, en el cerebro. A menudo los síntomas son similares a los de la cirrosis hepática, se expresan algo más tarde que los de la Enfermedad de Menkes, y en la mayoría de los casos pueden ser revertidos con terapias que involucran eliminar el exceso de cobre. Su incidencia es de

1 en 30 mil nacimientos, pero su severidad es muy variable ya que existen numerosas mutaciones con diverso grado de impacto funcional.

Una enfermedad ecogenética es aquella que se da cuando existe simultáneamente una condición genética específica y una condición ambiental dada. La Cirrosis Infantil de la India (ICC) es un cuadro que es un buen ejemplo de la interacción entre genes y ambiente, y fue una causa importante de mortalidad infantil en ese país hace unos años. Se caracteriza por la acumulación de altos niveles de cobre en el hígado, lo que provoca daño hepático y todas sus consecuencias. Se encontró que la enfermedad era más frecuente en zonas rurales donde se daban dos condiciones. Primero, altos niveles de consanguinidad debido a las restricciones de casta para los matrimonios. Recordemos que la alta consanguinidad entre los padres favorece la homocigosis en los hijos, es decir aquella condición en que el hijo recibe de ambos padres la misma versión de un gen. Hay muchas mutaciones cuyo efecto sólo se expresa en homocigosis. Segundo, el uso tradicional de recipientes de latón (aleación de cobre y zinc) para calentar o hervir y guardar la leche que se daba a los lactantes. La enfermedad prácticamente desapareció cuando se eliminó la práctica de usar recipientes de cobre o latón. Además, la mayor apertura social en la sociedad india actual ha contribuido a reducir la frecuencia de homocigotos.

La toxicosis idiopática de cobre (ICT) es una enfermedad muy similar a la ICC, pero se ha encontrado asociada a zonas rurales de Alemania, también en grupos de familias que habitan lugares aislados, con alto grado de consanguinidad y correlacionada con el uso de fórmulas de leches en polvos preparadas con agua de pozos. El agua de la zona, que es transportada por cañerías de cobre, demostró ser particularmente agresiva para superficies metálicas, lo que significa que es capaz de arrastrar, desde éstas, cantidades importantes de cobre.

Estas enfermedades definen poblaciones de individuos que son más vulnerables a exposición a cobre que la mayoría de las personas. Desde un punto de vista regulatorio, representan la población de más alto riesgo que uno puede considerar al normar, por ejemplo, las concentraciones permitidas de cobre en el agua potable. Sin embargo, la protección de los individuos

vulnerables, a propósito de mutaciones como las mencionadas, depende de una estructura de salud que los diagnostique precozmente y les provea de tratamiento y no de las regulaciones destinadas a la población general sana. Normalmente, sin embargo, es muy raro que personas se expongan a concentraciones de cobre en agua (o leche) del orden de los casos citados. Por ejemplo, el contenido de cobre del agua potable en Chile fluctúa entre 0,01 y 1 miligramo por litro, mientras que en los casos de las familias con ICT en Alemania se encontraron contenidos de cobre de hasta 15 miligramos por litro.

Actualmente, se están haciendo importantes progresos en la identificación y clonación de los genes afectados en estas enfermedades, todos los cuales codifican proteínas de la membrana celular que participan en el transporte de cobre desde y hacia la célula o el espacio extracelular. Algunos de los equipos de investigación más destacados en este esfuerzo reciben financiamiento de entidades internacionales que agrupan a la industria del cobre, como la International Copper Association. La razón para esto es muy simple. Es el interés de la industria conocer mejor la biología del cobre al nivel celular y genético, un conocimiento que podría incluso llevar a la eliminación de estas enfermedades en el futuro. Es ilustrativo señalar que muchas de estas enfermedades, antes que se conociera que eran de origen genético, fueron usadas como argumentos para fundamentar ataques contra el cobre y exigir ya sea su eliminación o estrictas medidas regulatorias. Es decir, algo similar a promover la prohibición del azúcar para proteger a las personas diabéticas.

### ¿Por qué estoy siempre tan cansada?

Un libro aparecido en 1999 en EEUU intenta abrir un nuevo flanco de cuestionamiento al cobre, esta vez desde el punto de vista nutricional. Se trata de la obra "¿Por qué estoy siempre tan cansada?", de Ann Louise Gittleman, que lleva el sintético subtítulo siguiente: "Descubra cómo corregir su desequilibrio de cobre, puede..

- impedir que su cuerpo ceda antes que su mente
- liberarla de esos bajones de mediodía
- darle esa salida energética que ha estado buscando".

Los comentarios "críticos" que vienen en la cubierta del libro son aplastantes:

"...El problema de la sobrecarga de cobre tiene proporciones epidémicas..".

"El innovador libro de Louise Gittleman sobre toxicidad del cobre es una bendición..".

"El libro de Gittleman es... el primero en tratar el problema del exceso de cobre en la población americana...".

Según la autora, en una importante fracción de sus pacientes, mayoritariamente mujeres, que se quejaban de dificultad para salir de la cama, bajones al mediodía, cambios súbitos de ánimo, insomnio y ansiedad, el problema se presentaba asociado a un exceso de cobre, fácilmente detectable por un análisis químico de cabello. Este exceso de cobre alteraría el balance apropiado entre cobre y zinc que debe existir en el cuerpo, lo que puede ocurrir ya sea por ingestión de más cobre o ingestión de menos zinc. Por ejemplo, según el libro, las dietas vegetarianas o bajas en grasas pueden aumentar la sensibilidad, así como las actividades menos "saludables" como la ingesta de alcohol y café o la tensión nerviosa permanente, que tienden a agotar el zinc disponible para las funciones fisiológicas del cuerpo. Por último, las mujeres también estarían expuestas a agua potable sobrecargada de cobre, así como al cobre de dispositivos intrauterinos.

Para poner en perspectiva el libro, hay que tener en cuenta que en EEUU se publican toneladas de libros con fórmulas mágicas nutricionales para resolver los problemas de salud más frecuentes del hombre y la mujer modernos, particularmente la fatiga, la depresión y la angustia. Dado el enorme mercado que existe para este tipo de literatura pseudocientífica, no se requiere ningún fundamento científico para vender unos cuantos miles de ejemplares y aparecer en una de la miríada de revistas populares, especialmente las dirigidas a la mujer.

Nunca tampoco faltarán colegas dispuestos a aclamar el libro (hoy por ti, mañana por mi), especialmente si están conectados a la floreciente industria del análisis de cabellos como herramienta de diagnóstico nutricional. De hecho, las "referencias bibliográficas"

de la obra son, mayoritariamente, avisos publicitarios de una compañía que realiza análisis químicos de cabellos.

Las teorías pseudocientíficas están a menudo basadas en una falla conceptual muy frecuente y bien reconocida por los estadísticos serios: el olvidar que "correlación no es causalidad". Si yo tomo una población de personas y les mido o evalúo un centenar de parámetros, desde su estado de ánimo hasta el largo del dedo gordo del pie derecho, bastará aplicar cualquier programa computacional estadístico, para encontrar numerosas correlaciones entre muchos de esos parámetros. En manos de alguien sin criterio o malintencionado, este conjunto de correlaciones es un verdadero tesoro de teorías descabelladas, particularmente cuando se aplican a fenómenos de esferas muy diferentes del quehacer humano. De allí provienen esas noticias que, en ocasiones, encontramos en la prensa informando que las personas con dedos más largos tienden a tener más hijos, o que los consumidores de café con leche son más propensos a cometer suicidio.

Para hablar de "proporciones epidémicas" se requiere realizar un tipo de estudio poblacional que es complejo y caro, y que involucra evaluar apropiadamente poblaciones control, es decir ¿cómo es el desbalance cobre/zinc en grupos que no tienen los síntomas descritos? Esto para no entrar en la compleja discusión de cómo se define un desbalance de micronutrientes si resulta que los niveles considerados "normales" de los mismos son aún tema de discusión entre expertos.

Con excepción de algunas enfermedades genéticas muy raras y bien caracterizadas, los problemas de salud por deficiencias y excesos de cobre son escasísimos, y mucho mejor documentados los primeros que los últimos.

Desgraciadamente, los argumentos científicos no tienen gran peso en estas situaciones, particularmente después de los hechos. Cualquiera sea el impacto que se buscaba, ya se logró, y sólo queda esperar que esta moda nutricional pase con tan poca gloria como millones de otras que la han precedido.

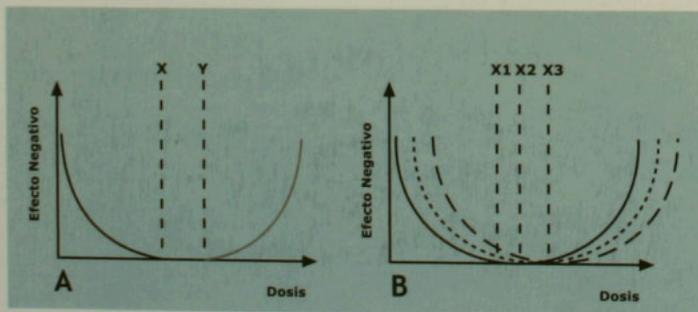
## Cobre y Toxicidad

La toxicidad es la propiedad de una sustancia de causar efectos nocivos a un ser vivo que se expone a ella por sobre ciertos niveles. En lo que sigue revisaremos, en forma un poco más extensa, este criterio de riesgo o peligrosidad, por su enorme importancia en el desarrollo de regulaciones.

Toda sustancia administrada por sobre un nivel dado puede resultar tóxica. Este es un conocimiento muy antiguo en la cultura humana y fue resumido elegantemente por Paracelsus, médico del Siglo XVI, en su citada sentencia: "La dosis hace al veneno". Hay muchas maneras de ilustrar este principio. Por ejemplo, para todos es evidente que un exceso de agua, como el que ocurre en una muerte por inmersión, puede ser letal. Pero a nadie se le ocurriría afirmar que el agua es tóxica. Tampoco pensamos en el oxígeno como una toxina, y sin embargo se dan casos de muerte de pacientes en cámaras hiperbáricas por exposición a niveles muy elevados de oxígeno. En general, guardamos el calificativo de tóxicas para aquellas sustancias que afectan al ser humano, incluso en cantidades relativamente pequeñas. Si bien es una opción práctica, no hay que olvidar que lo de "cantidades relativamente pequeñas" es una definición relativa.

Como lo demuestra el caso del agua y el oxígeno, un elemento necesario para la vida puede ser tóxico a otros niveles. Para estos elementos, incluidos los metales esenciales, se da una situación que podemos caracterizar en tres fases, ilustradas en la Figura 2.

**Figura 2**  
Representación genérica de relación entre la dosis de una sustancia y la magnitud del efecto negativo que ésta produce en el ser humano u otro ser vivo



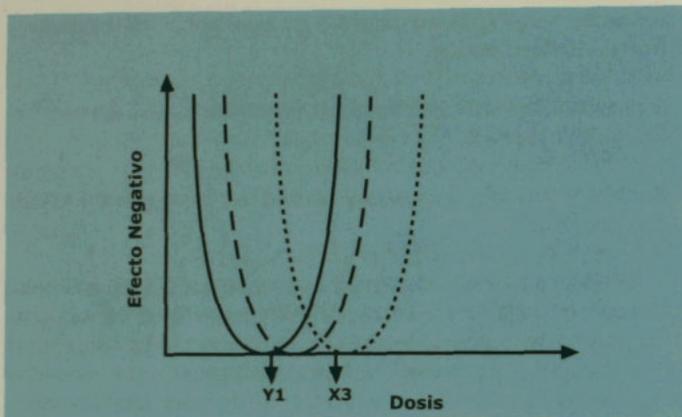
- A niveles muy bajos, su carencia genera efectos negativos (rango de deficiencia)
- A niveles intermedios, satisface los requerimientos del ser vivo (rango aceptable)
- A niveles muy altos, su exceso genera efectos negativos (rango de toxicidad)

Esto a menudo se ilustra usando el gráfico de la Figura 2A. Los puntos X e Y que separan estos rangos tienen gran importancia desde el punto de vista normativo. Por ejemplo, la Dosis X representa la dosis mínima para que no haya efectos negativos por deficiencia. Uno podría definir esta dosis como la ingesta mínima recomendable en una directriz nutricional. O la dosis Y como el límite máximo tolerado del elemento en la dieta o el agua de bebida.

El problema se complica, sin embargo, cuando consideramos la variabilidad natural que existe entre individuos, encontrándose una situación como la ilustrada en el gráfico de la Figura 2B. Aquí los distintos individuos tienen, por razones genéticas, históricas o de salud, sus rangos aceptables desplazados con relación a otros individuos. La Dosis Mínima X3 es mayor que la Dosis Mínima X1, y lo mismo ocurrirá para las respectivas Dosis Máximas Yi. ¿Qué hacer en ese caso?

Para sustancias en que la variabilidad de la respuesta biológica es muy grande en relación a la magnitud del rango aceptable, el problema es complicado y no existe una respuesta segura. Puede ocurrir que, sin importar qué límite se adopte, se termine desprotegiendo a una fracción significativa de la población. Esto se ilustra para un caso extremo en la Figura 3, en que la dosis mínima necesaria para el individuo 3 (X3) es mayor que la dosis máxima recomendable para el individuo 1 (Y1). En otras palabras, si la autoridad recomienda una ingesta adecuada para el individuo 3, ésta puede representar un riesgo para el individuo 1. Aunque se trata de una situación hipotética, ilustra bien el tipo de dilemas que deben resolver las autoridades regulatorias al fijar límites permisibles y recomendaciones nutricionales.

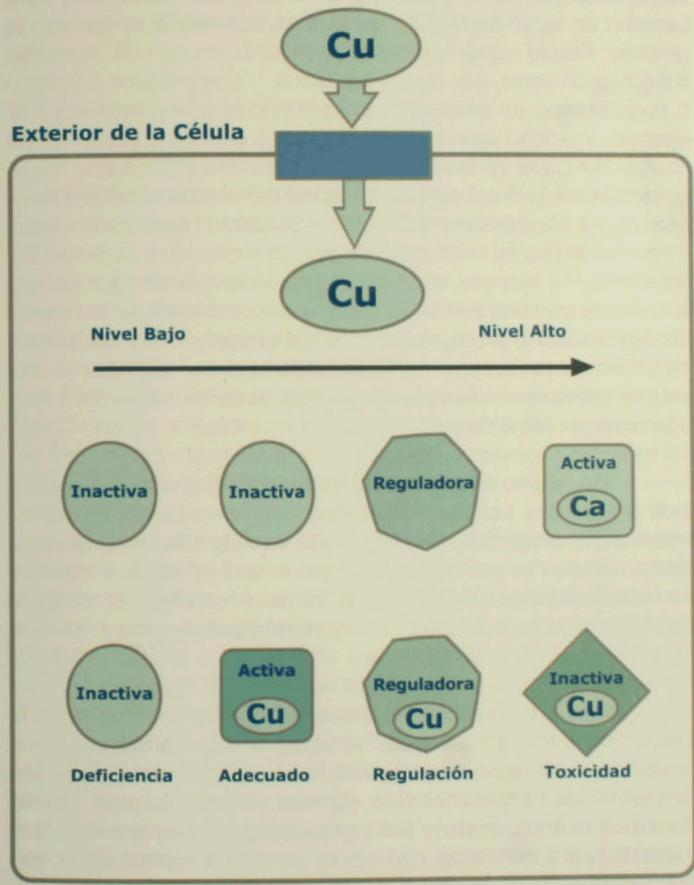
**Figura 3**  
Representación genérica entre la dosis de una sustancia y la magnitud del efecto negativo que ésta produce en el ser humano u otro ser vivo, para dos individuos con rangos de tolerancia diferentes.



En el caso del cobre, sabemos que el límite inferior del rango recomendado de ingesta es 0,05 mg por kg de peso corporal al día, o 3,5 mg por día para un adulto promedio. El límite superior es más difícil de determinar, por razones obvias. Sin embargo, se han hecho experimentos con voluntarios a los que se ha dado a beber agua con cantidades crecientes de sulfato de cobre, y se encuentra que la concentraciones de 4 mg de cobre por litro aumentan significativamente las quejas de efectos agudos, como náuseas o vómitos en las personas estudiadas (ver más adelante). Pero, en este caso, no se trata de una dosis diaria, sino de exposición aguda a una concentración dada.

¿Cómo entender este aspecto dual de elemento esencial y potencial toxina de los metales esenciales como el cobre? La Figura 4 ilustra cómo puede ocurrir esto al interior de una célula. Si se tiene una proteína inactiva que requiere cobre para entrar en actividad, a niveles muy bajos de cobre no podrá hacerlo y se producirá alguna falla metabólica. A niveles adecuados, el cobre se unirá a la proteína y ésta se activará para realizar su función. Si se aumentan los niveles más allá de lo que la célula requiere, pueden entrar en juego los mecanismos regulatorios. Lo que se ilustra en la Figura 4, es una proteína que atrapa el cobre reduciendo así el metal disponible dentro de la célula. Una vez saturados los mecanismos regulatorios, el cobre actúa como toxina: por similitud química puede reemplazar a otro elemento (como el calcio) en una proteína activa destruyendo su función

y provocando una falla metabólica. Esta gama de posibles mecanismos no es exhaustiva y los mecanismos de toxicidad pueden ser muy diferentes.



**Figura 4**  
Una gama posible de efectos de concentraciones variables de Cu al interior de la célula. De izquierda a derecha:

- A bajos niveles, la falta de Cu impide la activación de una proteína vital (deficiencia)
- A niveles adecuados, el Cu se une a la proteína y ésta es funcional (función normal)
- A niveles mayores, una proteína reguladora captura el exceso de metal (respuesta regulatoria)
- A niveles aún mayores, sobrepasada la capacidad regulatoria, el exceso de Cu provoca inactivaciones de proteínas (toxicidad)

## Efectos Agudos y Crónicos

Es momento de hacer una distinción conceptual, que resurgirá varias veces en este libro, entre lo crónico y lo agudo. Efecto crónico se refiere a aquél que requiere un tiempo de estar en contacto con el elemento, toma un tiempo en aparecer y dura también un lapso de tiempo aunque se suprima la causa que lo produjo. Efecto agudo en cambio, se relaciona a una ingestión o exposición corta, que puede ser única, y que produce un efecto a poco tiempo de producido el contacto con el elemento. Por ejemplo, toxicidad aguda es aquélla cuyos efectos aparecen poco tiempo después de la exposición a la toxina (minutos u horas generalmente), mientras que toxicidad crónica es aquélla que se genera por exposición prolongada a la toxina (semanas, meses o años). No hay relación entre lo agudo o crónico y la gravedad del efecto. Por ejemplo, un efecto agudo es la irritación que genera el contacto con una planta urticante, pero también lo es la muerte por exposición a ácido cianhídrico. El cáncer de los fumadores es un efecto crónico, y también lo es el dolor articular en las manos que desarrollan personas que usan teclados en forma intensiva por largo tiempo.

