

# Cuestiones éticas y científicas de la nanotecnología en el lugar de trabajo

Paul A. Schulte<sup>1</sup> y Fabio Salamanca-Buentello<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Instituto Nacional para la Seguridad y Salud Ocupacional, Centros de Control y Prevención de Enfermedades, Cincinnati, Ohio, USA;

<sup>2</sup>Centro Mixto de Bioética de la Universidad de Toronto y Programa Canadiense de Genómica y Salud Global, Toronto, Ontario, Canadá

Dada la ausencia de claridad científica sobre los efectos potenciales sobre la salud de la exposición ocupacional a las nanopartículas, se requiere de orientación para la toma de decisiones respecto a sus riesgos, peligros y controles. Identificar las cuestiones éticas que esto implica puede ser de utilidad para quienes toman las decisiones, en particular los patrones, los trabajadores, los inversionistas y las autoridades sanitarias. Dado que el objetivo de la seguridad y salud ocupacional es la prevención de las enfermedades en los trabajadores, se han identificado las situaciones que tienen las implicaciones éticas que más afectan a los trabajadores. Entre estas situaciones se incluyen la *a)* identificación y comunicación de los peligros y riesgos por los científicos, las autoridades y los patrones; *b)* la aceptación del riesgo por los trabajadores; *c)* la selección y la implementación de controles; *d)* el establecimiento de programas de reconocimientos médicos, y *e)* la inversión en la investigación toxicológica y de control. Estas cuestiones éticas implican determinación imparcial de los peligros y riesgos, no maleficencia (no hacer daño), autonomía, justicia, privacidad y fomento del respeto hacia las personas. A medida que se identifiquen y se exploren las cuestiones éticas, es posible desarrollar opciones para quienes toman las decisiones. Además, es posible contribuir a las deliberaciones sociales sobre los riesgos de las nanotecnologías en el lugar de trabajo haciendo especial énfasis en las pequeñas empresas y en la adopción de una perspectiva global. **Palabras clave:** ética, peligros, nanotecnología, seguridad y salud ocupacional, partículas, toxicología. Please cite to the original English version of this article— *Environ Health Perspect* 118:000–000 (2010). doi:10.1289/ehp.9456 disponible en <http://dx.doi.org/> [Publicado en línea el 25 de septiembre de 2008]

La ciencia y la tecnología han identificado propiedades únicas en los materiales con dimensiones de entre 1–100 nm [Ejecutivo de Salud y Seguridad (HSE) 2004; Iniciativa Nacional de Nanotecnología (NNI) 2004]. Estas propiedades pueden producir muchos beneficios sociales de largo alcance, pero también pueden plantear peligros y riesgos. Un área que suscita inquietud en relación con los peligros es el lugar de trabajo, ya se trate de un laboratorio de investigación, de una empresa emergente, de una planta de producción o de una operación en la que se procesen, utilicen, desechen o reciclen nanomateriales procesados. Estos son los lugares de trabajo en los que están ocurriendo algunas de las primeras exposiciones sociales a las nanopartículas fabricadas. Estas exposiciones tienden a ser involuntarias e imprevistas. Pese a un esfuerzo consciente por parte de los gobiernos, corporaciones, organizaciones no gubernamentales (ONGs), asociaciones comerciales, académicos y trabajadores para anticipar y enfrentar los peligros potenciales en el lugar de trabajo [Bartis y Landree 2006; Hett 2004; Instituto Nacional para la Seguridad y Salud Ocupacional (en inglés, NIOSH) 2006; el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (en inglés, NSTC) 2006; Roco y Bainbridge 2003; el Comité Científico sobre los Riesgos de Salud Emergentes y Recientemente Identificados (en inglés, SCENIHR) 2005], los trabajadores aún tienden a verse expuestos a nanomateriales.

Mucha de la investigación sobre los aspectos técnicos de la nanotecnología se

han enfocado en cuestiones generalizadas, tales como la equidad, la privacidad, la seguridad, el impacto ambiental y las interacciones metafísicas que atañen a las interacciones entre los seres humanos y las máquinas (Mnyusiwalla et al. 2003; Moor y Weckert 2004; Singer 2004). No se ha llevado a cabo ninguna investigación sobre ética que se refiera específicamente al lugar de trabajo. Para ayudar a anticipar el impacto de la nanotecnología, es importante proveer un marco para las cuestiones éticas y científicas relacionadas con la nanotecnología en el lugar de trabajo. El análisis ético puede garantizar a la sociedad de que la promesa expansiva de la nanotecnología no oculta peligros ni riesgos para los trabajadores. Una creencia que está surgiendo es que la nanociencia y la nanotecnología no pueden basarse en las prácticas del pasado en las que la reflexión ética y social constituye un segundo paso hacia la utilización de una ciencia recientemente desarrollada. Más bien, las reflexiones éticas deben acompañar a la investigación en cada paso del camino (Academia Nacional de Ingeniería 2004). Nuestra meta en este artículo es identificar las cuestiones éticas que se relacionan directamente con la nanotecnología en el lugar de trabajo y las implicaciones para la salud y la seguridad de los trabajadores.

## El marco para la evaluación ética

El marco para la consideración de las cuestiones éticas puede ser extraído del trabajo de Gert et al. (1997), Gewirth (1978, 1986)

y Schrader-Frechette (1994), así como del enfoque “principista” de Beauchamp y Childress (1994). Las cuestiones éticas que más afectan a los trabajadores en cuyos empleos intervienen los nanomateriales se relacionan con la identificación y la comunicación de los peligros y riesgos por los científicos, las autoridades y los patrones; la aceptación del riesgo por los trabajadores; la implementación de controles, la elección de participar en un reconocimiento médico, y la inversión adecuada en la investigación toxicológica y de control de la exposición (Tabla 1). Las cuestiones éticas implican la identificación y la evaluación de los peligros y riesgos, la no maleficencia (no hacer daño), la autonomía (auto-determinación), la justicia (la distribución justa de los riesgos), la privacidad (en el manejo de la información médica) y el respeto hacia las personas.