En cuanto a la toxicidad de metales, los efectos agudos más frecuentes son de naturaleza gastrointestinal: náuseas, vómitos o diarrea. Si la dosis ingerida es muy alta, en el caso de varios metales se puede llegar a la muerte. Los efectos crónicos son enfermedades de diverso tipo, como cirrosis hepática o daño neurológico, causados por la exposición prolongada a niveles muy altos de algunos metales.

Por razones éticas evidentes, la toxicología humana puede realizar experimentos en seres humanos sólo en condiciones muy limitadas. Los accidentes industriales y casos de exposición laboral ofrecen escenarios para explorar el efecto de altos niveles de algunos compuestos, pero generalmente hay demasiadas variables no controladas como para permitir sacar conclusiones inequívocas sobre un elemento en particular.

La experimentación toxicológica con animales (generalmente ratas de laboratorio) plantea serios problemas de interpretación y extrapolación a seres humanos, pero generalmente es aceptada como referente regulatorio por las entidades

normativas. Recientemente, sin embargo, en respuesta a las presiones de los movimientos opuestos al uso de animales experimentales, los países desarrollados están instaurando políticas que desincentivan la experimentación con animales y propician el desarrollo de modelos teóricos. Muy posiblemente, esta tendencia aumentará el grado de incertidumbre de las predicciones toxicológicas.

## El Cobre y los Seres Humanos

El cobre también, aunque elemento esencial, puede provocar daño si se lo ingiere por sobre cierto nivel. Sin embargo, se conocen muy pocos casos de intoxicación aguda por exceso de cobre, y la mayoría corresponde a intentos de suicidio por ingestión de sales de cobre (sulfato o cloruro de cobre). La razón para esto es simple. Una solución concentrada de cobre tiene un sabor muy fuerte y desagradable, por lo que resulta difícil ingerirla accidentalmente, a menos que ese sabor esté oculto bajo otro más dominante. Además, como ya señalamos, uno de los efectos inmediatos de la ingestión es el vómito, lo que elimina el elemento. De hecho, las sales de cobre han sido usadas históricamente como emético, es decir para inducir el vómito.

Se ha informado de casos de intoxicación aguda por ingestión de bebidas o agua con niveles altos de cobre. Desgraciadamente, la calidad de los estudios y análisis que se hicieron en esos casos dejan mucho que desear, y no es posible confirmar que el único agente causal fue el nivel relativamente elevado de cobre. Esta es una situación muy frecuente en casos en que se adjudica un efecto nocivo sobre la salud a la exposición a una sustancia en particular. Como normalmente estamos expuestos simultáneamente a un gran número de sustancias, tanto involuntaria como voluntariamente, resulta extraordinariamente difícil pesquisar el nexo causal, si es que hay exclusivamente uno. Por ejemplo, muchos compuestos y microorganismos pueden provocar molestias gastrointestinales, y a menudo nos exponemos a varios de ellos por una misma vía.

Es en Chile donde se ha realizado el estudio epidemiológico<sup>2</sup> más completo sobre los efectos gastrointestinales agudos del cobre en agua de bebida. Realizado por el Instituto

<sup>2</sup> Epidemiología: Estudio de la distribución y los factores determinantes de los estados o eventos de salud en poblaciones específicas y la aplicación de este estudio al control de los problemas de salud.

de Nutrición y Tecnología de los Alimentos (INTA) de la Universidad de Chile, este estudio se llevó a cabo con voluntarios a los que se hizo beber agua con cantidades crecientes de cobre disuelto. Los resultados indicaron que el primer síntoma, la náusea, se observa con una frecuencia significativamente más alta a un nivel de 4 mg/litro de cobre. Sobre la base de este estudio, los investigadores han propuesto que la concentración segura para que no haya efecto<sup>3</sup> es de 2 mg/litro.

Como discutiremos en el capítulo correspondiente, los países y organismos internacionales de salud pública han establecido límites aceptables o concentraciones recomendadas para una diversidad de elementos en el agua de bebida. En el caso del cobre, la normativa nacional es de un máximo de 1 mg por litro, basado en razones estéticas (puede teñir ropa o artefactos sanitarios). La recomendación de la OMS es que no deben superarse los 2 mg por litro, basado en consideraciones de salud (efectos gastrointestinales agudos). Normalmente el agua potable suministrada por un sistema de cañerías de cobre presenta niveles de cobre muy inferiores al nivel máximo. Sin embargo, muy infrecuentemente se han observado casos en que cañerías de cobre entregan aguas con hasta 5-10 mg por litro de cobre. El mecanismo y causas de este fenómeno (conocido como blue water) siguen siendo un misterio técnico y científico. Estos niveles del metal pueden generar molestias gastrointestinales y, en tales casos, deben adoptarse medidas para reducirlos a los límites recomendados.

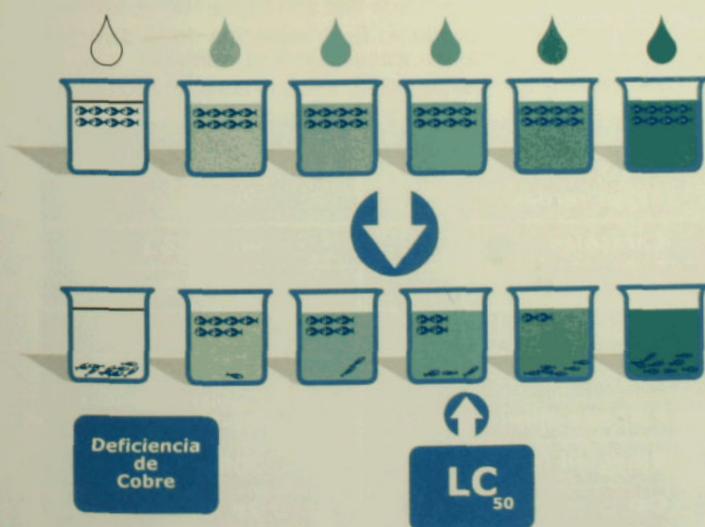
## El Cobre y Otras Especies

Generalmente nos referimos a "ecotoxicidad" cuando hablamos de la toxicidad de una sustancia para plantas o animales silvestres que no sean humanos. La ecotoxicología es un área de investigación virtualmente separada de la toxicología humana. El tipo de profesional, el enfoque metodológico e incluso la mentalidad de los expertos de estas ramas del conocimiento difieren profundamente. Generalmente, los toxicólogos provienen de la medicina o la farmacología, mientras que los ecotoxicólogos surgen de las disciplinas ambientales: ecología, ciencias de la tierra, hidrología, etc.

<sup>3</sup> También conocida como NOAEL: No Observed Adverse Effect Level (Nivel en que no se observan efectos adversos).

Una diferencia fundamental entre estas disciplinas es que el hombre puede someter a otros seres vivos a situaciones experimentales con efectos nocivos y hasta letales, mientras que en seres humanos debe limitarse a observar casos accidentales. Esto ha permitido a los ecotoxicólogos realizar ensayos de toxicidad, estableciendo situaciones controladas de laboratorio en que se varía a voluntad una o más variables, y se mide su efecto sobre la especie seleccionada.

Por razones prácticas, la ecotoxicología usa sólo determinadas especies para sus estudios. Como su ámbito abarca todos los medios del planeta que cobijan la vida, así como la multiplicidad de tipos de animales y plantas que se conocen, idealmente debería contar con ensayos de ecotoxicidad que cubran el mayor espectro posible de combinaciones de medio y tipos de seres vivos: invertebrados de agua y suelo; vertebrados de agua y suelo; algas; plantas terrestres; mamíferos terrestres, etc. Las dificultades prácticas y costos asociados determinan que sólo se recurra a un número reducido de combinaciones. En lo que sigue nos limitaremos a la toxicidad en el medio acuático, por ser el área más desarrollada y de más amplio uso en la formulación de regulaciones que afectan a los metales.



**Figura 5**  
Representación esquemática de un ensayo de toxicidad acuática para determinar la Concentración Letal 50% (LC<sub>50</sub>) de una sustancia sobre peces. En este caso, el efecto medido es la muerte de los especímenes, o al menos su inmovilización.

Una de las herramientas más fundamentales de la ecotoxicología es un parámetro denominado LC50, o Concentración Letal 50%, definida como la concentración de sustancia a la cual muere el 50% de los animales. Este parámetro se mide de la manera ilustrada en la Figura 5. En realidad, la ilustración es engañosamente simplificadora. Debido a la gran variabilidad entre individuos que se encuentra en la naturaleza, la determinación del LC50 por medio de ensayos de toxicidad implica numerosas repeticiones y controles que disminuyan la incertidumbre de la determinación. Aun así, la ecotoxicología es una disciplina en la que los errores estadísticos suelen ser grandes, y por lo tanto la interpretación de resultados requiere de sentido común y sólidos conocimientos de estadística.

La Tabla 4 muestra valores representativos de LC50 para cobre en diferentes especies acuáticas.

Uno de los aspectos que ilustran estos datos es lo amplio del rango de valores de LC50, que van desde 5 microgramos por litro a 10 mil microgramos por litro, abarcando 4 órdenes de magnitud. Incluso, si se considera una sola especie, se pueden encontrar rangos que abarcan 2 órdenes de magnitud (por ejemplo, el pez fathead minnow). Esto implica que, dentro de una misma especie, pueden haber individuos que son hasta 100 veces más tolerantes que otros individuos. Esta variación tiene diversas causas.

**Tabla 4**  
Concentraciones letales 50% de cobre para algunos tipos de organismos acuáticos

<b>Tipo de Organismo</b>	<b>LC50<sup>1</sup></b> (millonésimas de g por litro = ug/L)
<b>Algas verdes</b>	<b>79</b>
<b>Caracoles</b>	<b>900-9300</b>
<b>Gusanos</b>	<b>130-2300</b>
<b>Pulgas de Agua</b>	<b>5-380</b>
<b>Anguila americana</b>	<b>6400</b>
<b>Fathead minnow (pez)</b>	<b>23-1760</b>
<b>Blueguill (pez)</b>	<b>200-10200</b>
<b>Ostiones</b>	<b>29</b>

Primero, como elaboraremos en la sección sobre biodisponibilidad, las condiciones físicas y químicas del agua (acidez, contenido de otros elementos, etc.) en que se realiza la medición de LC50 determinan, en gran medida, el valor de ese parámetro. Los datos presentados en la Tabla 4 provienen de un exhaustivo catastro realizado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, usando información proveniente de diversos laboratorios, en que los ensayos se realizaron en aguas con variadas condiciones físicas y químicas. Por lo tanto, parte de la variabilidad de la toxicidad proviene de la variabilidad química de esas aguas. Un interesante corolario es que las condiciones químicas del medio de ensayo pueden ser diseñadas para obtener menores o mayores grados de toxicidad.

Segundo, incluso si se realizan ensayos ecotoxicológicos en aguas químicamente idénticas, se encuentra variación en la sensibilidad a cobre de especímenes que provienen de distintas regiones o ecosistemas. Esto es el resultado de la historia local de las especies en cada zona. Por ejemplo, si éstas viven naturalmente en aguas con altos niveles de cobre puede existir selección evolutiva de una mayor tolerancia. A más corto plazo, existe un fenómeno denominado adaptación fisiológica, en que el animal hace uso de los mecanismos regulatorios para tolerar niveles transitorios más bajos o más elevados del elemento.

También la tabla ilustra un tema de gran relevancia regulatoria para los metales. Como señalamos en la sección sobre toxicidad del cobre para seres humanos, los efectos nocivos de este elemento en agua de bebida aparecen a concentraciones del orden de 2 a 4 milésimas de gramo por litro. En invertebrados acuáticos, en cambio, se puede encontrar un grado importante de mortalidad a niveles mil veces menores que eso (millonésimas de gramo por litro). Esto se explica porque ellos viven inmersos en el agua y están en contacto mucho más directo con los compuestos presentes en ella. De hecho, respiran y establecen su balance salino por intercambio directo entre los gases y sales de su medio interno y los del agua que los rodea. Sin embargo, algunos animales acuáticos tienen gran tolerancia al metal, como lo demuestran las anguilas.

La importancia regulatoria de este fenómeno es que los invertebrados acuáticos representan la clase de animales más

vulnerables a los metales. Por lo tanto, en toda consideración regulatoria de las concentraciones aceptables de metales en el medio, la combinación invertebrados/medio acuático será siempre el talón de Aquiles regulatorio para estos elementos.

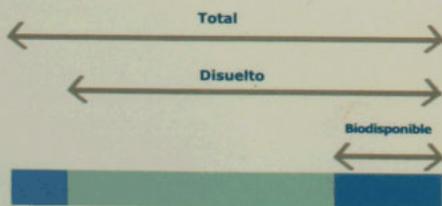
## Biodisponibilidad

Todo compuesto que ingresa a un medio natural, interactuará química y físicamente con una mezcla generalmente compleja de otros compuestos y partículas que existen en todo medio natural. Algunas de estas interacciones resultarán en la formación de nuevas formas o compuestos. Por ejemplo, pueden ocurrir reacciones químicas que conviertan a las dos moléculas en una tercera, o que degraden una molécula en una o más partes, partículas que absorban la molécula a su superficie, etc.

La fracción biodisponible es la parte del total de un compuesto que está en una forma química/física que puede interactuar con un ser vivo y tener un efecto biológico, es decir que está disponible para una acción biológica dada.

Hay varias formas de medir la concentración de un metal en una muestra ambiental. La más común es medir el Metal Total, es decir todo el metal presente sin importar su forma. Una segunda forma es medir el Metal Disuelto, caso en el que se filtra primero la muestra pasándola por un cedazo de tamaño muy pequeño (el diámetro del poro es de 0,5 milésimas de milímetro) para eliminar partículas en suspensión y se mide el metal en el líquido filtrado. La Figura 6 ilustra la relación cuantitativa entre metal Total, Disuelto y Biodisponible.

**Figura 6**  
Esquema que representa la relación cuantitativa entre Fracción Total, Disuelta y Biodisponible de un compuesto en un medio acuático.



En síntesis, lo biodisponible es una fracción de lo disuelto que es, a su vez una fracción de lo total. La fracción biodisponible se compone, en el caso de metales, de formas iónicas libres (el átomo con carga eléctrica). Estas son las formas que pueden tener un efecto biológico, ya sea positivo o adverso.

La Figura 7 ilustra el efecto que pueden tener las características del medio sobre la biodisponibilidad y toxicidad de un metal. En este caso, la toxicidad aumenta no en función de la concentración de cobre, que se mantiene constante, sino de la disminución de la concentración de materia orgánica<sup>4</sup>. Al disminuir la materia orgánica, que actúa como una trampa que absorbe átomos de cobre, se aumenta la fracción biodisponible de cobre, y por ende su toxicidad para los peces. Si se mira en el otro sentido, el experimento indica que la materia orgánica tiene un papel protector para el ser vivo. Evidentemente, si se realizan ensayos de toxicidad en presencia de distintas concentraciones de materia orgánica, se obtendrán valores muy diferentes de LC50.

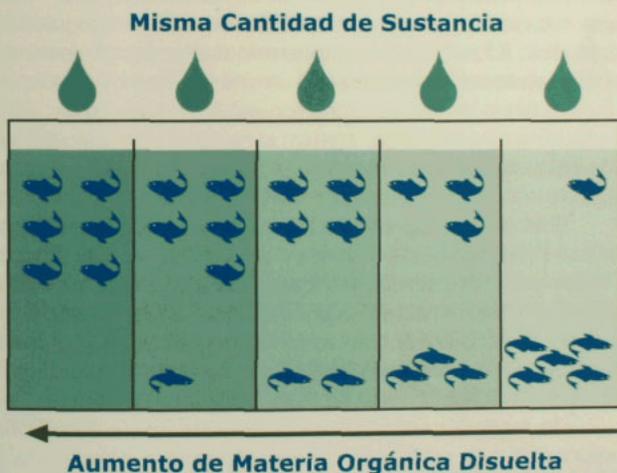


Figura 7  
Esquema que representa el efecto de cantidades crecientes de materia orgánica disuelta en el agua sobre la toxicidad para peces de una cantidad constante de un metal.

No se ha desarrollado aún una metodología simple para medir directamente la fracción biodisponible de metal en agua. Esto obliga a que las regulaciones deban basarse en el metal total o disuelto. Como lo ilustra la Figura 6, estas medidas serán

<sup>4</sup> La materia orgánica es una mezcla compleja y variable de compuestos de carbono de origen animal o vegetal, que se encuentra naturalmente en aguas, suelos y sedimentos.

generalmente, dependiendo de las condiciones reinantes, sobrestimaciones de la fracción biodisponible. La fracción biodisponible será máxima, e idéntica al Metal Total y al Metal Disuelto, cuando se usen sales muy solubles del metal en aguas con ninguna capacidad de acomplejarlo. Estas son, en general, las condiciones en que se realizan los ensayos de ecotoxicidad con aguas de laboratorio.

Como resulta evidente de la Figura 6, todo esquema normativo que se base en Metal Total, o incluso en Metal Disuelto, tenderá a fijar límites regulatorios que, en la mayoría de los casos, resultarán innecesariamente bajos, pues no considerarán la química del agua que tiende a reducir la toxicidad del metal. De hecho, se puede llegar al absurdo de obligar a niveles de concentración de metal que son inferiores a los niveles naturales de algunos cuerpos de agua, niveles en los cuales animales y plantas se desarrollan normalmente. El problema es entonces cómo estimar la fracción biodisponible de metal en cada tipo de agua, para así normar sobre esa base en cada caso específico. Además, la manera de hacerlo debe considerar los costos involucrados y ser, en lo posible, de fácil aplicación para reguladores y regulados. A continuación, revisaremos una herramienta que busca resolver este problema.

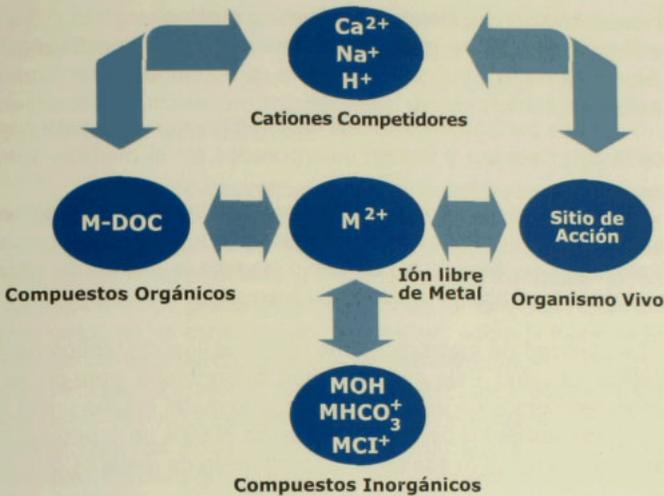
### El Modelo de Ligando Biótico

El Modelo de Ligando Biótico (BLM) combina herramientas químicas preexistentes e incorpora un sitio de acción biológica (en el ser vivo) para predecir la toxicidad de un metal, a partir de una serie de características fisicoquímicas del agua. El tratamiento que sigue es suficientemente simplificado para su comprensión por personas no familiarizadas con conceptos químicos.<sup>5</sup>

Un modelo es simplemente un sistema de ecuaciones relacionadas que actúa como una calculadora sofisticada. El usuario ingresa los valores de un grupo de variables, en este caso características químicas del agua, y el modelo genera una predicción: concentración del metal que producirá (para las variables ingresadas) una mortalidad del 50% en una especie dada.

---

<sup>5</sup> Para un tratamiento más completo, ver la sección Referencias Bibliográficas y Lecturas Recomendadas



**Figura 8**  
Esquema que muestra los tipos de interacciones entre metal y otros componentes del agua y que modifican la biodisponibilidad del metal según el BLM. La acción del metal se verifica en el Ligando Biótico que en el caso de los peces, corresponde a las branquias.

La Figura 8 esquematiza los tipos de interacciones que el BLM incorpora. El ion metálico puede interactuar con sustancias orgánicas, inorgánicas o con el ligando<sup>6</sup> biótico, es decir el sitio de acción del metal en el animal. Nótese que los iones competidores (calcio, sodio, iones hidrógeno) compiten con el metal por sitios de unión presentes tanto en la materia orgánica como en el animal. Como resultado de todas estas competencias y uniones, quedará una cantidad de metal libre para unirse al sitio de acción biológica.

En peces, se sabe que el sitio de acción biológica para la toxicidad de metales son las branquias, estructuras especializadas cuya función principal es el intercambio de gases (oxígeno, CO<sub>2</sub>) y sales (potasio, sodio, cloruro) entre el agua y el medio interno del pez. El efecto tóxico se produce porque el metal se une a los lugares donde se realizan estos intercambios y los impide.

En el caso del BLM, las variables de entrada que el modelo requiere son:

- Concentración de ligandos orgánicos. Esto se mide como Materia Orgánica, y varía mucho entre distintos cuerpos de agua.
- Concentración de ligandos inorgánicos. Se requiere medir:

<sup>6</sup> Entendemos por ligando cualquier compuesto, sustancia o sitio que pueda unir (ligar) metal.

concentración de cloruro, carbonato y el pH.

- Concentración de iones competidores: calcio, sodio e ion hidrógeno (pH).

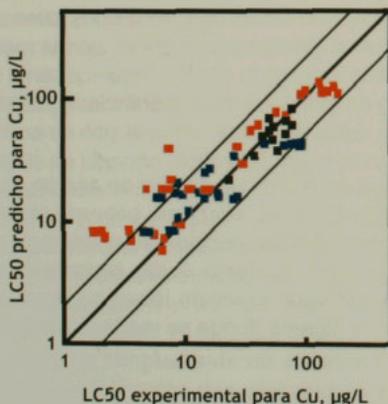
Los parámetros internos del modelo, que no varían con cada tipo de agua y vienen incorporados en el modelo, son:

- La afinidad de cada tipo de ligando por el metal. Estos parámetros son conocidos para cada par metal-ligando, excepto para el ligando biótico, caso en el cual debió medirse la afinidad de cada metal por los sitios de unión en las branquias.
- La cantidad de metal que debe unirse al ligando biótico para gatillar toxicidad. Este parámetro fue determinado, para peces, en experimentos en que se midió cuánto metal estaba unido a las branquias de los peces cuando moría el 50% de la población expuesta al metal (o sea en la concentración de metal LC50).

Debido a la complejidad del sistema de ecuaciones que se requiere usar, el BLM se aplica a través de un programa computacional ad hoc.

**Figura 9**

Gráfico que ilustra la capacidad predictiva del LC50 para Cu del Modelo de Ligando Biótico. Una predicción perfecta daría una serie de puntos ubicados sobre la diagonal continua. Las líneas punteadas paralelas a ésta indican el rango de desviación aceptado, que va entre 0,5 y 2 veces el valor experimental.



Antes de aplicar un modelo es necesario evaluar su poder predictivo, contrastando sus predicciones con valores observados de toxicidad para un conjunto representativo de calidades de agua. Este es un proceso que se viene realizando, para cobre y plata, desde el año 2000 en diversos países, entre ellos Chile.

La Figura 9 presenta un gráfico que ilustra el poder predictivo del BLM para una diversidad de calidades de aguas naturales chilenas y medios de laboratorio en el caso del cobre y *Daphnia pulex*, un invertebrado acuático rutinariamente usado por las agencias regulatorias de todo el mundo.

En este tipo de gráfico, el resultado óptimo es la identidad perfecta entre lo observado y lo predicho, situación representada por la diagonal teórica de identidad. En la realidad, debido a la gran variabilidad asociada a los ensayos de toxicidad, es de esperar un cierto grado de dispersión en torno a esa recta. En este caso, se ha considerado "aceptable", sobre la base de la variabilidad estadística existente en la determinación del LC50 entre distintos laboratorios, que la predicción fluctúe entre la mitad y el doble del valor observado. El rango aceptable queda así definido por las dos rectas paralelas por sobre y bajo la de identidad. Es claro que el modelo tiene una capacidad predictiva adecuada para casi todas las calidades de agua estudiadas.

Esta capacidad predictiva del BLM ha sido reconocida por la Agencia de Protección Ambiental de EEUU, la que lo ha incorporado a su esquema de evaluación como posible herramienta para derivar criterios de calidad de agua de metales. Su eventual adopción dependerá del proceso de validación en curso.

En términos regulatorios prácticos, el BLM puede ser usado tanto para definir límites de descarga de residuos líquidos que contengan cobre como para fijar criterios de calidad de agua para cobre en determinados cuerpos de agua o regiones hidrológicas. Es importante señalar que el resultado de usar el BLM puede ser tanto disminuir como aumentar el límite regulatorio. Por ejemplo, en aguas muy pobres en materia orgánica y contenido de calcio, el BLM predice LC50s mucho más bajos que los obtenidos por otros métodos, y por lo tanto determina niveles normativos más estrictos para ese tipo de aguas. En cambio, en ríos con contenidos importantes de materia orgánica el efecto será el opuesto.

## PARTE II

# ELCOBRE EN LOS ESCENARIOS REGULATORIOS

En este capítulo revisaremos algunos desarrollos regulatorios, nacionales e internacionales de años recientes en que se ha intentado usar algunas propiedades del cobre para caracterizarlo negativamente, tanto desde el punto de vista de la salud humana como del medio ambiente. Haciendo uso de los conceptos presentados en la Sección I, esperamos mostrar la solidez de las razones que han esgrimido la industria cuprera global y nuestro país, como principal productor de cobre del mundo, en defensa del cobre como material seguro.

A nadie puede extrañar que Chile juegue un papel de liderazgo en la defensa del cobre ante desarrollos regulatorios que amenazan la viabilidad de sus mercados. Sin embargo, este interés explícito puede llevar a que algunos desestimen los argumentos científicos y técnicos que la industria o Chile puedan plantear en el debate regulatorio. Esta realidad inescapable para toda industria que defiende lo que produce, enfatiza la importancia de aquello que se afirme esté basado en evidencias científicas sólidas, generadas por investigadores independientes y de calidad reconocida. En general, deben aplicarse a estas investigaciones los mismos controles de calidad que se exige al mundo académico, en particular la publicación de resultados reproducibles en revistas de prestigio, con comité editorial y revisión por pares. La industria ha reconocido e incorporado cada vez más esta exigencia, eliminando las cláusulas de confidencialidad y condicionantes para el control de resultados "negativos" (cláusulas que llevaron, por ejemplo, a la industria del tabaco al marasmo de demandas y desprestigio que enfrenta hoy en EEUU).

Sin embargo, el mundo de los organismos regulatorios y el de la industria no son el mundo de la ciencia. Este último puede proporcionar necesarios elementos de juicio sobre los que la autoridad puede basar sus decisiones. Pero, a menudo esos elementos de juicio: i) tienen grados importantes de incertidumbre; e ii) están sujetos a variadas interpretaciones cuando se aplican a la realidad de terreno, infinitamente más compleja que las situaciones experimentales controladas. Esta realidad está en conflicto con la percepción que el público suele tener de la ciencia, de la que a menudo se esperan dictámenes incontrovertibles y unánimes. Esto genera confusión y frustración, la sensación inquietante que por cada experto que dice "blanco" se puede encontrar otro que dice "negro". Esta situación es muy marcada



en las polémicas medioambientales, donde se enfrentan los científicos con tendencias "medioambientalistas" con aquéllos que son identificados como "pro-industria", a menudo financiados por ésta, lo que supuestamente invalida sus conclusiones. No hay una respuesta simple a este conflicto, preñado de componentes emocionales, filosóficos y políticos.

Por último, es importante tener siempre presente la naturaleza eminentemente política de las decisiones regulatorias. No es que ello sea un problema o defecto, sino que es su naturaleza y, en una sociedad democrática, es de esperar que así lo siga siendo. Una decisión regulatoria puede tener múltiples efectos, al menos económicos y sociales, y por lo tanto debe enmarcarse en un escenario de toma de decisiones mucho más amplio que lo meramente técnico. Es por ello que en el tema de los desarrollos regulatorios que amenazan al cobre, nos encontraremos necesariamente con temas de este tipo. Tanto en Europa como en EEUU, y cada vez más en Chile, los gobiernos y sus organismos regulatorios están sometidos a presiones y acciones de lobby de diversos grupos de interés: movimientos proteccionistas laborales, grupos de activismo medioambiental de las más variadas tendencias, e industrias competidoras. Es una realidad que debemos tener en cuenta. En el recuadro titulado "CPVC versus Cobre", se reseña una historia bastante ilustrativa en este sentido. Iniciaremos, por lo tanto este capítulo, revisando algunos esquemas conceptuales generales que muestran tendencia a predominar en los países desarrollados, permeando desde allí al resto del mundo.

### CPVC versus Cobre<sup>7</sup>

California es el único Estado de EEUU donde no está permitido el uso de cañerías de CPVC (cloruro de polivinil clorinado) un material con el cual el cobre compite en muchos mercados. Desde hace 15 años, la industria del plástico ha estado luchando por levantar esta prohibición, ante la oposición de grupos ambientalistas de uno de los estados más "verdes" del país del norte. La industria americana del cobre, siguiendo una política que ha mantenido por años, hasta ahora no se había involucrado en esta situación. En 1998 debió cambiar esa política.

<sup>7</sup> Parte substancial de este recuadro fue tomado del Boletín "Cobre: Desafíos Regulatorios", N° 3 Octubre 1998, emitido por la Vicepresidencia de Desarrollo de Codelco Chile.

En efecto, ese año el Departamento de Vivienda y Desarrollo Comunitario de ese Estado publicó un Borrador de Informe de Impacto Ambiental (BIA) sobre el uso de CPVC en cañerías de residencias. Lo que distingue a este informe de los esfuerzos previos por levantar la prohibición, es que la justificación se basa principalmente en un ataque al cobre como material alternativo. Este desarrollo es particularmente preocupante, por varias razones:

- La mayoría de la información sobre cobre y CPVC presentada en el informe fue proporcionada por una compañía manufacturera de plásticos.
- El ataque al cobre, se hace sobre un amplio rango de propiedades, que van desde un supuesto impacto negativo sobre especies marinas a su peligrosidad por ser buen conductor del calor y la electricidad.
- Las justificaciones técnicas y científicas del informe son tan superficiales que sugieren una fuerte parcialidad del análisis.
- La otra parte interesada, la industria cuprera americana, se enteró de este informe a último momento, quedando con un plazo mínimo para presentar sus "descargos".
- De levantarse la prohibición al CPVC sobre la base de un informe de esta naturaleza, se establecería un precedente muy preocupante para el cobre en los EEUU.

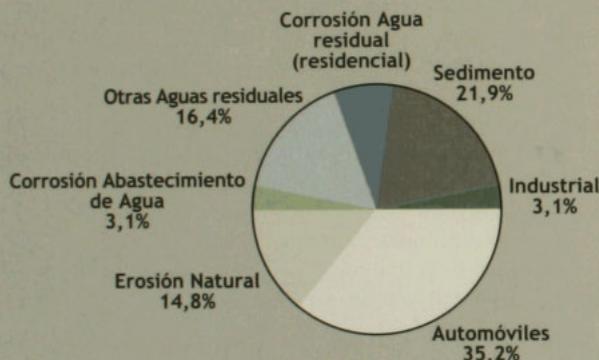
En respuesta a esta situación, la industria americana del cobre, encabezada por la Copper Development Association (CDA), formó un grupo de trabajo que se abocó en tiempo record a elaborar un contundente documento de respuesta, que analiza una por una las afirmaciones contenidas en el estudio, demostrando que son, en el mejor de los casos, una presentación sesgada de los hechos. A continuación, se presentan algunas de las afirmaciones del BIA y las respuestas correspondientes del grupo de científicos y expertos convocados por la CDA.

### Cañerías y Cobre en la Bahía Sur de San Francisco

El informe afirma que el cobre proveniente de la corrosión de cañerías residenciales de agua potable contribuye en cerca de un 63% a la contaminación total por cobre de las aguas de la parte sur de la Bahía de San Francisco. Este dato fue trasplantado

erróneamente de un estudio que agrupa todas las fuentes de corrosión (residencial, industrial, comercial...etc). Una correcta interpretación de ese estudio reduce la contribución máxima a 25%.

Sin embargo, existen estudios más completos, realizados por entidades regulatorias de comunidades locales de la Bahía, en que se consideran todas las fuentes posibles del cobre en aguas superficiales. Sobre la base de esos datos y adoptando las suposiciones más conservadoras, la distribución es la presentada en la figura siguiente.



En efecto, el cobre que llega a la Bahía Sur, y a cualquier cuerpo de agua rodeado por una ciudad, proviene de diversos orígenes. Entre las fuentes urbanas difusas, un componente importante son las aguas-lluvia escurridas de calles y carreteras, que arrastran, por ejemplo, compuestos de cobre emitidos por automóviles (desgaste pastillas de freno, tubo de escape, fugas de refrigerantes...etc). Otra fuente importante, y a menudo olvidada, es el movimiento de cobre desde los sedimentos de la Bahía, cantidad que varía de manera compleja dependiendo de la estación, el flujo de materia orgánica...etc.

De esta manera, usando las estimaciones mínimas de contribución sedimentaria disponibles, la contribución del cobre proveniente de corrosión de cañerías residenciales llega a un máximo de 5,5%, cifra significativamente menor que el 63% indicado en el informe.

## Cobre y Norma de Calidad de Agua

El informe dedica toda una sección a crear la impresión que el cobre ha sido por años, y sigue siendo, un problema ambiental serio en la Bahía Sur: los niveles de cobre estarían violando frecuentemente la Norma de Calidad de Agua para cobre. Esta norma, cuyo objeto es proteger al 95% de las especies naturales y a todas las especies comerciales, es del orden de unos pocos microgramos (millonésimas de gramo) por litro. Sin embargo, un examen cuidadoso de los datos de monitoreo de diversas entidades regulatorias indican que, en los últimos 5 años, no se ha violado en ningún momento esa norma en el área en cuestión. Entre los recursos dudosos empleados en el informe, se hace referencia a estudios de la década del 70, cuando los múltiples controles de efluentes que existen hoy aún no se habían implementado. La omisión de datos recientes es sintomática y refleja, una vez más, un análisis sesgado.

## Cobre y Salud Humana

El capítulo dedicado a los supuestos efectos nocivos del cobre proveniente de cañerías sobre la salud de quienes consumen agua de llave adolece de toda rigurosidad científica: ignora los estudios más recientes y aceptados por la comunidad de expertos, recurre a referencias oscuras y estudios descartados por sus falencias metodológicas, ignora los conceptos, ampliamente aceptados, de evaluación de riesgo, niveles de exposición, estudios epidemiológicos en poblaciones, etc. Sin embargo, esto no es obstáculo para que insinúe repetidamente que las cañerías de cobre son una amenaza para la salud de los consumidores. El informe suma a esto un análisis poco serio del posible efecto aditivo del plomo liberado de soldaduras, nuevamente ignorando las regulaciones ya existentes, en ese sentido, en EEUU y recurriendo a estudios antiguos y de cuestionable rigurosidad. Para terminar, no se ofrece ningún dato sobre qué compuestos se encuentran en el agua escurrida por cañerías de cobre, y menos por las de CPVC.

## El Cobre y la Seguridad de los Plomeros

En un arranque de creatividad, el informe indica lo siguiente, entre muchos otros argumentos:

“En una revisión reciente de datos a nivel nacional, Tardiff encontró siete casos reportados de accidentes en trabajadores durante instalación de cañerías de cobre, y ninguno durante instalación de cañerías de CPVC, durante el período 1980 a 1997”.

Un análisis de la referencia correspondiente revela que la citada revisión fue realizada por encargo de la compañía B.F. Goodrich, productores de CPVC, para su uso en un juicio contra un pueblo que intentaba prohibir la instalación de cañerías de plástico. Si se considera que durante ese período, las instalaciones de cañerías de cobre superaron por cientos de miles, sino millones a las de CPVC, siete casos no significan nada en términos comparativos. Por último, siete casos, en 17 años de instalaciones en todo EEUU, indicarían que instalar cañerías de cobre es una de las actividades físicas más seguras que se conocen.

Lo más anecdótico, sin embargo, es la referencia a tres casos de trabajadores electrocutados con cañerías de cobre. Evidentemente, según los autores de este informe, la peligrosidad la constituye la conductividad del metal, no el descuido de las normas de seguridad en la construcción. Por si fuera poco, también se cita la conductividad térmica del cobre como posible fuente de incendios.

### CPVC: ¿Alternativa Ecológica?

Por último, el informe termina comparando favorablemente el CPVC con el cobre en los términos más amplios de sustentabilidad: eficiencia energética, uso de recursos no renovables y disposición de residuos. En esta sección, la escasa coherencia y solidez argumental mostrada hasta aquí por el informe, terminan por desaparecer del todo. Por ejemplo, el informe señala que aunque “El uso de gas (en la producción de CPVC)...compromete un recurso no renovable, éste es un uso

superior que el usarlo para combustible". A su vez, podríamos agregar, el usar petróleo como combustible es ambientalmente mejor que arrojarlo al mar, pero de ello no se deduce que su uso como combustible no tenga impacto ambiental.

Agrega también que "El planeta tiene una cantidad finita de cobre, y aunque es reciclable, debe considerarse un recurso no renovable". Sin repetir la discusión sobre el agotamiento anunciado de reservas del planeta, es difícil argumentar que el uso de un recurso no renovable y no reciclable (el gas) es más sustentable que uno reciclable (cobre). Según datos del Environmental Defense Fund, en 1996 un 0,08% del PVC fue reciclado. No existen datos para CPVC porque este material aún no se recicla. En el caso del cobre, se estima que cerca de un 50% de la chatarra de cobre es recuperada.

### Fin de la Historia

Como resultado de la presentación de la CDA, el informe de impacto ambiental fue modificado, aunque persistieron algunas referencias negativas al cobre. En Noviembre de 2000, el Estado de California modificó el Código de Plomería, autorizando el uso de CPVC, en casos calificados, y sometido a aprobación por la autoridad respectiva.