El conocimiento científico factual —que constituye la base para las decisiones éticas sobre la seguridad y salud ocupacional— puede verse influido por sesgos y valores (Kantrowitz 1995). El conocimiento científico tiene una carga de valores inevitable. Ninguna teoría científica puede ser considerada completamente objetiva, pero una teoría puede ser más objetiva que otra (Schrader-Frechette 1994). En las decisiones éticas subyace la manera en que se representa la nanotecnología, los beneficios potenciales de ésta y los riesgos y peligros asociados a ella. Cuando se duda de la información sobre los peligros de las nanopartículas, la pregunta crítica es dónde marcar el límite para el nivel

Dirigir la correspondencia a P.A. Schulte, NIOSH, 4676 Columbia Parkway, Cincinnati, OH 45226 USA. Teléfono: (513) 533-8302. Fax: (513) 533-8588. Correo electrónico: [pschulte@cdc.gov](mailto:pschulte@cdc.gov)

Agradecemos a las siguientes personas sus aportaciones o sus comentarios sobre las versiones anteriores de este trabajo: a M. Ellenbecker, S. Samuels, H. Kipen, M. Hoover, E. Kuempel, R. Zumwalde, C. Geraci, V. Murashov y P. Middendorf.

Los hallazgos y conclusiones expresados en este trabajo son los de los autores y no necesariamente representan las opiniones del Instituto Nacional para la Seguridad y Salud Ocupacional.

Los autores declaran no tener intereses financieros en competencia.

Recibido el 23 de junio de 2006; aceptado el 25 de septiembre de 2006.

This translation is provided by Instituto Nacional de Salud Pública, Mexico. EHP strives to ensure that its foreign-language materials are faithful translations of their original English-language counterparts. Please report any problems or discrepancies to [hu1@niehs.nih.gov](mailto:hu1@niehs.nih.gov).

de protección necesario y el riesgo residual en un nivel de protección dado. Las evaluaciones de los riesgos son en parte subjetivas y tienden a ser altamente politizadas. De modo que todas las proyecciones de los riesgos tienen una carga de valores. Ningún escenario para describir los riesgos y controles puede bastar por sí solo debido a la naturaleza de la nanotecnología, heterogénea y en vías de desarrollo. Las cuestiones éticas serán específicas únicamente para la base de conocimientos en un momento determinado y para un escenario específico de producción y utilización. Los investigadores han sugerido que incluso con este tipo de especificidad se requieren evaluaciones alternativas para captar los valores éticos y políticos que informan las políticas en relación con la nanotecnología (Schrader-Frechette 2002).

### El estado actual del conocimiento sobre los peligros y riesgos de la nanotecnología

La manera en que se representa la nanotecnología puede influir en las reacciones de la sociedad a la investigación, el desarrollo y la prevención y el control de los peligros potenciales de los nanomateriales en el lugar de trabajo (Berube 2004). El término “nanotecnología” da lugar a confusiones puesto que no es una agrupación de procesos, materiales, aplicaciones y conceptos físicos, químicos, biológicos, ingenieriles y electrónicos definidos por el tamaño (Aitken et al. 2004). No obstante, las cuestiones de tamaño, las características de la superficie, la durabilidad, la composición química y otras características físico-químicas no están bien establecidas en la definición. Una definición más completa incluye también estructuras con propiedades novedosas que pueden ser manipuladas a una escala atómica (NNI 2004; Salamanca-Buentello et al. 2005). Puede considerarse que las nanopartículas se dividen por lo menos en dos categorías amplias: las nanopartículas fabricadas y las nanopartículas incidentales (o adventicias). Las nanopartículas fabricadas

están diseñadas con propiedades muy específicas. Las nanopartículas incidentales (naturales y antropogénicas) son generadas de una manera relativamente incontrolada y suelen ser física y químicamente heterogéneas en comparación con las nanopartículas fabricadas (NIOSH 2006). Si bien los cuatro principales métodos actuales de producción de nanopartículas fabricadas (la síntesis en fase gaseosa, la deposición de vapores y los métodos coloidal y de desgaste) pueden exponer a los trabajadores mediante inhalación, absorción dérmica e ingestión, la cantidad y la probabilidad de la exposición de los trabajadores no han sido determinadas aún. La pregunta crítica (basada en la escasa información disponible) se refiere a la evaluación de los peligros y riesgos. El tema unificador es que las nanopartículas son más pequeñas que sus equivalentes más grandes, pero tienen una superficie mayor y un número mayor de partículas por unidad de masa; estas características generalmente incrementan el potencial tóxico como resultado de un mayor potencial para la reactividad (Aitken et al. 2004). La aplicación de esa teoría a toda la nanotecnología en lugar de a ciertas partículas y procesos específicos puede incrementar en vez de disminuir la incertidumbre sobre los peligros y los riesgos. Además del tamaño de las partículas, cada vez se identifican más características (por ejemplo, de superficie) que influyen en la toxicidad (Donaldson et al. 2006; Warheit et al. 2004). Estas características son tremendamente variables. Como consecuencia, es útil poner algunos límites a la incertidumbre utilizando un lenguaje más preciso para describir los riesgos y peligros de las nanopartículas. Dado que existe una mezcla diversa de partículas y procesos, es más probable que se obtenga una evaluación exacta de los riesgos y peligros caso por caso —o al menos según el tipo de métodos de producción utilizados y según si las partículas están incrustadas en una matriz o sueltas.