### Principio Precautorio

Aunque el origen y uso del Principio Precautorio (PP) se remonta a varios siglos en las disciplinas de la salud pública, su primera aplicación al medio ambiente en la forma en que se lo conoce actualmente tuvo lugar en 1984, en la segunda conferencia de la Convención sobre Protección del Mar del Norte, donde los ministros declararon que "con el fin de proteger al Mar del Norte de los posibles efectos dañinos de las sustancias más peligrosas...se plantea un enfoque precautorio que puede requerir acciones de control de las emisiones de estas sustancias incluso antes que se haya establecido un nexo causal por medio de evidencia científica clara". Desde entonces, el uso e interpretación del Principio se expandieron. En la Cumbre de la Tierra en 1992, el Principio 15 de la Declaración de Río señala:

"Cuando haya amenaza de daño grave o irreversible, la falta de certidumbre científica plena no será usada como razón para posponer medidas costo efectivas para impedir la degradación ambiental".

La referencia al costo no se encontrará en versiones más duras. Las versiones citadas se conocen como formas débiles o suaves del PP, en las que el peso de la prueba aún puede considerarse que está en las autoridades o reguladores. En las versiones fuertes o duras del mismo, el peso cae en quienes se proponen realizar o realizan la actividad que es fuente del posible riesgo.

En términos más pedestres se puede considerar al PP como la aglutinación de dos máximas de la sabiduría popular: i) "Es mejor prevenir que curar"; e ii) "En caso de duda, es mejor abstenerse". Si bien en el plano personal estas recetas pueden parecer muy prudentes, dependiendo de la visión de la vida de cada uno, extendidas al plano de las actividades productivas, su aplicación presenta aspectos bastante más polémicos y complejos. Y en efecto, el PP es un enfoque que desde su nacimiento ha estado sumido en la controversia. Por razones de espacio, revisaremos aquí sólo algunos de los argumentos que se han dado en su contra.

No se puede demostrar un negativo. En las versiones más duras, el PP es interpretado como un requerimiento que, antes de permitir una sustancia o actividad, se demuestre que no daña el medio ambiente. Sin embargo, demostrar científicamente que algo no tiene un efecto es estrictamente imposible. La ciencia no tiene mecanismos para demostrar que un nexo causal no existe. Generalmente, descartamos posibles agentes causales porque demostramos que hay otro que explica mejor el fenómeno, no porque demostramos que todos los posibles no lo explican. De lo contrario, pronto llegamos a situaciones absurdas.

Por ejemplo, imaginemos que alguien sostiene que la sustancia X produce daño neurológico en seres humanos y el productor de X, el Sr. Pérez, debe demostrar que no es así. El Sr. Pérez recurre a los expertos disponibles, los que inyectan la sustancia X en un centenar de ratones y verifican que, tras dos meses, no hay efectos neurológicos. ¿Queda demostrado?

Difícilmente, pues se propone ahora que quizás el efecto se da después de dos meses, o incluso en los descendientes de los ratones expuestos, o cuando la exposición es por vía respiratoria, o en cantidades más grandes, o no en ratones pero sí en primates, o no en primates pero sí en seres humanos o quizás por exposición cutánea o a través del cabello, o etc., etc. Tras años de estudios, y toneladas de resultados negativos, el Sr. Pérez no está más cerca de demostrar que X no tiene efectos que lo que estaba al principio. Pero posiblemente más cercano a la quiebra.

Los peligros de las alternativas. Los defensores del PP a menudo basan su postura en lo que podemos denominar el Escenario Catastrófico: si se puede pensar, por muy improbable que sea, que ocurra una catástrofe como consecuencia de una acción, entonces debe aplicarse el Principio y prohibirse la acción. Esta es la versión usada, por ejemplo, para rechazar el uso de la energía atómica. Pero, por el mismo argumento, puede plantearse que si se puede pensar, por muy improbable que sea, que la suspensión de esa acción pueda llevar a una catástrofe, entonces la acción debe permitirse y realizarse. Un principio que lleva a proposiciones contradictorias no parece muy sólido. Un ejemplo citado a menudo es el siguiente: se puede plantear que la suspensión del uso de fuentes de energía a base de carbono (para prevenir el calentamiento global) puede generar una crisis económica, social y política a nivel global que desemboque en una guerra nuclear, por lo que hay que impedir la suspensión del uso de fuentes de carbono. O también se puede argumentar que el PP debe aplicarse a sí mismo, es decir que para aplicar el PP, primero se requiere demostrar que su aplicación no conlleva riesgos. Si hay dudas, es mejor abstenerse.

Una receta para la inacción. Dada la incertidumbre inherente a muchas acciones humanas, en especial en cuanto a un sistema tan complejo como el medio ambiente planetario, la adopción al extremo del PP llevaría a la humanidad a la parálisis. Toda acción propuesta puede tener consecuencias indeseables en el largo plazo. De hecho, si la humanidad hubiera adoptado este principio en la Edad Media, con suerte estaríamos en la era pre-industrial, con un promedio de vida de menos de 40 años y tasas de mortalidad infantil hoy impensables en un país desarrollado. Por otra parte, hay proponentes extremos del PP que no vacilan en considerarla una alternativa deseable.

Dicho lo anterior, es importante señalar que, a pesar de estas debilidades, el PP tiene considerable aceptación en los círculos regulatorios dominantes en el mundo desarrollado y también en países en desarrollo. En estos últimos, sin embargo, la dura realidad económica impone versiones más suaves del mismo, generalmente matizadas por una interlocución con los costos productivos y las condiciones económicas y laborales de cada región. Por último, no cabe duda que el PP, aplicado con prudencia, puede hacer un aporte a mejorar la calidad de vida de los habitantes del planeta. Creer que es mejor prevenir que curar es prudente, mientras no conduzca a la parálisis total del sistema.

Para la industria del cobre, y para Chile, el predominio del PP en el mundo desarrollado tiene una consecuencia importante: el desconocimiento científico nos desfavorece. Mientras más brechas existan en nuestro entendimiento de cómo se comporta el cobre en el medio ambiente, tanto en relación al hombre como a los demás seres vivos, más expuestos estaremos a que se aplique el Principio, lo que siempre redundará en prohibiciones, mayores restricciones y límites permitidos más bajos. Es fácil entender entonces por qué la industria invierte sumas importantes en investigación científica sobre cobre, salud y medio ambiente.

### **Criterio PBT: Persistencia, Bioacumulación y Toxicidad**

En 1998, la Agencia Ambiental de los EEUU (EPA) hizo pública su estrategia para los Contaminantes Persistentes, Bioacumulativos y Tóxicos (PBT). Desde entonces, la filosofía regulatoria de este trío de criterios de riesgo para la salud y el medio ambiente, se ha extendido a otros países y organismos internacionales, adquiriendo una importancia que justifica una breve revisión de su trasfondo conceptual.

#### **- Persistencia**

La persistencia es un criterio de riesgo ambiental desarrollado hace muchos años, cuando los reguladores identificaban la problemática ambiental con la contaminación por sustancias orgánicas sintéticas (pesticidas, plásticos, insecticidas,

etc). Se observó entonces que, entre ellas, había algunas que se degradaban rápidamente, por acción química o biológica, para convertirse en compuestos que no implicaban ninguna amenaza para los animales o plantas. Otras, en cambio, permanecían sin cambio (o persistían) en el medio ambiente, aumentando la posibilidad de que afectaran a un ser vivo. De allí entonces que se asoció mayor persistencia a mayor riesgo, convirtiéndose este criterio en un dogma que, por mucho tiempo, no fue necesario cuestionar ni revisar. Más recientemente, cuando la atención de los reguladores se enfocó en los metales, la tendencia fue aplicar los mismos criterios usados para compuestos sintéticos.

Sin embargo, hay un problema fundamental en este enfoque. Los metales no son sustancias sintéticas hechas por el hombre, sino elementos naturales. Entre otras cosas, esto implica que su persistencia es infinita. En otras palabras, con la excepción de fenómenos muy raros (como la emisión de radioactividad) un átomo de metal seguirá siendo el mismo átomo de metal por siempre. Es claro que si los elementos no fueran estables, intrínseca e infinitamente persistentes, el mundo físico, químico y biológico que conocemos no existiría. Parece absurdo, entonces, asociar una connotación negativa, o de riesgo, a la persistencia de los elementos químicos naturales. Por el contrario, esta propiedad es la base de una de sus características más ambientalmente positivas de los metales: la reciclabilidad, en principio, infinita.

### - Bioacumulación

La bioacumulación es un criterio de riesgo ambiental basado en la cantidad de una sustancia que es captada por un ser vivo y se acumula en sus tejidos. La acumulación implica mayor tiempo de exposición de los tejidos a la sustancia, y por ende mayor riesgo que se verifique un efecto nocivo.

La bioacumulación se mide como la concentración de la sustancia en el ser vivo dividida por su concentración en el medio acuático<sup>8</sup>. Mientras mayor sea esta razón, mayor el presunto riesgo que implica la sustancia.

Este criterio también tiene un origen asociado a los compuestos sintéticos orgánicos, los que normalmente no se

---

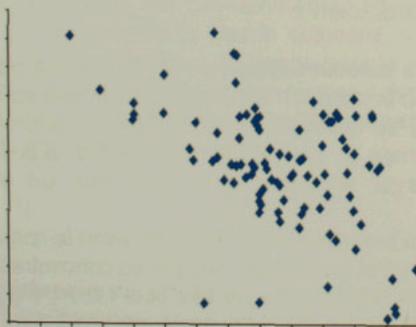
<sup>8</sup> Esto se conoce como el BCF, Bioconcentration Factor o Factor de Bioconcentración.

encuentran presentes en los tejidos del ser humano y otros seres vivos (porque no existían en la naturaleza). De hecho, la manera experimental de evaluar el potencial de bioacumulación de una sustancia es medir cómo se distribuye en una mezcla de una solución orgánica y agua. Los compuestos que "prefieren" el medio orgánico tienen mayor potencial para ingresar al interior de una célula, y por lo tanto representan mayor potencial de bioacumulación.

Este criterio es totalmente inapropiado para metales o sales inorgánicas que son polares (tienen carga eléctrica en solución) y en particular inaplicable a elementos esenciales. Como ya lo discutimos, los seres vivos regulan la concentración interna de los nutrientes. Es decir, en un medio con una concentración muy baja de cobre, el animal captará más y excretará menos cobre hasta alcanzar el nivel interno requerido. O sea, en un medio pobre en cobre, un ser vivo tenderá activamente hacia una razón de bioacumulación elevada. En tal caso, la bioacumulación no es una señal de mayor riesgo, sino del funcionamiento adecuado de la fisiología del animal. Esto se ilustra en el gráfico de la Figura 10, donde se muestra cómo la razón de bioacumulación de cobre en un pez está inversamente relacionada con la concentración de metal en el agua.

**Figura 10**  
Relación entre concentración de un metal en el agua y el factor de bioconcentración en una especie de pez. Muestra cómo la bioconcentración aumenta a medida que el nivel de metal disminuye en el agua

Factor de Bioconcentración



Concentración de Metales en Agua

Por último, muchas especies acuáticas tienen mecanismos para atrapar metales en sus tejidos, de forma que no pueden hacerle daño, por ejemplo al interior de vesículas especializadas en que el metal está inactivo. Eso explica que algunos mariscos tengan cantidades totales de cobre muy elevadas en sus tejidos, sin presentar ningún signo de efecto deletéreo. Al interior de sus células, sólo circula el metal que necesitan y todo exceso es almacenado en las vesículas.

En conclusión, no parece apropiado aplicar, al menos a priori, el criterio de bioacumulación como base para estimar el riesgo de metales esenciales para los seres vivos.

### - Toxicidad

Como ya lo hemos expuesto, la toxicidad de los metales es una realidad que debe ser calificada en un grado importante, por las características fisicoquímicas del medio en que se verifica y por la biología de la especie afectada. Si bien la posible introducción del Modelo de Ligando Biótico en el esquema regulatorio de EEUU, es un primer paso prometedor, la consideración de los factores que determinan la biodisponibilidad de los metales dista mucho de ser aceptada en otros contextos, como la Unión Europea. Allí han tendido a predominar los esquemas precautorios, y la urgencia que algunos grupos de presión han imprimido al proceso regulatorio, especialmente desde los países nórdicos, lo cual conspira contra el desarrollo de las investigaciones pendientes. El tema de la biodisponibilidad variable de los metales en agua es fundamental desde el punto de vista regulatorio. Las regulaciones que no la consideren están condenadas a ser inviables o innecesariamente costosas para la sociedad: cuestan caro, sin garantía de proteger más.

Si la calidad química del medio está lejos de incorporarse al desarrollo de regulaciones de metales, los aspectos biológicos lo están aún más. En esta área, la industria cuprera presiona por dos aspectos principales: esencialidad y variaciones biológicas regionales o ecosistémicas.

Como ya discutimos en la Sección I, la esencialidad de

algunos metales tiene consecuencias significativas para los procesos normativos que les son aplicables. Volviendo a la Figura 2, hemos visto cómo los elementos esenciales tienen tanto un nivel mínimo como un nivel máximo aceptables de ingesta, y que estos niveles pueden variar mucho entre especies, y entre poblaciones de la misma especie. Esto implica que todo límite normativo que no tome en cuenta ambas facetas de la interacción elemento-ser vivo (deficiencia y toxicidad) corre el peligro de fijar niveles que no tienen un real efecto protector. Es tan evidente que este enfoque generalizado a ciegas no es viable, que en muchos países con sistemas políticos federales, las realidades locales han forzado soluciones que incorporan consideraciones locales.

El otro elemento es la variabilidad biológica natural que exhiben las especies de distintas zonas, regiones o ecosistemas, en su tolerancia a la presencia de metales en el medio. Como ya señalamos esta variabilidad puede tener una base evolutiva, genética en última instancia, o fisiológica (homeostática). La mayoría de los esquemas regulatorios son totalmente ciegos a esta realidad. La autoridad emite una norma aplicable a todo el territorio de un país sin consideración de su diversidad biológica y ecológica. Un ejemplo: para especímenes de *Daphnia pulex* provenientes de EEUU, la medición del LC50 de cobre da un valor de 5,3 microgramos por litro. Ensayos toxicológicos idénticos con especímenes de *D. pulex* recolectados en un lago chileno dieron un valor de 15 microgramos por litro<sup>9</sup>. Esta menor sensibilidad de los especímenes nacionales se observa sistemáticamente en una amplia diversidad de calidades de agua. Es muy probable que estos niveles de variación se repitan en comparaciones entre especímenes provenientes de distintas regiones de un mismo país.

En conclusión, si bien la toxicidad de los metales es un criterio adecuado para evaluar su riesgo medioambiental, esa evaluación debe tener en cuenta los factores químicos y biológicos que la modifican entre regiones, sitios y especies.

En la siguiente Sección, revisaremos algunos escenarios regulatorios específicos en los que se verifica la aplicación de los conceptos que hemos discutido hasta ahora.

---

<sup>9</sup> Datos proporcionados por el Laboratorio de Química y Ecotoxicología de Metales Trazas, Centro de Investigación Minera y Metalúrgica (CIMM).

## Unión Europea: Evaluación de Riesgo

### Concepto de Evaluación de Riesgo (EdR)

Una Evaluación de Riesgo (Risk Assessment) es un ejercicio para estimar el riesgo asociado a una actividad o producto. Su uso en áreas como la ingeniería, las ciencias sociales y el negocio de los seguros se remonta hace muchos años. Sin embargo, en las dos últimas décadas del siglo XX, se ha expandido a la medición del riesgo que una sustancia o actividad representa para la salud humana (Evaluación de Riesgo de Salud), para el medio ambiente (Evaluación de Riesgo Ecológico) o para ambos (Evaluación de Riesgo Ambiental).

Es importante definir algunos conceptos. Entendemos por "peligrosidad", aquella "propiedad o situación que en circunstancias particulares puede llevar a daño".<sup>10</sup> En otras palabras, es el potencial de causar daño, debido a una propiedad intrínseca de la sustancia. Riesgo, por otra parte, es "la combinación de la probabilidad, o frecuencia, de ocurrencia de un peligro definido y la magnitud de las consecuencias de esa ocurrencia".<sup>11</sup> Por ejemplo, una sustancia explosiva es intrínsecamente peligrosa. Sin embargo, si para su detonación se requieren condiciones ambientales muy improbables o si está ubicada en un desierto deshabitado, su riesgo puede ser muy bajo, aunque su peligrosidad sigue siendo la misma.

Una Evaluación de Riesgo es el conjunto de estudios que se realizan para estimar el riesgo así definido. Esto requiere:

- i) Definir un sujeto a proteger. Toda EdR tiene por objeto proteger algo que consideramos valioso: la salud de un grupo humano, la preservación de una comunidad de seres vivos de un lago, el planeta como ecosistema global, etc.
- ii) Conocer la peligrosidad de la sustancia. Existen características de peligrosidad: explosividad, corrosividad, toxicidad para el ser humano, etc. Cada característica de peligrosidad definirá un rango de escenarios de exposición. Esta etapa se conoce como Identificación del Peligro (Hazard Identification).

<sup>10</sup> Royal Society 1992 Risk Analysis, Perception and Management. The Royal Society, London.

<sup>11</sup> Council Regulation (EE) 793/93.

iii) Determinar qué efecto produce la sustancia a distintos niveles de exposición, para cada sujeto a proteger. Esta etapa se conoce como Evaluación de Dosis-Respuesta (Dose-Response Assessment).

iv) Determinar escenarios y niveles asociados de exposición del sujeto a la sustancia. ¿Cómo es plausible que el sujeto se exponga a la sustancia? ¿Con qué frecuencia? ¿Por qué vía? Para ello, es importante conocer tanto las propiedades físicas y químicas de la sustancia como las circunstancias específicas en que, por ejemplo, los seres humanos se pueden poner en contacto con ella: métodos de producción, volatilidad, velocidad de degradación en cada medio, etc. Esta etapa se conoce como Evaluación de Exposición (Exposure Assessment).

v) Sobre la base de la información obtenida en las etapas anteriores, definir cuál es el riesgo que presenta la sustancia para el sujeto que se busca proteger. Esta etapa es la Caracterización de Riesgo (Risk Characterization).

En sus versiones más cuantitativas, una EdR tendrá como resultado final un número cuya magnitud es indicativa del riesgo específico evaluado. Por ejemplo, una EdR Ambiental podría buscar estimar la siguiente razón de riesgo:

$$\frac{\text{Concentración Ambiental de la Sustancia}}{\text{Concentración de la Sustancia que no tiene efecto}} = \text{Razón de Riesgo}$$

El evaluador podría fijar como umbral de acción un valor de 1 para esta razón. Por sobre 1, se considera que hay un riesgo: el estudio predice que la concentración ambiental de la sustancia superará la concentración inocua. En la realidad, rara vez las EdR se aplican a sistemas tan simplificados y nítidos como para generar una respuesta cuantitativa unívoca. Normalmente, la EdR arrojará resultados cualitativos y condicionados a una diversidad de escenarios posibles, no necesariamente excluyentes entre sí, por ejemplo: "El riesgo será alto para emisiones ácidas de plantas

con tecnología A y ubicadas en zonas de bosques lluviosos y suelos salinos o cuerpos de agua con poca capacidad de amortiguación. El riesgo para seres humanos es en general bajo excepto para trabajadores directamente expuestos sin equipo de protección, etc”.

Es importante no perder de vista que una EdR no es más que una herramienta, entre muchas, que un administrador de riesgo puede usar en el proceso de toma de decisiones. Por ello, es muy importante que la EdR no sólo informe de su resultado, sino también del grado de incertidumbre del mismo. Como se deduce de la lista de tipos de información requerida, la mayoría de las veces el proceso estará lleno de brechas y supuestos más o menos bien sustentados. Generalmente, por una cuestión de tiempo y recursos, estas debilidades no tendrán solución. Esto no es en sí un obstáculo insuperable, pues información incierta, pero cuyo grado de incertidumbre se conoce, es más útil que ninguna información. Y es claramente más útil que información incierta que se da por establecida.

## El Proceso de EdR en la Unión Europea

En los años 90, la UE se embarcó en un agresivo y ambicioso programa para hacer un catastro de las sustancias químicas usadas y producidas en los países miembros, así como para evaluar los riesgos que éstas representan para el ser humano y el medio ambiente. Para 1993, la Unión Europea estimaba que en sus mercados circulaban unos 100 mil productos químicos. Para la gran mayoría de ellos no existía entonces ni existe aún información suficiente para estimar qué riesgo representan para los seres humanos y el medio ambiente. Ese mismo año entró en vigencia la Regulación de Sustancias Existentes<sup>12</sup>, cuyo principio fundamental es que el control de las sustancias químicas peligrosas debe estar basado en la evaluación de los riesgos reales o potenciales para la salud humana y el medio ambiente y no sólo en la peligrosidad intrínseca de las mismas.

Esta Regulación generó dos grandes áreas de acción que afectan directamente a la industria. Primero, la obligación de proporcionar información cuantitativa, físicoquímica y toxicológica sobre la sustancia, en plazos fijados en función del volumen

<sup>12</sup> Council Regulation (EE) 793/93.

producido o importado (con mayor urgencia para aquéllas por sobre mil toneladas por año). Segundo, la realización de un programa gradual de Evaluación de Riesgo de sustancias, de acuerdo a listas prioritarias determinadas por la Comisión. Estas Evaluaciones son lideradas por Estados miembros designados para ello, y también implican participación de la industria, pues es ésta la que debe proporcionar la mayor cantidad de información posible para el cumplimiento de las etapas de la Evaluación. El "garrote" para la industria es el Principio Precautorio: en ausencia de evidencia que indique lo contrario, la evaluación se hace sobre la base del peor escenario posible, con el consecuente aumento del riesgo estimado. Por ejemplo, si no se conoce el grado de volatilidad de una sustancia, puede suponerse que éste es máximo, incrementando así, por ejemplo, la exposición estimada de seres humanos por vía respiratoria.

El año 1997, la UE estimaba que existían unas 2000 sustancias con niveles de producción/importación por sobre 1000 toneladas anuales (denominadas High Level Production Chemicals o HLPC), para la gran mayoría de las cuales no existían las bases de datos requeridas para una EdR. Considerando la descripción del proceso de EdR de la sección anterior, es fácil entender por qué la tarea ha sido lenta, engorrosa y cara. De hecho ya en el año 2000 se levantaron voces que calificaban el programa de EdR como un fracaso, señalando que cada año que transcurre es un año más de daño medioambiental irreversible. Con la publicación en 2001 del informe "Strategy for a Future Chemicals Policy", la UE propone un cambio importante: aquellas sustancias consideradas persistentes, bioacumulativas y tóxicas, deben clasificarse sobre la base de su peligrosidad intrínseca y no del riesgo<sup>13</sup>, es decir un enfoque mucho más precautorio.

Hasta la fecha se han emitido cuatro Listas Prioritarias de sustancias a someter a EdR, con un total de 140 sustancias. En su gran mayoría, se trata de compuestos orgánicos sintéticos, pero incluye algunos metales y sus sales: zinc, cadmio y níquel. El zinc fue el primer metal en pasar por el proceso y la experiencia de la industria europea del zinc fue bastante traumática. Para entender por qué basta considerar las etapas del ciclo de vida de la sustancia que debe ser cubiertas en la EdR: producción (incluyendo explotación, beneficio y manufactura); todos los usos

---

13 COM(2001) 88 final, 27.02.01.

de la sustancia; disposición de desechos y actividades de reciclaje. Esto implica, por ejemplo, medir o estimar todas las emisiones de zinc a cualquier compartimento de la biósfera que se producen durante la producción, uso y disposición de productos de zinc, evaluar escenarios de exposición humana y ambiental, niveles de toxicidad para diversas especies y por distintas vías, etc. Todo esto, en un plazo virtualmente imposible (12 meses a contar de la publicación de la Lista Prioritaria respectiva) y con altas exigencias de calidad de datos.

El ejercicio de EdR de la UE abarca dos grandes áreas de objetivos a proteger: salud humana y medio ambiente. En el caso de la salud humana, los efectos que debe cubrir (o tipos de peligros) son:

- toxicidad aguda: efectos nocivos inmediatos tras la exposición a la sustancia;
- irritación: sustancias que provocan inflamación (piel, ojos, vías respiratorias);
- corrosividad: provoca destrucción de tejido vivo;
- sensibilización: la sustancia induce hipersensibilidad a la misma sustancia;
- toxicidad de dosis repetida: efectos nocivos como resultado de exposición repetida;
- mutagenicidad: induce cambios hereditarios;
- carcinogenicidad: induce tumores cancerígenos;
- toxicidad reproductiva: efectos nocivos sobre la capacidad reproductiva.

Las Directrices correspondientes identifican tres tipos de sujetos a proteger:

- Trabajadores (exposición laboral)
- Consumidores
- Seres humanos expuestos vía el medio ambiente.

En el caso del medio ambiente, los objetivos a proteger son:

- Ecosistemas acuáticos
- Ecosistemas terrestres
- Predadores superiores (en el tope de la cadena trófica)
- Microorganismos en sistemas de tratamiento de aguas servidas
- Atmósfera

El esquema incluye todas las actividades asociadas al ciclo de vida del cobre, a lo que habría que agregar todas aquellas fuentes de cobre no asociadas directamente a la industria específica de este metal. Por ejemplo, todas las combustiones (desde el petróleo a las quemadas agrícolas) son fuentes importantes de cobre hacia la atmósfera.

Como es evidente, el alcance de estas Evaluaciones de Riesgo es enorme, exigiendo una cantidad muy significativa de información, la cual no existe, está dispersa, es de calidad muy variable o pertenece a campos del conocimiento muy diferentes.

La participación ("voluntaria" u obligatoria) de la industria de los metales en este esfuerzo implica una inversión importante de recursos para financiar y coordinar acciones, que van desde revisiones exhaustivas de la literatura hasta la realización de ensayos y mediciones específicas, en aquellas áreas en que la brecha de información es suficientemente significativa como para justificar la aplicación del enfoque precautorio.

Adicionalmente, el ejercicio involucra un grado de transparencia que no deja de presentar complicaciones. Datos tecnológicos y de emisión, que tradicionalmente se manejan con grados altos de confidencialidad, deben ser entregados a un representante nominado por cada asociación industrial, el que a su vez informa a un rapporteur del país miembro a cargo de la Evaluación. Sin embargo, la gravedad de las consecuencias de una EdR basada en datos incompletos ha llevado a superar la suspicacia entre competidores, reforzando de paso las organizaciones de la industria. Otro efecto interesante de la iniciativa de EdR europea es que, debido a que abarca todo el ciclo de vida del material, ha obligado a un fortalecimiento de los

lazos entre los niveles extractivo o minero, manufacturero y de fabricación y de reciclaje y recuperación, áreas que hasta hace unos años operaban con total independencia unos de otros para enfrentar temas regulatorios. Hay que tener presente que los intereses de estos sectores, a menudo, no coinciden (e.g., productores primarios versus recicladores).

En base a la experiencia de la industria del zinc, sectores vinculados a otros metales han iniciado procesos voluntarios de recolección de la información necesaria para la Evaluación de Riesgo, antes incluso que el metal aparezca entre las prioridades. Es el caso de la industria europea del cobre, que dio inicio a un proceso completo formal de Evaluación de Riesgo durante el 2001.

### Riesgos de una EdR

La enorme brecha de información científica existente en el conocimiento del destino, comportamiento fisicoquímico en medios naturales, toxicología y propiedades biológicas de los metales, sumada a un prejuicio negativo en su contra muy extendido en algunos países desarrollados, configuran un escenario amenazante en cuanto a la objetividad de procesos globales de evaluación de riesgo como el iniciado en la UE. Para las autoridades regulatorias la incertidumbre exige precaución, lo que se traduce en medidas de protección que pueden castigar a algunos productos en mercados con un nivel creciente de conciencia ambiental y preocupación por el bienestar y la salud humana.

### Clasificación de Peligrosidad: OECD

En 1992, la Conferencia de la ONU sobre Medio Ambiente y Desarrollo (UNCED) identificó la armonización de la clasificación y etiquetado de sustancias químicas como uno de los seis programas de acción en el Capítulo XIX de la Agenda 21. LA UNCED determinó que el International Program on Chemical Safety (IPCS) sería el núcleo para la cooperación internacional en los temas del Capítulo XIX. Bajo el alero del IPCS, se estableció un Grupo Coordinador para la Armonización de Sistemas de Clasificación Química (CG/HCCS) para promover y vigilar el

desarrollo de un sistema global armonizado (denominado GHS: globally harmonized system). Los objetivos de la armonización internacional son:

- mejorar la protección de la humanidad y el medio ambiente, generando un sistema internacionalmente comprensible para la comunicación de peligrosidad;
- generar un marco de referencia reconocido para los países que no tengan un sistema de clasificación;
- reducir la necesidad de realizar ensayos y evaluar sustancias químicas;
- facilitar el comercio internacional en sustancias químicas, cuya peligrosidad haya sido debidamente evaluada e identificada sobre una base internacional.

La primera prioridad fue el desarrollo de un sistema de clasificación armonizado de peligrosidad en varias áreas objetivo (endpoints of concern). La OECD fue identificada como Punto Focal para el trabajo en peligros para el ser humano y el medio ambiente y estableció el Grupo Consultor sobre Armonización de Clasificación y Etiquetado, con la función de desarrollar propuestas para un sistema de clasificación armonizado para la peligrosidad de sustancias para la salud humana y el medio ambiente<sup>14</sup>. Este grupo debe abordar la revisión de las siguientes áreas de peligrosidad:

- Peligrosidad para el Medio Acuático
- Toxicidad Aguda
- Irritación de la Piel/Corrosión
- Irritación Ocular/Corrosión
- Sensibilización
- Mutagénesis de Células Germinales
- Toxicidad Reproductiva
- Carcinogénesis
- Toxicidad Sistémica Orientada a Organo Objetivo (target organ)
- Mezclas Químicas
- Peligrosidad para el Medio Ambiente Terrestre
- Neurotoxicidad
- Inmunotoxicidad
- Peligrosidad por Aspiración
- Efectos Dérmicos Locales tras Exposición Repetida

<sup>14</sup> Esta reseña histórica ha sido sintetizada en extensión y número de siglas para proteger la integridad mental de los lectores.

En términos simples, el resultado de este Esquema de Clasificación será generar un sistema estandarizado de clasificación, al cual se someterá todo producto o material importado o producido en los países miembros. El producto saldrá de este proceso con un conjunto de etiquetas asociadas, indicando el nivel de peligrosidad que representa en cada uno de los aspectos de la lista. Si bien es probable que, en una primera etapa, el esquema se aplique sólo a los países de la OECD, con seguridad se buscará expandirlo a nivel global a través de una convención internacional.

Como en todo proceso regulatorio de alcance tan amplio, el desarrollo de este Esquema está preñado de potenciales dificultades para el sector industrial. Ninguna compañía quiere ver su producto cubierto de etiquetas con leyendas alarmantes, especialmente si por un mero resquicio del complejo proceso de clasificación, un producto competidor tiene menos etiquetas o éstas son de colores menos alarmantes.

En lo que sigue, examinaremos lo que involucra el proceso de clasificación de la peligrosidad de los metales para la vida acuática, y este ejemplo servirá para ilustrar los problemas que enfrenta la industria.

### Los Metales y su Clasificación de Peligro para la Vida Acuática

Como ya hemos señalado, la toxicidad para la vida acuática es el talón de Aquiles ambiental para los metales, debido a que se verifica a concentraciones muy bajas (del orden de millonésimas de gramo por litro). El Esquema de Clasificación de Peligrosidad para la Vida Acuática actualmente propuesto (fines de 2001), incluye un capítulo específico para el caso de los metales, en reconocimiento de sus propiedades únicas en este medio.

Todo metal o compuesto metálico sujeto al Esquema de Clasificación en lo referente a peligrosidad para el medio acuático debe ser clasificado en dos aspectos básicos: peligro agudo y peligro crónico<sup>15</sup>. El resultado de la clasificación se indicará en una etiqueta asociada al producto, la que llevará una o más

<sup>15</sup> Toxicidad aguda es aquella cuyos efectos se expresan poco tiempo después de la exposición a la toxina. Toxicidad crónica es aquella que se genera por exposición prolongada a la toxina (semanas, meses o años)

Frases de Peligro, que se indican en la Tabla 5. Además, las tres primeras clases llevarán una frase adicional de peligro: "Peligroso para el Medio Ambiente (Dangerous for the Environment)". Leyendo estas "frases" es fácil entender la preocupación que este sistema de clasificación provoca en los sectores industriales y productivos.

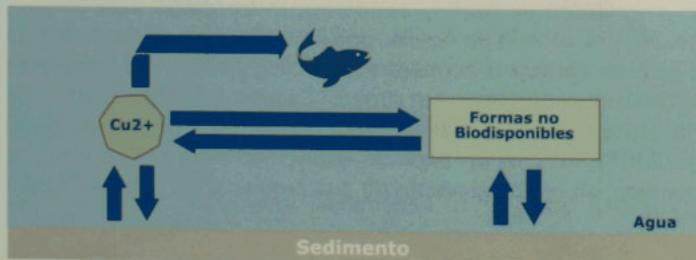
### - Criterios Crónicos

La clasificación de peligro crónico se basa en dos criterios ya examinados: persistencia (o su opuesto, la degradabilidad) y bioacumulación (o tasa de bioconcentración). Como ya discutimos, la aplicación a ciegas de estos criterios a los metales esenciales, no es adecuada. Gracias a los esfuerzos de la industria de metales europea, y la participación de científicos en el proceso de discusión del Esquema, se ha reconocido esta situación, aplicando importantes calificaciones al uso de estos conceptos en el caso de metales y compuestos metálicos, las que se reseñan a continuación.

#### a) Persistencia.

Recordemos que persistencia es la medida del tiempo que una sustancia permanece en un medio sin degradarse. En general, se considera que las sustancias más persistentes son más peligrosas y las más rápidamente degradables lo son menos. Ya presentamos las razones por las cuales no parece adecuado usar este criterio a metales y sus compuestos.

Figura 11  
Posibles destinos  
de un átomo de  
metal  
en un cuerpo de  
agua natural.



El tema de la persistencia es abordado en el Esquema de Clasificación a través del criterio de degradabilidad: la velocidad de descomposición de moléculas orgánicas en moléculas menores y eventualmente en dióxido de carbono, agua y sales. El documento

de la propuesta reconoce, sin embargo que para compuestos inorgánicos y metales, "el concepto de degradabilidad tiene muy poco o ningún sentido. Más bien, en este caso, la sustancia puede ser transformada por procesos ambientales normales ya sea para aumentar o disminuir la biodisponibilidad de la especie tóxica".

Como se muestra en la Figura 11, un metal en un cuerpo de agua puede transformarse entre distintos estados. Por ejemplo, puede pasar de forma iónica a forma acomplejada en una partícula mineral y sedimentar, dejando de estar disponible para tener efecto sobre un ser vivo, a menos que se verifique la transformación inversa. Con respecto a esto último, el Esquema advierte que debe tenerse en cuenta el potencial del metal para revertir a una forma biodisponible.

Este reconocimiento es un gran paso en el camino hacia una evaluación regulatoria de los metales más ajustada a su realidad química y biológica. Se acepta que sólo ciertas formas del metal son tóxicas y que la concentración de éstas varía según las condiciones ambientales. Esto encierra un reconocimiento implícito que la peligrosidad de un metal es función de la presencia de sus formas tóxicas, no de la persistencia en sí del metal como elemento en el medio.

## b) Bioacumulación

Recordemos que la bioacumulación es el aumento de la concentración de una sustancia en los tejidos de un ser vivo, hasta niveles muy superiores a la concentración de la misma sustancia en el medio que lo rodea. Para sustancias no naturales parece un criterio razonable, pensado para impedir la acumulación de moléculas extrañas en los seres vivos, y con ello un daño biológico potencial o efectivo.

Para elementos esenciales, sin embargo, es un criterio muy inapropiado. Por ejemplo, un ser vivo en cualquier medio es un concentrado de carbono y nitrógeno, entre muchas otras cosas. En ese caso, es fácil ver que la bioacumulación no es una señal de riesgo, sino señal de que los mecanismos biológicos que hacen posible la vida están funcionando apropiadamente. Lo mismo es válido para los metales esenciales.

El Esquema de Clasificación, por una parte reconoce que no pueden aplicarse a los metales los criterios clásicos usados para sustancias orgánicas, y explícitamente hace referencia a la relación inversa entre bioconcentración y nivel del metal en el medio, para elementos esenciales (ver Figura 10). Por otra parte, advierte que para algunos metales la bioacumulación debe tomarse como un indicador de riesgo de un efecto nocivo, pero indica que cada caso tendrá características particulares. Como recomendación general, aconseja examinar cada caso por separado, y recurrir a la opinión de expertos para llegar a una clasificación en este aspecto.

Puede considerarse que la propuesta representa un gran avance conceptual para los metales, en relación al criterio PBT tal como nació al abrigo de la EPA. Es particularmente relevante que se haya aceptado incorporar un reconocimiento explícito de las peculiaridades de los metales esenciales y establecer una diferencia con los no esenciales.

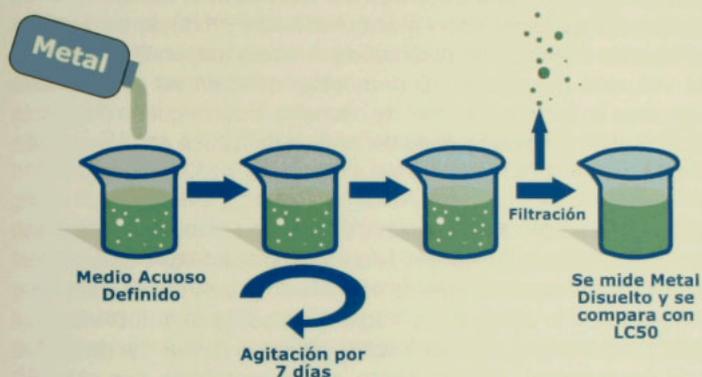
**Tabla 5**  
Frasas de peligro para la vida acuática asociadas a las clases de peligro del esquema OECD.