*El conocimiento sobre los riesgos y peligros.* Los efectos sobre la salud en los trabajadores

que manejan la nanotecnología son limitados debido a la naturaleza incipiente de este campo, al número relativamente pequeño de trabajadores potencialmente expuestos hasta la fecha y a que no ha transcurrido suficiente tiempo para que se desarrollen y se detecten enfermedades crónicas. La experiencia humana más relevante tiene que ver con las exposiciones a partículas ultrafinas (que incluyen las partículas con diámetros < 100 nm) y a partículas finas (partículas con diámetros < 2.5 µm). Las partículas finas y ultrafinas han sido evaluadas en estudios epidemiológicos de la contaminación ambiental y en estudios de cohortes ocupacionales expuestas a polvos minerales, fibras, humos de soldadura, productos de combustión y particulados de baja toxicidad poco solubles como el dióxido de titanio y el negro de carbón (Maynard y Kuempel 2005; Nel et al. 2006). También se han identificado en estudios en animales los peligros de estas exposiciones y de las exposiciones a las nanopartículas fabricadas (Donaldson et al. 2004, 2006; Elder et al. 2006; Lam et al. 2004, 2006; Oberdörster et al. 2005; Shvedova et al. 2005; Warheit et al. 2004). Existe una marcada relación entre el área de superficie, el estrés oxidativo y los efectos proinflamatorios de las nanopartículas en los pulmones. Entre mayor es el estrés oxidativo, más probable es el riesgo de inflamación y de citotoxicidad (Nel et al. 2006; Oberdörster et al. 2005). Los hallazgos de los estudios en animales necesitan ser interpretados en última instancia en función de la exposición (dosis) que los seres humanos pudieran llegar a recibir. Si bien aún hay algunas discusiones al respecto, la evidencia proporcionada por los estudios sobre la contaminación ambiental asocia el incremento de la contaminación ambiental particulada (la fracción fina de materia particulada PM<sub>2.5</sub>, con un diámetro aerodinámico de < 2.5 µm) con efectos adversos sobre la salud de los miembros de la población susceptibles —en particular los ancianos con enfermedades respiratorias y cardiovasculares [Mark 2004;

**Tabla 1.** Cuestiones éticas referentes a situaciones en el lugar de trabajo en las que intervienen los nanomateriales.

Escenarios relacionados con el trabajo	Principios éticos implicados	Cuestiones de toma de decisiones
Identificación y comunicación de los riesgos y peligros	Responsabilidades de los científicos No maleficencia Autonomía Respeto hacia las personas	Grado en el que se identifican las fortalezas y debilidades de los datos Grado de participación en la discusión pública Exactitud de las comunicaciones Oportunidad de las comunicaciones
Aceptación del riesgo por los trabajadores	Autonomía Respeto hacia las personas Justicia	Grado de inclusión de los trabajadores en la toma de decisiones
Selección e implementación de controles en el lugar de trabajo	No maleficencia Beneficencia Respeto hacia las personas	Nivel de las tecnologías de control utilizadas
Reconocimientos médicos a los trabajadores de la nanotecnología	Autonomía Privacidad Respeto hacia las personas	Lo apropiado de los motivos para realizar reconocimientos médicos Grado en el que la participación es voluntaria Privacidad de los resultados de las pruebas
Inversión en la investigación toxicológica y de controles	No maleficencia Justicia Respeto hacia las personas	Adecuación de la inversión

Peters 2005; Agencia de Protección del Medio Ambiente de EEUUA (U.S. EPA 2004). Es más, las concentraciones asociadas con efectos medibles sobre la salud de las poblaciones son bastante bajas (Aitken et al. 2004).

En los estudios ocupacionales, se sabe bien que las poblaciones repetidamente expuestas a polvos minerales y fibras peligrosas en el rango respirable (por ejemplo, cuarzo y asbesto, respectivamente) sufren efectos en su salud proporcionales a la dosis inhalada (Maynard y Kuempel 2005). En el caso del asbesto, los factores de riesgo críticos para el desarrollo de enfermedades respiratorias son la longitud de las fibras, su diámetro y su biopersistencia. En cuanto a los polvos poco solubles de toxicidad baja como el dióxido de titanio, al parecer las partículas más pequeñas en el rango de tamaños del nanómetro incrementan el riesgo de cáncer de pulmón en los animales proporcionalmente al tamaño y al área de superficie de las partículas (Heinrich et al. 1995; Oberdörster et al. 2005; Tran et al. 2000). Si bien los hallazgos no son concluyentes, diversos estudios en animales sobre las nanopartículas fabricadas suscitan preocupaciones sobre la existencia y la severidad de los peligros que plantean para los trabajadores expuestos (Kipen y Laskin 2005). Entre los posibles efectos adversos se incluyen el desarrollo de fibrosis y otros efectos pulmonares después de una exposición a los nanotubos de carbono durante un periodo breve (Lam et al. 2006; Oberdörster et al. 2005; Shvedova et al. 2005), el desplazamiento de las nanopartículas al cerebro a través del nervio olfatorio, la capacidad de las nanopartículas de desplazarse hacia el sistema circulatorio, y el potencial de las nanopartículas de activar las plaquetas y exacerbar la trombosis vascular (Radomski et al. 2005).

Ninguno de estos hallazgos es concluyente respecto a la naturaleza y la magnitud de los peligros, pero se pueden aplicar acciones precautorias basadas en ellos.

En última instancia, la trascendencia de la información sobre los peligros depende del grado en el que los trabajadores estén expuestos al peligro. Este es el criterio que define el riesgo (la probabilidad de que un trabajador expuesto enferme). Se ha identificado la necesidad de una evaluación de los riesgos específicos de las nanopartículas (es decir, los que utilizan la cuantificación de la dosis más apropiada en lugar de la masa típica) que sea exclusiva para la nanotecnología (Academia Nacional de Ingeniería de EEUUA 2004; SCENIHR 2005).

Se ha utilizado ampliamente la evaluación de los riesgos para manejar la incertidumbre de los riesgos planteados a los seres humanos por las sustancias químicas o los procesos recién introducidos. Sin embargo, la nanotecnología abarca una gama diversa de

composiciones, estructuras y aplicaciones, de modo que una sola evaluación de riesgos y una sola estrategia de manejo pueden no ser apropiadas (Wardak y Rejeski 2003).