Frase de Peligro - Agudo	Frase de Peligro - Crónico
Muy tóxico para organismos acuáticos	Aguda I
Muy tóxico para organismos acuáticos	Puede causar efectos adversos a largo plazo en el medio acuático Aguda I Crónica I
Tóxico para organismos acuáticos	Puede causar efectos adversos a largo plazo en el medio acuático Aguda II Crónica II
Dañino para organismos acuáticos	Puede causar efectos adversos a largo plazo en el medio acuático Aguda III Crónica III

### - Criterio Agudo

La clasificación por peligrosidad aguda es función de dos variables: la toxicidad del metal disuelto y la solubilidad del metal o compuesto metálico en un medio acuoso definido. El procedimiento para clasificar es comparar ambas variables, de manera que si la solubilidad es mayor o igual que el parámetro que mide la toxicidad (LC50), entonces se clasifica al metal o compuesto como Agudo. Pero, como se muestra en la Tabla 5, existen 3 clases de Peligrosidad Aguda (I, II y III) en orden decreciente de severidad. La clasificación en una de ellas depende también del grado de solubilidad del metal o compuesto.

Muchos metales y compuestos metálicos exhiben una solubilidad muy baja en agua. Sin embargo, cuando el metal está en contacto con un medio acuoso por un tiempo prolongado, se dan diversos procesos fisicoquímicos que pueden ir liberando pequeñas cantidades del metal en forma soluble, o sea más biodisponible, al medio. Para cubrir esta posibilidad, el Esquema



**Figura 12**  
Esquema del Protocolo de Disolución-Transformación para metales en agua. Las condiciones del medio y de la agitación, así como la forma del metal y el tamaño de partícula, determinarán que cantidad del Metal se disuelve.

de Clasificación incorpora un instrumento denominado Protocolo de Disolución/Transformación (PD&T), ilustrado en forma esquemática en la Figura 12. En síntesis: partículas del metal o compuesto se agregan a una solución acuosa con características definidas y la mezcla se agita durante 7 días. Después, la solución se filtra para eliminar el metal particulado no disuelto, y se mide cuánto metal pasó a la solución. Por supuesto este valor depende de una serie de condiciones que deben definirse a priori, entre ellas:

1. Cantidad de Metal. La cantidad de metal agregado a la solución determinará si la clasificación es Aguda I, II o III, de la siguiente forma:

- 1 mg por litro y Metal Disuelto mayor o igual que LC50: Aguda I
- 10 mg por litro y Metal Disuelto mayor o igual que LC50: Aguda II
- 100 mg por litro y Metal Disuelto mayor o igual que LC50: Aguda III

La única manera de que un metal no sea clasificado es que su solubilización a la carga máxima sea menor que el LC50.

2. **Tamaño de Partícula.** En general, mientras más pequeño el tamaño de partícula mayor es el potencial de disolución del metal, puesto que en partículas más pequeñas la relación superficie/volumen es mayor. Para los compuestos que se comercializan en forma granulada, el Esquema establece que debe usarse el tamaño de partícula promedio al cual se comercializa el producto. Para aquellas formas del metal que se comercializan en volúmenes grandes, el Esquema establece un tamaño de partícula de 1 mm de diámetro, a menos que se demuestre que en el uso y manipulación del producto se generan partículas mínimas de un tamaño promedio mayor. Por ejemplo, la industria del zinc logró demostrar que, en su caso, debía aplicarse un tamaño de 3 mm de diámetro. Esta pequeña diferencia de 2 mm en diámetro puede ser muy significativa en el resultado del Protocolo.

3. **Nivel de acidez de la solución.** En general, mientras más ácida es una solución (a menor pH), mayor es la solubilidad de un metal en ella. Para algunos metales este efecto puede llegar a ser muy dramático. Por ejemplo, la Tabla 6 presenta la solubilidad del cobre metálico y el óxido de cobalto a grados crecientes de acidez (pH decreciente). Para el cobre, se ha propuesto que el LC50 que se debe usar para comparar con la solubilidad es 0,029 mg/l. En ese caso, el cobre clasificaría como Agudo a pH 6 ( $0,123 > 0,029$ ), pero no a pH 7 ( $0,0012 < 0,029$ ). El Protocolo establece que se debe usar el valor máximo que se obtenga en el rango de pH entre 6 y 8,5. Para el cobre, esto equivale a establecer el grado de disolución a pH 6 como el punto de comparación.

**Tabla 6**  
Solubilidad de cobre  
y óxido de cobalto a  
distintos niveles de  
acidez de la  
solución.

Sustancia	Acidez (a menor pH, mayor acidez)			
	pH8	pH7	pH6	pH5.5
	<b>Solubilidad (mg/L)</b>			
<b>Cobre</b>	<b>0,000012</b>	<b>0,0012</b>	<b>0,123</b>	<b>1,14</b>
<b>Oxido de cobalto</b>	<b>0,0000003</b>	<b>0,00003</b>	<b>0,040</b>	<b>0,037</b>

4. Presencia de compuestos con capacidad de formar un complejo con el metal. Como ya hemos señalado, los metales en solución tienden a unirse a otras moléculas o partículas y, si éstas son insolubles, el metal deja de estar disponible para otras interacciones. Las aguas naturales, a menudo, contienen materia orgánica o partículas inorgánicas que tienen el efecto de reducir la cantidad de metal disuelto (y biodisponible). Sin embargo, el PD&T se realiza en un medio químicamente muy simple, que sólo contiene sales inorgánicas disueltas; es decir, su capacidad complejante del metal es mínima. En este sentido el Protocolo opta por un escenario precautorio con la situación más desfavorable posible para metales en aguas.

Como es de imaginar, para la gran mayoría de los productos de cobre (así como para otros metales y, más en general, materiales), no existen datos sobre su solubilidad en las condiciones definidas por el Protocolo D&T. De hecho, ni siquiera existen datos para saber si es posible plantear con fundamentos que, para aquellos que se comercializan en forma masiva, deba usarse un tamaño de partícula mayor a 1 mm. Nuevamente, corresponderá a la industria generar la información que falta.

### Riesgos de la Clasificación de Peligrosidad de la OECD

El diseño del Protocolo de Disolución & Transformación para metales en agua hace altamente probable que muchos metales sean clasificados como peligrosos para el medio acuático. Para el cobre, es muy probable que en muchas de sus formas éste reciba la peor clasificación en la categoría aguda (Peligrosidad por Toxicidad Aguda I). Esto no implica que el cobre sea peligroso para el medio acuático, o al menos más peligroso que otros productos que no serán clasificados como tales. Esta clasificación sería el resultado predecible de un esquema clasificatorio que se basa en condiciones de ensayo que no son realistas y basadas en los peores escenarios de exposición pensables, los que se dan muy rara vez en la realidad. Respecto a la categoría crónica, aunque el cobre está en mejor posición gracias a la aceptación de las características naturales intrínsecas de los metales esenciales, su clasificación estará sometida a la base de datos que se use y a su interpretación por los expertos designados. Es de esperar que en desarrollos posteriores, como la expansión de

este esquema a nivel global, estas condiciones puedan modificarse sobre la base de la evidencia científica existente. En tal caso, podemos pensar en esta posible clasificación como un estado provisional.

En todo caso, debe tenerse en cuenta que muchos detalles importantes de la aplicación del Protocolo de Disolución/Transformación aún están sometidos a discusión y análisis, y que lo indicado en el párrafo anterior no es necesariamente un resultado inevitable.

La participación de la industria en el ejercicio de desarrollo del Esquema de Clasificación demostró que la inversión de capacidades y recursos por parte de la industria produce resultados positivos. Sin embargo, una vez más, se demostró que la brecha existente de información científica sobre los metales en el medio ambiente debe subsanarse al más breve plazo posible.

## **Desechos Metálicos - La Convención de Basilea**

La Convención de Basilea sobre el Control de Movimientos Transfronterizos de Desechos Peligrosos y su eliminación fue adoptada en 1989 en Basilea, Suiza, entró en vigencia en 1992 y a fines del 2001 había sido ratificada por 148 países, entre ellos Chile. Como lo sugiere su nombre, nació de la preocupación generada por el transporte sin control de desechos peligrosos, principalmente desde países desarrollados (que los generaban) a países en desarrollo, donde se disponía de ellos sin consideración del riesgo que representaban para la salud humana y el medio ambiente. En términos generales, la Convención busca instaurar tres principios rectores del manejo de los desechos peligrosos en el mundo:

- Reducción al mínimo del movimiento transfronterizo
- Disposición de ellos lo más cerca posible de su fuente
- Reducción al mínimo de su generación

Para lograr esto una de las primeras tareas a la que se abocó fue generar un sistema para decidir qué es un desecho peligroso (DP). Primero, son DP todos aquéllos que sean así calificados por un Estado importador, exportador o de tránsito.

Segundo, para decidir qué desechos son peligrosos se usa un mecanismo de dos listas: i) de categorías de desechos; ii) de características de peligrosidad. Si un desecho pertenece a una de las categorías de la primera y tiene alguna de las características de la segunda, entonces es un DP.

¿En qué consiste la lista de Categorías de Desechos? Se trata de una lista con dos partes. La primera, de "corrientes de desechos" enumera 18 Clases de desechos, entre ellos:

- desechos clínicos resultantes de la atención médica prestada en hospitales, centros médicos y clínicas
- desechos resultantes de la fabricación, preparación y utilización de productos químicos para la preservación de la madera
- ...etc.

La segunda parte de la lista de Categorías de Desechos enumera sustancias que pueden formar parte de desechos, por ejemplo: metales carbonilo; compuestos de cobre; compuestos de cromo hexavalente; arsénico y compuestos de arsénico, etc.

¿En qué consiste la lista de Características de Peligrosidad? Esta lista enumera 9 categorías de peligrosidad del sistema de Naciones Unidas, entre ellas:

Clase 1 – Explosivos

Clase 5 – Oxidantes

Clase 9 – Sustancias tóxicas y sustancias ecotóxicas

En principio al menos, el sistema parece simple de aplicar y sin ambigüedades. Si un desecho está en la lista de corrientes de desechos o contiene una de las sustancias de la lista de constituyentes y, adicionalmente, tiene una o más de las características de Peligrosidad, entonces es un DP.

Como es de suponer, sin embargo, como todo instrumento producto de una negociación entre países con intereses muy dispares, este criterio es cualquier cosa menos simple de aplicar.

Esto ocurre porque si bien el sistema de clases de peligrosidad de la ONU es relativamente claro en su aplicación, fue desarrollado para sustancias químicas y no para desechos. Las sustancias químicas tienen una fórmula y composición definida, lo que permite conocer fácilmente si son corrosivas, explosivas, etc. Y en caso de dudas, se han definido ensayos y mediciones estándares para cada categoría, los que son aceptados universalmente. En el caso de desechos, en cambio, se trata de mezclas altamente variables y heterogéneas de compuestos, cuya composición precisa es a menudo desconocida, y en las cuales los elementos constituyentes pueden reaccionar entre sí, generando mayor heterogeneidad y variabilidad de composición.

Por esta razón, una de las tareas encargadas al denominado Grupo de Trabajo Técnico de la Convención fue desarrollar criterios para la aplicación de las citadas características de peligrosidad a los desechos, labor que continúa en desarrollo a inicios de 2002. Sin embargo, en las discusiones preparatorias para el establecimiento de tales criterios, ya se perfilan los problemas que tendrán los metales, que son prácticamente los mismos que han tenido en otros esquemas regulatorios.

En particular, en la aplicación de la característica de peligro H12, Ecotoxicidad, nos encontramos nuevamente con malentendidos similares a los descritos para la evaluación de peligrosidad de metales en aguas naturales. Una propuesta de criterios de ecotoxicidad, desarrollada por Dinamarca, plantea tanto la falta de degradabilidad como el potencial de bioacumulación, como criterios de ecotoxicidad para metales. Como ya lo hemos discutido, estos criterios no son aplicables a este tipo de elementos. También, los criterios no consideran la biodisponibilidad variable de los metales, lo que en el caso de desechos metálicos se complica, particularmente por la potencial complejidad y heterogeneidad de aleaciones y mezclas que puedan existir en los mismos.

No es fácil predecir qué curso tomará esta discusión en el futuro cercano, pero es probable que el tema de la caracterización de Ecotoxicidad se asocie al esquema global de clasificación de peligrosidad que está desarrollando la OECD. En tal caso, es muy posible que la decisión de clasificar como peligroso un desecho metálico termine pasando por el Protocolo de Disolución

y Transformación, el que, como ya indicamos, es particularmente severo para metales, especialmente si se usan tamaños muy pequeños de partículas.

Alternativamente, podría aplicarse a los desechos el procedimiento desarrollado por la OECD para mezclas, aunque es difícil imaginar un procedimiento sistemático para establecer los componentes (y sus proporciones) de un desecho.

### El Sistema de Listas de Desechos

No es posible tratar el tema de la Convención sin hacer al menos una reseña del tema de las listas de desechos y la situación de los metales en ese esquema.

Con el fin de hacer posible la implementación de algunas medidas aplicables a los desechos peligrosos, sin esperar a que se resuelva el tema de las características de peligro, la Convención decidió establecer un sistema de dos listas: i) desechos considerados peligrosos para los fines de la Convención; ii) desechos considerados no peligrosos para los fines de la Convención<sup>16</sup>. Ambas listas no son herméticas, es decir un desecho de la lista no peligrosa puede ser peligroso en un caso particular, y viceversa, pues la peligrosidad sigue estando, en último término, determinada por el uso conjunto de las categorías de desechos y de peligrosidad (ver más arriba).

Este mecanismo simplificador tuvo por objeto hacer aplicable, a corto plazo, la prohibición de movimientos transfronterizos de desechos "peligrosos" desde países desarrollados a países en desarrollo<sup>17</sup>. Por ello era importante para la industria de los metales y los recicladores de metales, qué destino se daba a los desechos metálicos en el sistema de listas. Particularmente considerando que las Categorías de Desechos mencionadas incluyen los desechos que contengan: cadmio y compuestos de cadmio, compuestos de cobre y compuestos de zinc, entre otros metales.

En particular para Chile, así como para la industria cuprera mundial, la presencia de los compuestos de cobre entre los componentes de desechos potencialmente peligrosos fue una

<sup>16</sup> Estas listas fueron incorporadas a la Convención como Anexos VIII (peligrosos) e IX (no peligrosos).

<sup>17</sup> Este es el efecto práctico de la Decisión III/1, aún no incorporada (Marzo del 2002) a la Convención pues no ha sido ratificada por el número mínimo requerido de Partes.

legítima fuente de preocupación. Una de las características ambientalmente más positivas del cobre es su altísimo potencial de reciclabilidad. Se estima que en EEUU y Europa, más de un 50% del consumo de cobre corresponde a cobre reciclado de chatarra<sup>18</sup>. Claramente, una normativa internacional que colocara cortapisas al movimiento de desechos de cobre podría impactar muy negativamente este aspecto del negocio del metal.

Por esta razón, Chile tuvo una destacada participación en la conformación de las dos listas (ahora Anexos VIII y IX del Convenio), aportando con antecedentes metalúrgicos y químicos sobre desechos de gran importancia para nuestro país, como la escoria generada en las fundiciones de cobre, la que terminó en la Lista "no peligrosa".

Las comillas indican que la clasificación es temporal, y que podría cambiar como resultado de la aplicación de un esquema específico, como por ejemplo el Protocolo de Disolución/Transformación de la OECD.

En último término, en cuanto a desechos que contienen cobre, hay varios que quedaron en la lista de peligrosos (Anexo VIII):

- Cenizas de la incineración de cables de cobre recubiertos
- Polvos y residuos de los sistemas de depuración de gases de las fundiciones de cobre
- Soluciones electrolíticas usadas de las operaciones de refinación y extracción electrolítica del cobre
- Lodos residuales, excluidos los fangos anódicos, de los sistemas de depuración electrolítica de las operaciones de refinación y extracción electrolítica del cobre
- Soluciones usadas de ácidos para grabar, que contengan cobre disuelto
- Desechos de catalizadores de cloruro cúprico y cianuro de cobre

Otro grupo en tanto quedó en la lista de no peligrosos (Anexo IX):

- Chatarra de cobre
- Desechos de cobre y de aleaciones de cobre en forma dispersable
- Escorias de la elaboración del cobre destinado a una elaboración

<sup>18</sup> De acuerdo a la International Copper Association.

o refinación

- Desechos de revestimientos refractarios, con inclusión de risoles, derivados de la fundición del cobre
- Escamas de laminado del óxido de cobre

El caso de la Convención de Basilea ilustra un principio interesante y muy delicado para los metales: en ausencia de conocimiento científico suficiente y adecuado, las entidades reguladoras tienden a copiar esquemas desarrollados con otros fines, los que no necesariamente son apropiados para el fin que se persigue. Debido a su origen, los desechos suelen ser mezclas complejas y heterogéneas de compuestos tan diversos como plásticos y metales, cuyas propiedades físicas y químicas generalmente se desconocen. Además, no se generan con composiciones predecibles ni ajustadas a un estándar. Esto implica que un ensayo realizado con un desecho puede no ser representativo del mismo desecho originado en otro lugar o planta industrial. Esto encarece las demandas financieras de posibles programas de análisis. La incertidumbre resultante favorece los criterios precautorios, llevando a clasificaciones más duras que no necesariamente reflejan el riesgo real del material.

### El Escenario Regulatorio Nacional

- Anteproyecto de Normas de Calidad para la Protección de Aguas Continentales Superficiales

Como lo indican las definiciones del recuadro, una norma de calidad establece los valores de algún parámetro del agua, suelo, aire o sedimentos, que una sociedad considera aceptables para asegurar la protección de los seres humanos (primaria) o el medio ambiente natural (secundaria).

**Norma Primaria de Calidad Ambiental:** aquélla que establece los valores de las concentraciones y períodos, máximos o mínimos permisibles de elementos, compuestos, sustancias, derivados químicos o biológicos, energías, radiaciones, vibraciones, ruidos o combinación de ellos, cuya presencia o carencia en el ambiente pueda constituir un riesgo para la vida o la salud de la población.

Norma Secundaria de Calidad Ambiental: aquélla que establece los valores de las concentraciones y períodos, máximos o mínimos permisibles de sustancias, elementos, energía o combinación de ellos, cuya presencia o carencia en el ambiente pueda constituir un riesgo para la protección o la conservación del medio ambiente, o la preservación de la naturaleza.

Las normas de calidad son muy importantes, pues fijan el techo del rango de estados aceptables para cada medio natural, y por ende establecen el criterio para definir normas de emisión. La cantidad de una sustancia que la autoridad puede permitir eliminar a un medio nunca debe superar aquélla que resulte en una concentración final de la sustancia superior a la norma de calidad correspondiente. Esto implica que en una cronología regulatoria adecuada, la dictación de la norma de calidad debe preceder a la de emisión. Por diversas razones, este orden no se respetó en el caso de Chile, y la Norma de Emisión de contaminantes a cuerpos de agua entró en vigencia en 2001, mientras que el Anteproyecto que analizamos no lo hace a esta fecha.

El Anteproyecto en cuestión, establece un sistema complejo de regulación para la Norma de Calidad Secundaria, basado en la protección de diferentes aspectos asociados al agua o usos de la misma. Estos aspectos y usos son, en orden decreciente de calidad del agua:

- Valor patrimonial
- Protección y conservación de las comunidades acuáticas; riego irrestricto
- Acuicultura; pesca deportiva y recreativa
- Bebida animal y riego restringido

La protección de estos aspectos y usos va asociada a un sistema de clasificación de las aguas en 4 clases, según se ilustra en la Tabla 7. En esta lógica, entonces, la Clase E (por "excepcional") tiene las máximas exigencias de calidad (en general límites tolerados de sustancias más bajos) y por ello constituye agua adecuada para todos los usos considerados por el Anteproyecto. La clase 3, en cambio, tiene límites mucho menos exigentes y se considera adecuada sólo para riego con restricciones y bebida de animales.

	Valor Patrimonial	Protección de Comunidades Acuáticas	Riego Irrestringido	Acuicultura y Pesca Deportiva	Bebida de Animales y Riego Restringido
Clase E					
Clase 1					
Clase 2					
Clase 3					

**Tabla 7**

Esquema de clases de Calidad de Agua del Anteproyecto de Normas de Calidad para Protección de Aguas Continentales Superficiales. El color oscuro indica que la clase correspondiente de aguas es adecuada para ese uso.

En términos muy escuetos, la forma en que procede la aplicación de la norma es la siguiente. En un plazo dado, se informa sobre la calidad actual de los cuerpos de agua del país. Existe un procedimiento para definir una "calidad objetivo" para cada cuerpo de agua, es decir la clase de agua que se quiere tener. Dependiendo de la relación entre la calidad actual y la deseada, se adoptan o no medidas de descontaminación para cada cuerpo de agua.

Sin entrar al análisis de las muchas complejidades involucradas en la aplicación de una norma con este tipo de estructura, centraremos nuestra discusión en los aspectos relacionados con los metales.

Como ya lo hemos discutido, el principal problema que una regulación puede presentar para los metales es su rigidez, es decir que no incorpore flexibilidades que tengan en cuenta las características específicas locales, en este caso, de cada cuerpo de agua. Afortunadamente, el Anteproyecto en cuestión incorpora tales flexibilidades.

Primero, el Anteproyecto establece valores límites de concentración para el metal total disuelto, esto es el metal medido en una muestra pasada por un filtro de 0,45 micrones de tamaño de poro, y no para el metal total. Aunque tímido, éste es un paso significativo hacia aceptar la distinción de fracción biodisponible.

En segundo lugar, el Anteproyecto incorporó, para la norma de calidad secundaria, correcciones de los límites de concentración según la dureza del agua para cinco metales: cobre, níquel, zinc, cadmio y plomo. La dureza del agua es una medida de la concentración de cationes divalentes, en particular

de calcio y magnesio. Estos cationes tienen un efecto protector para especies acuáticas expuestas a un metal. Por ello, mientras más dura el agua, mayor puede ser la concentración del metal sin presentar riesgo para animales y plantas. Por ejemplo, los límites para cobre para la clase 1 para distintas durezas son los indicados en la Tabla 8. El límite se calcula con una ecuación incluida en el Anteproyecto, y que corresponde a la utilizada por la Agencia de Protección Ambiental de los EEUU.

**Tabla 8**  
Límites para Cu  
para aguas de Clase  
1 como función de  
dureza de agua.

<b>Dureza (mg/L)</b>	<b>Límite para Cobre Agua Clase 1 (ug/L)</b>
<b>10</b>	<b>1,3</b>
<b>50</b>	<b>5,0</b>
<b>100</b>	<b>9,0</b>
<b>500</b>	<b>35,4</b>
<b>700</b>	<b>47,2</b>

Un segundo nivel de flexibilidad de la norma reside en el mecanismo para definir la calidad objetivo, como lo señala la letra d) del Artículo 15 del Anteproyecto:

"En el proceso de asignación de la calidad objetivo, los valores de concentración del compuesto o elemento, podrán ser modificados sobre la base de la calidad natural y de los criterios sitio-específicos a los que hace referencia el número 7 del artículo 2º de este decreto, y que resulten de los estudios o investigaciones científicas a que se refiere el Título II y III del Reglamento para la Dictación de Normas de Calidad Ambiental y de Emisión ya mencionado".

Por su parte, el número 7 del artículo 2º señala que:

"...La calidad objetivo será determinada sobre la base de los usos prioritarios actuales, potenciales o futuros, la existencia de comunidades acuáticas, la calidad existente al iniciarse el proceso

de implementación de la calidad objetivo y el nivel de trofia que se desee conservar o recuperar para el caso de los cuerpos lacustres. Asimismo, en dicho proceso se considerará la calidad natural del recurso y criterios sitio-específicos como la sensibilidad de las especies a las condiciones del medio natural en que habitan, las características físicas y químicas particulares del lugar que alteran la biodisponibilidad, la toxicidad y/o la existencia de recursos hídricos con características únicas escasas y representativas".

De manera que el Anteproyecto incorpora explícitamente el concepto de biodisponibilidad variable de las sustancias, y declara que esta variabilidad es función de características físicas y químicas locales. Desde este punto de vista, los valores límites para la norma de calidad secundaria que se indican en la tabla correspondiente del Anteproyecto no son más que valores de referencia, que podrán ser modificados de acuerdo a la realidad local de cada cuerpo de agua. Para la industria del cobre, ésta es una solución muy satisfactoria, pues el Anteproyecto hace suyos muchos de los conceptos que ésta ha defendido, con diversos grados de éxito, en los escenarios regulatorios nacionales e internacionales.

Por último, la Norma incorpora la distinción entre metales esenciales y no esenciales. Aunque esto no tiene un efecto práctico sobre su aplicación, el reconocimiento de la calidad de esencial es un avance conceptual importante.

### - La Norma de Descarga de Residuos Líquidos a Aguas Superficiales

También conocida como la "Norma de Riles", se trata de una norma de emisión, es decir la que regula las concentraciones (y o cantidades) de contaminantes contenidos en un residuo líquido que pueden descargarse a ríos, esteros, lagos y el mar. Como ya lo indicamos, esta normativa se dictó con anterioridad a la respectiva norma de calidad, entrando en vigencia en el año 2001.

La Norma distingue entre dos situaciones posibles: cuando

el residuo líquido se descarga a un cuerpo de agua sin capacidad de dilución (por ejemplo, el lecho seco de un río) y cuando éste tiene capacidad de dilución. En el primer caso, la Norma establece un límite máximo para una serie de sustancias, incluidos varios metales. Para el caso del cobre, el límite es de 1 miligramo por litro. Posiblemente, este valor se tomó del límite normado para cobre en agua potable.

En el caso que el cuerpo de agua tenga capacidad de dilución (o sea tenga un caudal distinto de cero) la Norma establece que el emisor puede aumentar el contenido de cobre como función de la relación entre el caudal del residuo y el del cuerpo de agua que lo recibe, como se ilustra en la Figura 13.

Figura 13

Límite para cobre en el efluente como función de la capacidad de dilución (caudal del cuerpo receptor dividido por caudal del efluente) según la Norma de Riles.



En otras palabras, al aumentar el caudal del río, se aumenta el límite permitido desde el valor del límite de 1 mg/l hasta el punto en que el caudal del río es el doble del caudal del residuo, punto en el cual se llega al segundo límite establecido por la Norma, de 3 mg/l en el caso del cobre. A mayores caudales este límite se mantiene. Es decir, la Norma está diseñada para que la concentración final del contaminante en el cuerpo de agua nunca supere el primer límite, de 1 mg/l en el caso del cobre.

Esta peculiaridad de la Norma genera una situación curiosa. Al establecer un techo normativo (de 3 mg/l en el caso del cobre) a un nivel relativamente bajo de dilución (1 a 2, en este caso), la Norma no incentiva los esfuerzos que los emisores

puedan hacer para reducir el volumen de residuo o la concentración de contaminante en el mismo. Por ejemplo, si la concentración de cobre en el residuo es de 3 mg/l y la relación caudal de río a residuo es de 2 a 1, se está en cumplimiento y no hay nada que motive al emisor a reducir su emisión.

Para el cobre, la Norma explícitamente indica que lo que se regula es cobre total. Esto, junto con el límite elegido de 1 mg/l, sugiere que la normativa fue diseñada para proteger la salud humana de la exposición por la vía del consumo del agua. Como lo indican los límites propuestos en el Anteproyecto de la norma de calidad respectiva (ver punto anterior) la protección de la vida acuática, u otros usos, habría determinado niveles muy inferiores a 1 mg/l, sujetos a las condiciones físicas y químicas locales.

Debido a que la futura norma de calidad de aguas superficiales establecería niveles permitidos mucho más bajos para la mayoría de las clases de agua, cuando ella entre en vigencia, y se ponga en marcha el sistema de designación de calidades objetivo, serán esas Normas de Calidad Objetivo, aplicadas a cada cuerpo de agua, las que determinarán los niveles permitidos de descarga por la vía de planes de descontaminación.

Es interesante comparar el procedimiento elegido en Chile con el usado, por ejemplo, en EEUU, donde los permisos de descarga tienen una larga historia regulatoria. En ese país los permisos de descarga se establecen sobre bases hidrológicas locales, de tal forma que la concentración final del contaminante nunca supere la norma de calidad respectiva modificada por un factor denominado Tasa de Efecto del Agua (Water Effect Ratio).

En términos muy simples, esta tasa se calcula dividiendo un parámetro de toxicidad determinado en el agua del cuerpo receptor por el mismo parámetro determinado en agua de laboratorio. Así, por ejemplo, si en el agua del río, se obtiene un LC50 de 0,5 mg/l y en el medio de laboratorio se obtiene un LC50 de 0,1 mg/l, la tasa es igual a 5. Esta tasa se usa para incrementar el valor de la norma de calidad correspondiente en un factor igual a 5. Naturalmente, la tasa de efecto del agua puede tener un valor menor que 1, por ejemplo si las características del agua del río aumentan la biodisponibilidad del compuesto. En tal caso, la norma de calidad aplicada se reducirá proporcionalmente, y con

ella el nivel permitido de descarga del contaminante.

Si bien este enfoque tiene la virtud de incorporar el efecto de las condiciones específicas de cada cuerpo de agua, su aplicación implica un grado significativo de complejidad práctica y costos asociados, debido a la necesidad de realizar ensayos toxicológicos para cada caso, responsabilidad que reside en la empresa emisora.

En el año 2000, la Agencia de Protección Ambiental de los EEUU inició un proceso para evaluar el uso del Modelo de Ligando Biótico en la regulación de los niveles permitidos de descarga de cobre y plata. Esto permitiría determinar los niveles permitidos de descarga, sobre la base de la medición de un conjunto limitado de características fisicoquímicas del agua, ahorrando así los costos asociados a la realización de ensayos toxicológicos.

## PARTE III

### Riesgo, Precaución y Ciencia en el Desarrollo de Regulaciones

#### Ciencia y Decisiones Regulatorias

Para cualquier persona que haya estado involucrada en un proceso de desarrollo de regulaciones ambientales, es evidente que se trata de actos de equilibrio muy complejos, no sólo desde un punto de vista técnico sino, y más crucialmente, desde uno político.

Desde el punto de vista técnico, nos encontramos con que a menudo las regulaciones ambientales deben moverse en territorios que la ciencia conoce sólo parcialmente. A esto se opone la necesidad del regulador de contar con herramientas simples: fáciles de aplicar y que den respuestas no ambiguas. La respuesta simplista a este conflicto es el principio precautorio en sus formas más extremas: ante la duda, mejor abstenerse. Todos sabemos, sin embargo, que esto nos lleva a otro conflicto, el de la necesidad de compatibilizar la protección del medio ambiente con el crecimiento y desarrollo económico.

Desde el punto de vista político, la situación es aún más compleja. La autoridad busca, legítimamente, aparecer ante la opinión pública como un defensor de la calidad de vida y aquellos valores ambientales que las personas perciben como importantes. Por otra parte, no quiere poner obstáculos insuperables a la actividad económica. En el otro extremo, algunos grupos activistas que se ven como defensores del medio ambiente profesan posturas políticas que se oponen al crecimiento económico basado en la gran industria, el mercado libre, el capitalismo, etc. Para éstos, los controles regulatorios son una necesidad absoluta y presionan, a veces con éxito, por la adopción de regulaciones más restrictivas. La opinión pública fluctúa entre ambas posturas, acercándose más a una u otra dependiendo de los ciclos económicos y las posturas que ofrecen los medios de comunicación.

A menudo la autoridad intenta remitir la solución de este conflicto al arbitraje de la ciencia, que es concebida como un juez objetivo o imparcial, libre de intereses ajenos a la "verdad" científica. La experiencia indica que esta estrategia no es muy exitosa, por varias razones.

Primero, el tema regulatorio generalmente involucra



sistemas altamente complejos y heterogéneos, para los cuales la ciencia no ha desarrollado modelos realistas e integrales; es decir, que sean aplicables con precisión a situaciones específicas y abarquen el espectro de fenómenos desde todas las áreas de la ciencia (química inorgánica y orgánica, fisicoquímica, biología molecular, bioquímica, toxicología, ecología, etc). Este tipo de enfoque, englobado en lo que se ha denominado Ciencias de la Tierra, está en una etapa muy temprana de su desarrollo. Por lo tanto, generalmente se cuenta con puntos de vista acotados a una perspectiva predominante, la que está más desarrollada en el tema o simplemente más a mano. No es extraño que, en tales casos, baste con aplicar otra perspectiva para tener una polémica sin destino entre científicos con igual grado de calificación.

Segundo, como ya lo indicamos, la ciencia no puede demostrar un negativo o la ausencia de un nexo causal. No está en el dominio de la ciencia demostrar proposiciones del tipo "La sustancia X no causa cáncer". La ciencia, sí puede decir: "La sustancia X, administrada en tal dosis, por tal vía, durante tanto tiempo, a tales animales experimentales, no aumentó (o sí aumentó) en forma estadísticamente significativa la frecuencia de tales tipos de tumores cancerígenos, en comparación con animales a los que se administró una sustancia control en tales condiciones". Todas las conclusiones que puedan derivarse de esta afirmación objetiva y técnica, ya no pertenecen al mundo de la ciencia. Si se extrapola de los animales experimentales al ser humano, si se extrapola para otra dosis, forma de la sustancia o vía de exposición, etc., se está usando información científica para especular.

Esto implica que la ciencia no puede asegurar en forma absoluta la inocuidad de una sustancia para el ser humano o el medio ambiente. Siempre es posible pensar que si la sustancia no produjo el efecto en tales condiciones, lo podría producir en otras. Y si en éstas tampoco lo produce, entonces imagino otras condiciones...y así ad infinitum. El público y las autoridades deben entender que ésta es una limitación constitutiva e irremediable de la ciencia, no un defecto de los científicos. Como dice el refrán popular: no hay que pedirle peras al olmo.

Tercero, con más frecuencia de lo esperado por la opinión pública, los científicos no están de acuerdo en la explicación de

un mismo fenómeno. Mirado desde el interior de la ciencia, esto es natural y sano. La ciencia no tiene verdades absolutas, en el mejor de los casos sólo teorías que funcionan mejor que otras...mientras no sean reemplazadas por otras con aún mayor poder explicativo. Vista desde fuera, esta tendencia casi destructiva a la crítica produce confusión y desconfianza: nadie conoce la "verdad". Si se suma a esto el tema de la incertidumbre y el error estadístico, la desilusión es total.

Difícilmente la opinión pública puede comprender cuando un experto se niega a emitir un juicio absoluto o hacer una predicción sin calificarla con un grado de incertidumbre. El intercambio siguiente, entre un medio radial y un experto en meteorología, representa el tono que toman a menudo estas entrevistas: "Sr. X: ayer su Institución señaló que hoy ingresaría a la zona un frente costero que reduciría los niveles de contaminación en la ciudad, lo que no ocurrió. Considerando que está en juego la salud de la población, ¿quién es responsable de esto?" Aquí claramente el periodista está intentando reflejar la indignación que genera en el ciudadano medio una falla predictiva en un ámbito que, durante parte del año, concita la preocupación generalizada de la ciudadanía. La respuesta del experto, en cuanto a haber advertido previamente sobre un error de 20% en la predicción, está condenada a no tener mayor acogida en la opinión pública. El juicio de ésta puede incluso descalificar la calidad del experto. Para mucha gente, un experto no puede errar. Sin embargo, la ciencia sin posibilidad de error no es ciencia. Tanto es así, que toda una rama de las matemáticas, la estadística, está precisamente dedicada a estudiar la variabilidad y el error.

Para agregar una dimensión más a este cuadro, los científicos no dejan de ser personas, con prejuicios, intereses y sesgos propios de sus tendencias políticas, religiosas o personales. Sería absurdo esperar otra cosa. Es un hecho que un investigador cuyo trabajo es financiado por la industria podría tender a empatizar con los intereses de ésta, no necesariamente por un afán de lucro (que tampoco debe descartarse) sino porque en su trabajo con la industria puede llegar a entender mejor la postura de quienes trabajan en ella, los esfuerzos que hacen por resolver el problema, o las situaciones operativamente imposibles en que los puede poner una regulación. Esto es censurable sólo si esta empatía debilita su juicio crítico sobre los datos que obtiene. En el otro

extremo, no son pocos los casos en que la pasión ambientalista o anti-industrial de algunos científicos los ha convertido en predicadores vociferantes, incapaces de aceptar la discusión analítica si ésta los contradice. Esta dimensión abre un nuevo frente de desconfianza y vulnerabilidad para los juicios que la ciencia emite cuando es invitada al terreno de las políticas regulatorias. Un ejemplo reciente y muy interesante ha sido la polémica sobre los gases de efecto invernadero y el calentamiento global, donde ninguna de las partes ha trepido ante la descalificación más extrema, desbordando claramente el ámbito técnico y científico.

En conclusión, aunque la ciencia es un aspecto fundamental de la ecuación regulatoria, es imposible esquivar la responsabilidad política involucrada en la toma de decisiones regulatorias. La tarea de los técnicos es comunicar, con la mayor precisión posible, lo que se sabe, lo que se desconoce, y el grado de incertidumbre asociado a cada afirmación. La decisión regulatoria es, en definitiva, un acto de equilibrio, que conlleva riesgos y potenciales beneficios, y que no puede sino ser asumido por quienes, por su posición, tienen la responsabilidad de gobernar.

### Riesgo y Percepción de Riesgo<sup>19</sup>

El riesgo es una función del peligro de un evento y de la probabilidad de su ocurrencia. Es posible desarrollar modelos que permitan cuantificar el riesgo y generen una escala de valores relativos, al menos dentro de un cierto dominio u orden de magnitud de eventos. Esto nos permitiría estimar, por ejemplo, cuanto más riesgo puede representar, en un aspecto específico, el arrojar un kilogramo de la sustancia A en comparación con la sustancia B, o un kilogramo de la misma sustancia al río X en vez del río Y. O estimar cuánto más riesgo representa almacenar una sustancia radioactiva en una ubicación u otra. Difícilmente, sin embargo, podría pensarse en una evaluación de riesgo que permita cuantificar los riesgos relativos de la energía nuclear versus la hidroeléctrica. En otras palabras, en términos de evaluación de riesgo sólo podemos avanzar cuantitativamente en un terreno muy acotado, técnico y, lo más importante, comunicacionalmente muy pobre.