La nanotecnología implica la manipulación de la materia en la nanoescala para producir materiales, estructuras y aparatos que contienen partículas de diversos tipos, tamaños, características de superficie y recubrimientos. La mejor manera de hacer frente a estas partículas es efectuando una serie de evaluaciones de los riesgos específicos de cada tipo de partícula (composición, características de la superficie y forma). Debido a la relación inversa general entre el tamaño de las partículas y el área de la superficie, las relaciones entre la dosis y el efecto pueden variar en función del área de superficie total y del número de partículas, más que de las unidades de masa (SCENIHR 2005). Las evaluaciones de los riesgos serán útiles en la medida en que reflejen los efectos de los tamaños de las partículas y el área de superficie; pero puede ser necesario que estas evaluaciones reflejen asimismo otras características de las partículas. Es más, actualmente no es claro en qué medida puede predecirse la toxicocinética (un componente importante en la evaluación de los riesgos) a partir del conocimiento de las propiedades físico-químicas de las nanopartículas (SCENIHR 2005).

*La base de evidencia para los controles de los peligros.* El modelo de ambiente en el lugar de trabajo más frecuentemente utilizado identifica las fuentes peligrosas y las rutas de exposición (por ejemplo, inhalación, piel) [Oficina de Evaluación de la Tecnología (en inglés, OTA) 1985]. El control puede introducirse en cada uno de estos puntos. Los profesionales de la seguridad y salud ocupacional han identificado una jerarquía de los controles basada en la fiabilidad, la eficiencia y el principio de que el ambiente debe ser controlado antes de que se requiera que el trabajador realice cualquier acción preventiva (OTA 1985). En su forma más sencilla, la jerarquía de los controles específica que se prefieren los controles ingenieriles (incluyendo la sustitución, el confinamiento o sellado, el aislamiento y la ventilación) al uso de equipo de protección del personal (por ejemplo, ropa protectora y respiradores). A los esfuerzos para el manejo de riesgos suelen incorporarse prácticas de trabajo que tengan por objeto minimizar la exposición de los trabajadores, y con frecuencia éstas suplementan el uso de controles ingenieriles. Algunas veces se incluyen controles administrativos como la rotación de los trabajadores, y en general constituyen la “tercera línea de defensa” cuando los controles ingenieriles y los controles de prácticas de trabajo no pueden alcanzar el nivel deseado de protección a los trabajadores (OTA 1985).

Dada la ausencia de información adecuada sobre la toxicidad y de una extensa historia del uso de nanomateriales fabricados, la lógica que subyace a la orientación en materia de controles se ha basado en la experiencia en el control de las exposiciones a las partículas ultrafinas incidentales y a los gases. Se consideraba que las nanopartículas no tienen inercia; por ende se comportarán de manera similar a los gases y se esparcirán si no están completamente confinadas (Aitken et al. 2004). Una profusa historia de la ciencia de los aerosoles describe las propiedades fundamentales de los aerosoles y su control [Congreso Americano de Higienistas Industriales Gubernamentales (en inglés, ACGIH) 2001; Brown 1993; Burton 1997; Davies 1966; Friedlander 1977; Fuchs 1964; Hinds 1999; Rafterman 1996]. Si bien algunas autoridades consideran que las partículas ultrafinas son equivalentes a las nanopartículas (SCENIHR 2005), en general (pero no exclusivamente) se encuentran en el extremo superior del rango de la nanoescala. Si las nanopartículas transportadas por el aire obedecen las leyes de la física clásica y de la aerodinámica observadas para las partículas mayores, entonces los controles que son eficaces para captar las partículas finas y ultrafinas y los gases (como el confinamiento de la fuente, la ventilación a través de un escape local y el equipo de protección del personal) deben ser eficaces también para la generación actual de nanomateriales. Es razonable creer que la mayoría de los métodos de control que se utilizan para las partículas finas y ultrafinas así como para los gases serán de utilidad para controlar las nanopartículas, pero no hay motivos para esperar que la aplicación de estos métodos a los nuevos procesos de generación de nanopartículas dé como resultado un mejor control que el anteriormente demostrado para los polvos a microescala y los gases (Aitken 2004). Un corpus de opinión considerable indica que no es posible predecir (ni derivar) los efectos adversos de las nanopartículas de la toxicidad conocida de aquellos materiales que se manejan en grandes cantidades cuya composición química y propiedades de superficie son similares (SCENIHR 2005).

Las opciones de control para las nanopartículas van de la ausencia de controles al uso del aislamiento y de contenciones practicadas con la radiación, los gases y los agentes biológicos. La pregunta es dónde en este continuo deben seleccionarse los controles. Esto también puede traducirse en cuánto dinero invertir en ellos. Cuando se sabe que los riesgos son elevados o bajos, la decisión es relativamente fácil, y las estrategias de control apropiadas generalmente son evidentes. Sin embargo, cuando los peligros son inciertos (como lo son en el caso de las nanopartículas), la dificultad estriba en decidir qué nivel de controles está justificado (Figura 1). Dada la

escasez de información sobre la toxicidad, la orientación en materia de controles debe ser considerada como provisional, y algunas autoridades consideran que debe ser precautoria, es decir, tendiente a reducir las exposiciones en la mayor medida posible (HSE 2004).

**Resumen de la evidencia sobre los peligros y los controles.** La base de evidencia referente a los peligros y los controles de la nanotecnología ha sido examinada en diversas publicaciones (Hett 2004; Maynard y Kuempel 2005; Academia Nacional de Ingeniería de EEUA 2004; NIOSH, 2006; Sociedad Real y Real Academia de Ingeniería [Royal Society and Royal Academy of Engineering] 2004; SCENIHR 2005) y está resumida en la **Tabla 2** por cuatro categorías de conocimiento descritas en función de los peligros y los controles y la conciencia que se tiene del conocimiento. Estas categorías son mutables y pertenecen al estado del conocimiento en

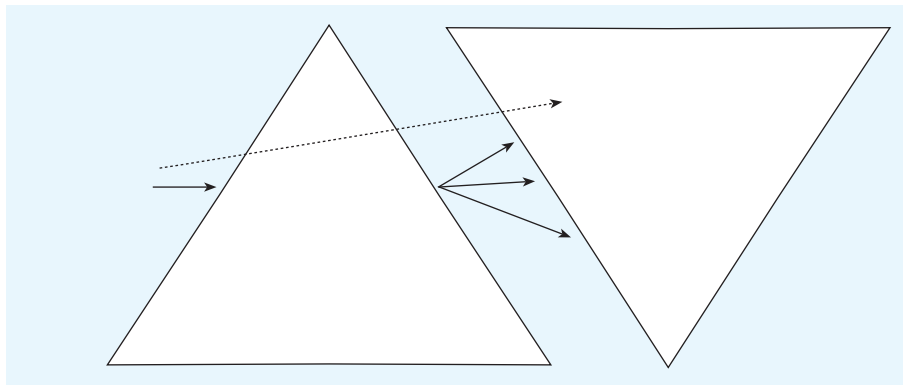
un momento determinado. La Categoría 1 (“lo que sabemos que sabemos”) indica que tenemos algún conocimiento de los peligros que representan para la salud algunos tipos de nanopartículas (por ejemplo, las partículas ultrafinas) y gases y de cómo controlarlos. Esta categoría se aplica a la generación actual de nanopartículas fabricadas y es la base de buena parte de la orientación que se brinda actualmente. La Categoría 2 de conocimiento (“lo que sabemos que no sabemos”) es la base de mucha de la investigación que se lleva a cabo o se está planeando en la actualidad. En general no sabemos mucho sobre los peligros de las partículas fabricadas nuevas o anticipadas ni si se han tomado suficientes precauciones. Una pregunta importante es no sólo cómo controlar la exposición sino también cuáles son la magnitud y el costo apropiados de los controles. La Categoría 3 de conocimiento (“lo que no sabemos que sabemos”) representa la

infrautilización del conocimiento establecido. Es decir que los científicos han tenido amplia experiencia en el control de la exposición a la radiación ionizante, a agentes biológicos, a productos farmacéuticos, a granos y polvos minerales y a la contaminación ambiental, y en los peligros que éstos implican. Esta experiencia podría influir más directamente sobre el control de los peligros de los nanomateriales en el lugar de trabajo. Además, esta categoría podría incluir la información para los propietarios acerca de las nanopartículas que no está disponible para la evaluación de los riesgos y peligros. La Categoría 4 de conocimiento (“lo que no sabemos que no sabemos”) representa un área perenne de la exploración filosófica (Caws 1998). Esta categoría incluye toda la gama de escenarios sobre la potencia de los peligros y la magnitud de los riesgos. ¿Surgirán nuevos tipos de exposiciones y riesgos con la aparición de nuevos escenarios? La literatura popular sobre la nanotecnología está repleta de caracterizaciones de escenarios futuros posibles, pero no se han hecho proyecciones de los peligros y riesgos en el lugar de trabajo (Drexler 1986; Regis 1995). La Categoría 4 de conocimiento incluye asimismo la falta de conciencia de los factores que influyen en un problema. Esta falta de conciencia puede ser enfrentada utilizando una amplia variedad de disciplinas y comunidades de interés para caracterizar un problema (HSE 2004). La Categoría 4 de conocimiento incluye además las creencias que sostenemos que pudieran ser erróneas. Estas creencias podrían llevarnos a tomar o dejar de tomar medidas de protección con base en supuestos incorrectos. Finalmente, la Categoría 4 de conocimiento puede transformarse en la Categoría 2 y posteriormente en la Categoría 1.

Independientemente de cuál tipo de conocimiento estemos contemplando, el requisito ético primordial es representar con exactitud el estado del conocimiento acerca de un riesgo o peligro y no subestimarlos ni exagerarlos. No obstante, dada la naturaleza de la nanotecnología como una tecnología en desarrollo, el conocimiento del potencial de peligro o riesgo cambiará con el tiempo y requerirá un replanteamiento y una posible modificación de la orientación. En ausencia de datos de evaluación de peligro y riesgo adecuados, la pregunta crítica es: ¿qué tanta precaución está justificada?

## Cuestiones de ética

**Identificación y comunicación de los riesgos y peligros.** La etapa de “identificación de los peligros” del análisis de riesgos es la base para la toma de decisiones en el manejo de los riesgos. El resultado de esta etapa suele ser muy discutido, ya que el proceso de razonamiento es fundamentalmente cualitativo y los



**Figura 1.** Toma de decisiones sobre el manejo de los riesgos de las nanopartículas en el lugar de trabajo: ¿Qué nivel de controles es el apropiado?

**Tabla 2.** Resumen del estado del conocimiento de los peligros y controles de las nanopartículas.

Conciencia del conocimiento	Contenido del conocimiento (peligros y controles)
1. Lo que sabemos que sabemos	Efectos sobre la salud de las partículas ultrafinas, la contaminación ambiental y las fibras Cómo controlar las partículas ultrafinas en el lugar de trabajo Importancia del tamaño, del área de superficie y de las características de la superficie Efectos graves sobre la salud de algunas nanopartículas en los animales Desplazamiento de algunos nanomateriales a lo largo del nervio olfatorio en los animales
2. Lo que sabemos que no sabemos	Técnicas de medición y caracterización Peligros de las partículas recientemente fabricadas Grado de desplazamiento en el cuerpo Interacción con los contaminantes en el lugar de trabajo Importancia de la exposición dérmica Efectos sobre la salud de los trabajadores Riesgos para los trabajadores Eficacia de los controles Conveniencia de los exámenes médicos y del monitoreo biológico Riesgos para las familias de los trabajadores
3. Lo que no sabemos que sabemos	Disponibilidad de una amplia experiencia en el control de sustancias y agentes peligrosos (radiación, agentes biológicos, productos farmacéuticos) aplicable a las nanopartículas Información sobre las nanopartículas para los propietarios Lecciones de las “nuevas” tecnologías anteriores
4. Lo que no sabemos que no sabemos	Nuevos peligros no anticipados Nuevos controles no anticipados Supuestos erróneos sobre los peligros y controles