Por múltiples causas, cuya naturaleza escapa al alcance

<sup>19</sup> El fenómeno de la percepción pública y el tratamiento mediático del riesgo es complejo y multifacético, y en la Bibliografía se citan varios textos que tratan con mayor profundidad el problema. Aquí, nos limitaremos a reseñar algunos principios derivados por algunos autores, a partir de la observación de casos.

de este libro, la opinión pública no muestra interés en cuantificaciones técnicas del riesgo. Esto explica que casi siempre las batallas comunicacionales en estas áreas se libren en el terreno de las percepciones de riesgo, más que en el de los riesgos mismos. Ante una noticia del tipo "Niños se bañan en aguas contaminadas con cancerígenos", poco valor tienen un informe científico que cuestione la metodología con que se midieron las concentraciones de cancerígenos, o una discusión sobre si las sustancias en cuestión son o no cancerígenas. La mayoría de las personas se quedarán con la percepción inicial que les dejó el titular. Esto evidentemente no es imputable sólo a los medios de comunicación, sino a los niveles educacionales promedio de nuestra población. En países con mayor nivel de desarrollo educacional, el público exige, y puede acceder, a un tratamiento algo más elaborado, que al menos permita vislumbrar cuáles son las dificultades de interpretación. En nuestro país hay un desarrollo muy promisorio de periodismo científico responsable, y el fácil acceso a Internet también puede contribuir a generar un universo de ciudadanos más informados para adoptar su propia postura frente a un tema, incluida la incertidumbre (pero informada).

El interés de la opinión pública por un tema ambiental o de salud no está necesariamente relacionado con la seriedad del riesgo o el peligro que implica, sino con otros criterios, como el interés humano. Por ejemplo, a todos nos genera mayor interés e indignación ver presentadas situaciones en que niños están supuestamente expuestos a riesgos serios de salud, especialmente si están rubricadas por llantos maternos u otras explosiones de emoción que tienen gran cobertura en la televisión. En cambio, un sobrio reportaje sobre los niveles de materia fecal en ríos y litoral costero de Chile, con tablas de conteos bacteriológicos y entrevista a expertos, posiblemente representa un tropiezo en el rating. Sin embargo, éste último es un problema sanitario y ambiental que genera muchas más muertes al año, en todo el mundo, que cualquier incidente ambiental localizado. Ambos casos pueden ser igualmente preocupantes, independientemente del número de personas potencialmente afectadas, pero claramente el caso de cinco niños con niveles elevados de un contaminante en la sangre genera más interés que la estadística anual de enfermedad y muerte adjudicables a contaminación de aguas por coliformes.

La reacción de la opinión pública ante un incidente o problema ambiental no tiene que ver con los aspectos técnicos del riesgo sino con sentimientos que despierta en la persona (miedo, rabia, culpa, etc.), lo que un autor ha resumido en el término "indignación" (outrage). Existen características de los eventos que tienden a agudizar esta indignación.

Por ejemplo, cuando la exposición al riesgo es vista como un acto impuesto por otros, y no voluntario, la indignación y el riesgo percibido son mayores. Un acto voluntario, como no usar el cinturón de seguridad al conducir, no es percibido como muy riesgoso, aunque claramente lo es y mucho. En cambio, la exposición a humo de tabaco generado por otros genera altos niveles de indignación y percepción de riesgo. Los escasos estudios que sugieren que el humo secundario puede causar daño han sido fuertemente criticados por numerosos expertos internacionales y, en todo caso, el riesgo que predicen es muchísimo menor que el asociado al no uso del cinturón de seguridad.

Como lo mencionamos brevemente al inicio de este libro, cuando una condición ambiental tiene un origen industrial es percibida como más riesgosa que cuando su origen es natural, aunque esta última sea de hecho mucho más peligrosa. Las erupciones volcánicas están entre las primeras fuentes de contaminación atmosférica global. Sin embargo, no despiertan nuestra indignación, ni las percibimos como causantes de riesgos de salud o ambientales en el sentido en que percibimos una chimenea industrial. En particular cuando se trata de grandes industrias, se aplica la "ley de Goliat": el más grande siempre tiene la culpa. El corolario es que la magnitud de la indignación pública es proporcional a la diferencia percibida de poder económico y político entre el presunto culpable y la presunta víctima. Si éstas últimas son niños, ancianos, inválidos, etc., y la presunta culpable es una corporación multinacional, la máxima indignación pública está asegurada. Si, en cambio, el daño ambiental es causado por pobladores irresponsables que arrojan sus desechos a un canal cercano, o por campesinos que usan calefacción a leña nativa, y sin filtro en las chimeneas, la indignación es mínima o inexistente. En todos estos casos no hay ninguna evaluación técnica en juego, sino puros sentimientos espontáneos basados en premisas y prejuicios que no es dable discutir.

Una consecuencia importante del papel que juega el factor "indignación" en la percepción pública del riesgo de condiciones ambientales, es que quiénes enfrentan tales conflictos desde un punto de vista comunicacional deben, para ser efectivos, hacerse cargo de esa indignación. Como lo señalamos, las respuestas técnicas son raramente efectivas en esa arena pública. También, el partir esquivando posibles responsabilidades de la autoridad o la empresa involucrada, suele incrementar la percepción negativa de la audiencia. Por el contrario, una primera respuesta solidaria con los presuntos o reales afectados y un reconocimiento de las responsabilidades involucradas, contribuyen de manera importante a apaciguar la emocionalidad de la primera reacción pública y a generar condiciones para un análisis más técnico y objetivo.

Por supuesto que aceptar una responsabilidad requiere saber que, efectivamente, hay un nexo causal entre el presunto agente y el presunto efecto, o al menos saber que el nexo es altamente probable. Desafortunadamente, frecuentemente éste no es el caso. Peor aún, en muchos casos las condiciones son tales que nunca se podrá establecer la existencia o no de un nexo causal. Este es un hecho con el cual deben aprender a vivir autoridades, reguladores, empresarios, periodistas y público en general.

Al final del día, en una democracia tanto el gobierno como la prensa, los científicos, la industria y los políticos deben responder al interés de la gente. Nadie se puede alejar de este dictado por mucho tiempo. La única forma de mantener un equilibrio entre los intereses de grupos y los de la comunidad en su conjunto es informando a los ciudadanos de lo que se sabe en el momento oportuno, en la forma más veraz y simple posible. Luego, se deben poner en juego las reglas democráticas y la institucionalidad del gobierno para asegurar el menor riesgo posible al menor costo para la sociedad. En este proceso la participación responsable de los actores sociales es fundamental.

## Referencias Bibliográficas y Lecturas Recomendadas

### Cu, Metales y Medio Ambiente

Environmental Health Criteria 200 Copper. 1998. International Programme on Chemical Safety. Ginebra: World Health Organization.

Landner L. & L. Lindeström. 1999. Copper in Society and in the Environment. Västerås: Swedish Environmental Research Group.

Joseph G. 1999. Copper. Its Trade, Manufacture, Use, and Environmental Status. Ohio: ASM International.

Thornton, I. (Sin año). Metals in the Global Environment. Ontario: International Council on Metals and the Environment (ICME).

Parametrix, Inc. (Sin año). Persistence, Bioaccumulation and Toxicity of Metals and Metal Compounds. Ontario: International Council on Metals and the Environment (ICME).

Kabata-Pendias, A. & H. Pendias. 1992. Trace Elements in Soils and Plants. 2nd. Ed. Boca Raton, Fla: CRC Press, Inc. 365 pp.

### Clasificación de Peligro en la OECD

Environmental Directorate, Organisation for Economic Co-operation and Development. 2000. Final Proposal for a revised Draft Guidance Document on the Use of the Harmonized System for the Classification of Chemicals which are Hazardous for the Aquatic Environment. OECD Environmental Health and Safety Publications.

Environmental Directorate, Organisation for Economic Co-operation and Development. 2001. Draft Guidance Document on Transformation/Dissolution of Metals and Metal Compounds in Aqueous Media. OECD Environmental Health and Safety Publications.

Fairbrother, A. & L.A. Kaputska. (Sin año). Proposed Hazard

Classification of Metals in the Terrestrial Environment. Ontario: International Council on Metals and the Environment (ICME).

El sitio en internet de la OECD ([www.oecd.org](http://www.oecd.org)) contiene una serie de documentos sobre el desarrollo del sistema de clasificación de peligro (keywords: hazard classification; globally harmonized system; dissolution transformation protocol).

### **Evaluación de Riesgo en la Unión Europea**

Commission of the European Communities. 2001. White Paper Strategy for Future Chemicals Policy. COM(2001) 88 final.

Regulation No.94/1488 on the principles for the assessment of risks to man and the environment of existing substances in accordance with Council Regulation 93/793.

Council Regulation (EEC) No 793/93 of 23 March 1993 on the evaluation and control of risks of existing chemical substances, OJ No. L84, 5.4. 1993

European Commission. 1999. Technical Guidance Document in Support of Commission Directive 93/67/EEC on Risk Assessment for New Notified Substances and Commission Regulation (EC) N° 1488/94 on Risk Assessment for existing Substances. Parts 1 & 2.

Gray, G.M., Jeffery, W.G. & G.E. Marchant. 1997. Risk Assessment and Risk Management of Non-Ferrous Metals. Ontario: International Council on Metals and the Environment (ICME).

El sitio en internet de la Comisión Europea ([europa.eu.int/comm/](http://europa.eu.int/comm/)) contiene una serie de documentos sobre el sistema de evaluación de riesgo de sustancias químicas (keywords: risk assessment).

### **Cu en la Dieta y Agua Potable y Efectos sobre la Salud Humana**

Araya M., McGoldrick M.C., Klevay L.M., Strain, J.J., Robson P., Nielsen F., Olivares M., Pizarro F., Johnson L. & K.A. Poirier. 2001. Determination of an Acute No-Observed-Adverse-Effect Level (NOAEL) for Copper in Water. Regulatory Toxicology and

Pharmacology 34: 137-145.

Gittleman, A.L., Smith, M.D. & M. Rosenbaum. 1999. *Why Am I Always So Tired?* Harper, San Francisco.

Olivares M., Araya M. & R. Uauy. 2000. Copper homeostasis in infant nutrition: deficit and excess. *Journal of Pediatric Gastroenterology and Nutrition*. 31: 102-111.

Scheinberg, I.H. & I. Sternlieb. 1996. Wilson Disease and Idiopathic Copper Toxicosis. *Am. J. Clin. Nutr.* 63:842S-5S.

Environmental Health Criteria 200 Copper. 1998. International Programme on Chemical Safety. Ginebra: World Health Organization

### **Ecotoxicología, Biodisponibilidad y Modelo de Ligando Biótico**

Allen, H.E. & D.L. Hansen. 1996. The Importance of Trace Metal Speciation to Water Quality Criteria. *Water Environment Research* 68: 42-54.

Bergman, H.L. & E.J. Dorward-King. 1997. *Reassessment of Metals Criteria for Aquatic Life Protection*. Pensacola, FL:SETAC Press.

Di Toro, Dominic M., Herbert E. Allen, Harold L. Bergman, Joseph S. Meyer, Paul R. Paquin, Robert C. Santore, 2001. Biotic Ligand Model of the Acute Toxicity of Metals. 1. Technical Basis. *Environmental Toxicology and Chemistry*: Vol. 20, No. 10, pp. 2383-2396.

Renner, R. 1997. Rethinking Water Quality Standards for Metals Toxicity. *Environ. Sci. Tech.* 31:466-468.

Santore, Robert C., Dominic M. Di Toro, Paul R. Paquin, Herbert E. Allen, Joseph S. Meyer, 2001. Biotic Ligand Model of the Acute Toxicity of Metals. 2. Application to Acute Copper Toxicity in Freshwater Fish and Daphnia. *Environmental Toxicology and Chemistry*: Vol. 20, No.10, pp.2397-2402.

Gray, G.M., Jeffery, W.G. & G.E. Marchant. 1997. Risk Assessment and Risk Management of Non-Ferrous Metals. Ontario: International Council on Metals and the Environment (ICME).

### Convenio de Basilea

Convenio de Basilea sobre el Control de Movimientos Transfronterizos de los Desechos Peligrosos y su Eliminación. Adoptado por la Conferencia de Plenipotenciarios del 22 de Marzo 1989. Secretariado de la Convención de Basilea, UNEP.

### Riesgo, Ciencia y Percepciones

Mooney L. & R. Bate, eds. 1999. Environmental Health. Third World Problems – First World Preoccupations. Oxford: Butterworth Heinemann.

Ottoboni M.A. 1997. The Dose Makes the Poison, 2nd ed. New York: John Wiley and Sons.

Margolis H. 1996. Dealing with Risk. Chicago & Londres: The University of Chicago Press.

Morris J. ed. 2000. Rethinking Risk and the Precautionary Principle. Oxford: Butterworth Heinemann.

Douglas M. & A. Wildavsky. 1982. Risk and Culture. Berkeley: University of California Press.

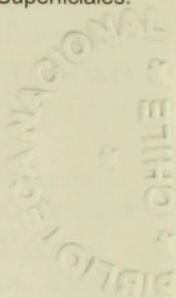
### Normas Chilenas

KRISTAL. Homsy y Asociados. 1997. «Proposición de Normas de Calidad de Aguas para Proteger Usos Determinados». Informe Final y Anexos 10, 11 y 12. Estudio realizado para el Depto. de Descontaminación, Planes y Normas de la Comisión Nacional del Medio Ambiente.

REPUBLICA DE CHILE, CONAMA. 1994. Ley de Bases del Medio Ambiente N°19.300. Comisión Nacional del Medio Ambiente, Chile.

REPUBLICA DE CHILE, CONAMA. 2001. Anteproyecto de Norma de Calidad para la Protección de las Aguas Continentales Superficiales. Comisión Nacional del Medio Ambiente, Chile.

REPUBLICA DE CHILE; CONAMA. 2001. Norma de Emisión para la Regulación de Contaminantes Asociados a las Descargas de Residuos Líquidos a Aguas Marinas y Continentales Superficiales. Comisión Nacional del Medio Ambiente, Chile.



### Lista de Figuras

- Figura 1 Representación gráfica de una RNSasa dependiente de Cu. Pág. 5
- Figura 2 Representación genérica de relación entre la dosis de una sustancia y la magnitud del efecto negativo que ésta produce en el ser humano u otro ser vivo. Pág. 14
- Figura 3 Representación genérica de relación entre la dosis de una sustancia magnitud del efecto negativo que ésta produce en el ser humano u otro ser vivo, para dos individuos con rangos de tolerancia diferentes. Pág. 16
- Figura 4 Una gama posible de efectos de concentraciones variables de Cu al interior de la célula. Pág. 17
- Figura 5 Representación esquemática de un ensayo de toxicidad acuática para determinar la Concentración Letal 50% (LC50) de una sustancia sobre peces. Pág. 21
- Figura 6 Esquema que representa la relación cuantitativa entre Fracción Total, Disuelta y Biodisponible de un compuesto en un medio acuático. Pág. 24
- Figura 7 Esquema que representa el efecto de cantidades crecientes de materia orgánica disuelta en el agua sobre la toxicidad para peces de una cantidad constante de sustancia X. Pág. 25
- Figura 8 Esquema que muestra los tipos de interacciones entre metal y otros componentes del agua y que modifican la biodisponibilidad del metal según el BLM. Pág. 27
- Figura 9 Gráfico que ilustra la capacidad predictiva del LC50 para Cu del Modelo de Ligando Biótico. Pág. 28
- Figura 10 Relación entre concentración de un metal en el agua y el factor de bioconcentración en una especie de pez. Pág. 42
- Figura 11 Posibles destino de un átomo de metal en un cuerpo de agua natural. Pág. 54
- Figura 12 Esquema de Protocolo de Disolución-Transformación
- Figura 13 Límite para cobre en el efluente como función de la capacidad de dilución del cuerpo receptor. Pág. 70

### Lista de Tablas

- Tabla 1 Flujos anuales estimados de cobre a la atmósfera y océanos. Pág. 4
- Tabla 2 Algunas cuproenzimas y sus funciones en el cuerpo humano. Pág. 6
- Tabla 3 Algunos alimentos y su contenido promedio de cobre. Pág. 6
- Tabla 4 Concentraciones letales 50% de cobre para algunos tipos de organismos acuáticos. Pág. 22
- Tabla 5 Frases de peligro para la vida acuática asociadas a las clases de peligro del esquema OECD . Pág. 56
- Tabla 6 Solubilidad de cobre y óxido de cobalto a distintos niveles de acidez de la solución. Pág. 58
- Tabla 7 Esquema de clases de Calidad de Agua del Anteproyecto de Normas de Calidad para la Protección de Aguas Continentales Superficiales. Pág. 67
- Tabla 8 Límites para Cu para aguas de Clase 1 como función de dureza del agua. Pág. 68

Se crea por Decreto N°296, del 21 de Diciembre de 1993, del Ministerio de Minería, una **Comisión Técnica Asesora del Presidente de la República en materia de la Guía sobre Calidad del Agua Potable**, cuya radicación y procedencia está en la Comisión Chilena del Cobre.

La misión de esta Comisión Técnica Asesora es la de colaborar y asesorar al Presidente de la República en todas las negociaciones vinculadas al tema cobre y agua potable en la Organización Mundial de la Salud (OMS) y en otras negociaciones relacionadas con gobiernos extranjeros y otras organizaciones internacionales.

La Comisión Técnica Asesora está compuesta por el o los representantes de los siguientes organismos: Comisión Chilena del Cobre, Ministerio de Relaciones Exteriores, Ministerio de Salud, Ministerio de Minería, Conama, Codelco-Chile, ProCobre, Centro de Investigación Minera y Metalúrgica (CIMM), Instituto de Nutrición y Tecnología de los Alimentos (INTA) de la Universidad de Chile, Centro de Minería de la Pontificia Universidad Católica de Chile y otros miembros de la comunidad académica o empresarial.

El objeto ha sido el trabajo vinculado a la revisión del cobre en la Guía de Calidad del Agua Potable, que es una recomendación que hace la Organización Mundial de la Salud, la cual tiene efectos en la generación de normativas de todos los países. Esto se vincula a los criterios de salud ambientales relacionados con los posibles efectos para la salud que sean atribuibles al cobre contenido en el agua potable y en otros elementos.

Para cumplir con esta misión, ha sido necesario:

- Incrementar los conocimientos científicos, sobre tolerancia y adaptación humana a exposición variable de cobre.
- Reconocer el carácter esencial para la salud humana del cobre, junto a otras sustancias como el hierro y el zinc.
- Acrecentar la colaboración regular en los procesos de revisión conducidos por el Programa Internacional de Seguridad Química (IPCS) de la Organización Mundial de la Salud (OMS), participando activamente en los organismos reguladores ambientales y de salud a nivel internacional.