Adaptado de Drew (1999) y Schulte et al. (2004).

resultados dan lugar a otras etapas de análisis y decisiones respecto a la acción preventiva (Crawford-Brown y Brown 1997). La interpretación de la información científica sobre los peligros de los nanomateriales es básica para comunicar los riesgos y peligros que éstos plantean para los trabajadores. La interpretación y la comunicación de la información sobre los riesgos y peligros es una parte integral del manejo de los riesgos por los patrones. La toma de decisiones por los patrones se centrará en decidir qué medidas preventivas deben ser empleadas para asegurar un lugar de trabajo seguro y saludable.

Los patrones y los trabajadores esperan que los científicos y las organizaciones autorizadas contribuyan a interpretar y poner en contexto la información sobre los riesgos y peligros. Esta expectativa puede presionar a los científicos a ir más allá de la mera investigación. La interrelación entre la ciencia y la moralidad es excesivamente compleja, pero suele considerarse que los científicos tienen obligaciones éticas hacia la sociedad en general (Pimple 2002; Schrader-Frechette 1994; Weil 2002). No obstante, no se ha llegado a un consenso sobre la naturaleza de esas obligaciones éticas más allá de cumplir con las responsabilidades profesionales inherentes a la investigación científica. Formular un enfoque claro y coherente de las responsabilidades éticas de los científicos en relación con la nanotecnología es una tarea difícil. Por lo menos, tal enfoque requiere que los científicos utilicen calificativos adecuados en los artículos que publiquen y sean cautelosos al generalizar sus resultados. En términos más amplios, significa no rehuir considerar las implicaciones de su trabajo, aun cuando no se conozcan todos los detalles científicos. Los tomadores de decisiones pueden tener información científica inadecuada para ayudarlos a decidir qué tan precautorio debe ser su enfoque (Cairns 2003). Para determinar si una decisión se ajusta al principio de la no maleficencia, los tomadores de decisiones deben calcular el daño que podría ocurrir si las nanopartículas fueran tan tóxicas como lo sugiere la información preliminar sobre sus peligros. Los datos sobre la contaminación ambiental y las partículas industriales ultrafinas indican que una masa dada de nanopartículas sería más reactiva biológicamente y por ende potencialmente más tóxica que la misma masa de partículas mayores (Seaton 2006). Como consecuencia, posiblemente se requeriría un nivel de control más estricto para los polvos de una nanoescala menor que para aquellos cuyo diámetro es mayor de 100 nm. En última instancia, los niveles de control más estrictos podrían redundar en riesgos iguales o menores que los que plantean las partículas mayores. Las organizaciones autorizadas y los patrones son responsables de comunicar los

riesgos que enfrentan los trabajadores una vez implementados los controles apropiados. El no hacerlo puede impedir que los trabajadores ejerzan su autonomía. Este problema puede complicarse por el hecho de que el patrón tenga un interés como propietario en no hacer pública la información sobre los “nanoproducidos” y sobre los controles en el lugar de trabajo. El enfoque ético principista se enfoca en principios tales como la no maleficencia y la autonomía pero no evalúa el contexto social y organizacional de la seguridad y salud ocupacional ni el lugar de los profesionales en relación con la estructura corporativa (Gert et al. 1997; Samuels 2003). Por lo que respecta a la nanotecnología, las presiones contextuales sobre los profesionales y las autoridades surgen de las necesidades y deseos de una compañía o de la sociedad de que la nanotecnología crezca y se desarrolle. La mención de problemas potenciales de salud puede ser considerada como alarmista, infundada y perjudicial para el crecimiento de este campo. No obstante, la posición contraria es que las exigencias contradictorias que pesan sobre los profesionales por ser éstos a la vez agentes de una compañía y profesionistas autónomos constituye un problema social y estructural y no un problema de ética individual (Draper 2003; Samuels 2003). Una solución es que pueden hacerse pronunciamientos en materia de salud independientemente de los intereses en promover la nanotecnología.

**La aceptación del riesgo por los trabajadores.** La aceptación del riesgo es un concepto relativo que incluye el juicio acerca de la certeza y la severidad del riesgo, la magnitud de sus efectos sobre la salud, la naturaleza voluntaria del riesgo, los riesgos y ventajas de cualquier alternativa y la compensación por someterse al riesgo (Fischhoff 1994). Es una premisa falsa aseverar que los trabajadores tienen libertad de elección en términos de qué empleos y qué condiciones de trabajo aceptar. Si bien está presente cierto componente de auto-determinación, las condiciones económicas y sociales ejercen las máximas influencias sobre la selección del empleo por los trabajadores, el nivel de riesgo tolerado y la capacidad de participar en el manejo de los riesgos. La participación de los trabajadores en el manejo de los riesgos no es un concepto estático y se ha incrementado en los últimos 35 años con la implementación de enfoques de equipo, sistemas de administración, responsabilidad de la empresa y movimientos por el derecho a saber y a actuar (Gallagher 1997; Jensen 2002; Lyn 1997; Shearn 2005). Sin embargo, los trabajadores en general no pueden rehusarse universalmente a realizar un trabajo que consideren riesgoso y aún así pretender conservar sus empleos. La conformidad con el principio de la autonomía depende de la medida en que los trabajadores tengan

participación en el manejo de riesgos en sus lugares de trabajo y del grado en el que se encuentren en riesgo una vez que se hayan implementado los controles.

La justicia también se relaciona con la toma de decisiones por los trabajadores. Se discute el grado en el que los trabajadores se ven expuestos a mayores riesgos que el público en general —o, en otras palabras, si es apropiado intercambiar incentivos tales como salarios o pagos extra por concepto de peligrosidad, por correr riesgos adicionales derivados de la exposición a nanopartículas (Schrader-Frechette 2002). Esta cuestión puede ser menos importante si los controles de las nanopartículas reducen los niveles de riesgo de los trabajadores a los que enfrenta el público en general, si es que cabe la posibilidad de que se conozcan ambos. Resulta claro que la sociedad acepta que algunos empleos conllevan inherentemente más riesgos que otros. Sin embargo, en muchos países la meta social es proporcionar un lugar de trabajo seguro y saludable para todos los trabajadores.

**Selección e implementación de controles.** La pregunta crítica en materia de ética en relación con el control de las nanopartículas es si se están implementando controles suficientes para prevenir daños y enfermedades. En caso contrario, las exposiciones de los trabajadores pueden dar como resultado daños o un riesgo incrementado de sufrírselos. El hecho científico fundamental es que no se ha establecido bien qué riesgos plantean los nanomateriales. No obstante, la información preliminar sugiere que debe extenderse el mismo nivel de preocupación que se les otorga a las partículas industriales finas y ultrafinas a los nanomateriales procesados y que debe instituirse para ellos un nivel proporcional de protección (Hett 2004; Sociedad Real y Real Academia de Ingeniería 2004; Seaton 2006). Cualquier riesgo que plantee la exposición a partículas ultrafinas es una función de su toxicidad potencial y del grado de exposición. Con base en la limitada evidencia toxicológica del riesgo y en un nivel mayor de preocupación, el mejor enfoque podría consistir en tratar a las nanopartículas fabricadas como si fueran peligros ocupacionales potenciales y utilizar un enfoque prudente de protección a la salud basado en los riesgos para desarrollar medidas precautorias provisionales congruentes con una buena práctica profesional de seguridad y salud ocupacional (Sociedad Real y Real Academia de Ingeniería 2004). Entre estas medidas precautorias provisionales podrían incluirse directrices para realizar evaluaciones de exposición en el lugar de trabajo, implementar controles ingenieriles, designar prácticas de trabajo y desarrollar límites de exposición industrial o procesal provisionales como elementos centrales. Si el foco de atención del control de las exposiciones son las partículas de dimensiones

respirables transportadas por el aire, estos enfoques pueden ser de utilidad y reflejar el juicio de los profesionales experimentados. Si la absorción por la piel es asimismo una probable ruta de exposición, deben desarrollarse directrices para prevenir la exposición de la piel. Por desgracia no hay suficientes datos para realizar una evaluación contundente basada en los riesgos para informar estas decisiones.

La evidencia sugiere que por lo menos algunas nanopartículas manufacturadas son más tóxicas por unidad de masa que las partículas mayores de las mismas sustancias químicas (Sociedad Real y Real Academia de Ingeniería 2004). Sin embargo, hay evidencias que indican que con el uso de los controles existentes para las partículas finas o ultrafinas, los trabajadores no se encontrarán en un riesgo enormemente elevado de padecer cáncer de pulmón. Por ejemplo, los cálculos basados en estudios en animales indican que los trabajadores expuestos a dióxido de titanio ultrafino en una proporción de 0.1 mg/m<sup>3</sup> durante una vida laboral de 45 años tienen un exceso de riesgo de padecer cáncer de pulmones que es < 1/1,000 y que de hecho podría aproximarse a cero (Kuempel et al. 2004). La base para estos hallazgos es el peligro que plantea el incremento en el área de superficie de las partículas para una masa dada de partículas pequeñas, según se deriva de estudios en animales extrapolados a los seres humanos. Se desconoce en qué medida este análisis se refiere a otras nanopartículas, y ésta puede variar dependiendo de su morfología, su actividad superficial y su biopersistencia. Es más, los riesgos precisos que implica la exposición a estas partículas ultrafinas pueden ser determinados únicamente si se dispone también de datos animales o humanos adecuados. Asimismo, si las partículas pueden desplazarse al sistema nervioso central o el sistema circulatorio, se requerirán otras valoraciones antes de poder extraer conclusiones (Oberdörster et al. 2005).

En pocas palabras, dada la evidencia insuficiente de los peligros que plantea la generación actual de nanopartículas, se espera una reducción de los riesgos (cualesquiera que éstos sean) cuando se utilicen los controles recomendados para las partículas industriales ultrafinas conocidas (como las de dióxido de titanio). Esta conclusión se apoya en *a*) una valuación generalizada de los riesgos basada en el área de superficie para las partículas poco solubles de baja toxicidad y *b*) el hecho de que estas partículas obedecen las leyes de la física clásica y de la aerodinámica cuando son transportadas por el aire. No obstante, las evaluaciones de riesgo futuras podrían ser diferentes, dependiendo de la biopersistencia, la estructura, la actividad superficial de las nuevas partículas y la información sobre el

desplazamiento a través de las barreras celulares endotélicas. Si las comunicaciones sobre los riesgos y los esfuerzos para el manejo de los mismos se centran en estos temas, parece existir una conformidad general con los principios éticos de beneficencia y no maleficencia. Al mismo tiempo, no hay ninguna evidencia sólida que indique que los trabajadores que laboran en estos ambientes no se encuentren en riesgo excesivo. Únicamente se supone un riesgo mínimo sobre la base de evaluaciones de riesgo cualitativas y de la utilidad de los controles probados para algunos tipos de partículas.

En términos generales, la base de conocimiento referente a los nanomateriales no es estática sino que cambia conforme los científicos desarrollan nuevos materiales y realizan investigaciones toxicológicas o de otros efectos sobre la salud. Como consecuencia, se requiere de una evaluación continua de los riesgos para la salud junto con una comunicación ininterrumpida y un desarrollo ininterumpido de planes de manejo de los riesgos acordes a los principios éticos que se examinan en este artículo.

*El establecimiento de programas de reconocimientos médicos.* Un reconocimiento médico es la aplicación de pruebas a personas asintomáticas para detectar a aquellas que se encuentran en las primeras etapas de una enfermedad o en riesgo de contraer una enfermedad. Los reconocimientos médicos en el lugar de trabajo difieren de los que se le practican a la población general debido a la naturaleza específica de la condición ocupacional y las responsabilidades de los patrones (Halperin et al 1986; Harber et al. 2003). Se ha identificado una amplia gama de preguntas de ética en relación con el reconocimiento médico de los trabajadores y el uso y las implicaciones de los hallazgos (Ashford et al. 1990; Schulte 1986). Estas preguntas se refieren a los motivos para realizar el reconocimiento médico, la naturaleza voluntaria del reconocimiento, la acción que se tomará para los trabajadores que arrojen resultados positivos en las pruebas y los individuos que tendrán acceso a la información de las pruebas. El reconocimiento médico generalmente no se justifica cuando la toxicidad de un material y el riesgo para los trabajadores son desconocidos, como es el caso de la mayoría de los nanomateriales. Es más, para enfermedades como el cáncer de pulmón (que es un resultado potencial de cierto grado de exposición a las nanopartículas) no existe una base sólida de evidencia para el chequeo rutinario; y en general no se recomienda el chequeo de la población general para cáncer de pulmón [Instituto Nacional del Cáncer (en inglés, NIC) 2006]. El reconocimiento médico no solamente no reduce la mortalidad por cáncer de pulmón sino que podría dar lugar a resultados falsamente positivos de las

pruebas y a procedimientos o tratamientos innecesariamente invasivos (NCI 2006). El reconocimiento médico de los trabajadores puede estar justificado para los efectos respiratorios no malignos de algunas operaciones nanotecnológicas en las que pueden existir riesgos residuales considerables después de que se han implementado los controles. Tal reconocimiento debería ser parte de un programa exhaustivo de manejo de riesgos que tome en cuenta no sólo los peligros respiratorios sino también los riesgos cardiovasculares y neurológicos así como los riesgos para otros sistemas de órganos que pudieren verse afectados (Oberdörster et al 2005; Radomski et al 2005; Trans et al. 2005). Si se descubre que diversos nanomateriales tienen efectos tóxicos y si existen pruebas adecuadas (validadas) para la detección temprana de esos efectos en los trabajadores expuestos, ello podría justificar el reconocimiento médico. No obstante, el reconocimiento médico se ha considerado históricamente como un esfuerzo preventivo secundario en la jerarquía de los controles (Ashford et al. 1990).

Las preguntas de ética que se aplican al reconocimiento médico de los trabajadores se refieren a si tal reconocimiento es voluntario, quién tendrá acceso a los resultados y cuál será el propósito de tal acceso. En general el reconocimiento médico requiere de una confirmación del diagnóstico; y para los casos positivos, el reconocimiento requiere un tratamiento oportuno. ¿Quién es financieramente responsable de estos procedimientos? También pueden surgir cuestiones de ética en relación al uso de los resultados del reconocimiento para etiquetar o estigmatizar a los trabajadores o para destituirlos de un empleo. Los resultados del reconocimiento pueden asimismo generar cargas psicológicas. La resolución de estas cuestiones éticas dependerá en parte del grado en el que el trabajador haya sido informado sobre cómo se utilizarán los resultados.

*El aseguramiento de una inversión adecuada en investigación toxicológica y de control.* No es posible abordar adecuadamente las cuestiones éticas en relación con la nanotecnología sin un conocimiento suficiente de los peligros que ésta implica. Dado que se dispone de información limitada sobre la seguridad de un número siempre creciente de nanomateriales, se requiere de un esfuerzo continuo de investigación para ajustarse a los principios de autonomía, beneficencia y no maleficencia. Además, se requiere de investigación sobre el grado de exposición y la eficacia de los controles. A nivel internacional ya se está llevando a cabo esta investigación.

No obstante, la cuestión del nivel del financiamiento para esta investigación tiene implicaciones éticas porque mucha de la orientación actual sobre controles es precautoria

y no se basa en evaluaciones cuantitativas de un fuerte riesgo. Investigar más es la única manera de hacer frente a esta falta de información adecuada. Algunos comentaristas han pedido que se ponga un freno a la investigación y el desarrollo de las nanopartículas, mientras que otros han identificado una necesidad de incrementar la investigación de los efectos sobre la salud y de realizar un análisis ético [Grupo de Acción sobre Erosión, Tecnología y Concentración (Grupo ETC) 2003, 2004; Mnyusiwalla et al. 2003]. Se han identificado las necesidades de una investigación basada en la salud, las cuales incluyen los siguientes temas: exposición y dosis, toxicidad, metrología, epidemiología, tecnología de control, seguridad, educación, recomendaciones y aplicaciones a corto plazo (NIOSH 2006).

Los investigadores podrían contribuir a las discusiones sobre las cuestiones de ética evaluando el presupuesto global para la investigación y el desarrollo de la nanotecnología y determinando las cantidades reales que se dedican a la investigación sobre seguridad y salud ocupacional y a la investigación ética en este campo. En términos globales, esta información no está bien documentada; pero pueden tomarse en cuenta los datos existentes de EE.UU. Por primera vez desde la creación de la NNI, se clasificó el financiamiento para el año 2005 por áreas componentes del programa. El financiamiento para el área componente de las Dimensiones Sociales incluyó 39 millones de dólares para el medio ambiente, la salud y la seguridad, y 43 millones de dólares para educar al público sobre las numerosas implicaciones de la nanotecnología para la sociedad (incluyendo las implicaciones económicas, para el lugar de trabajo, educativas, éticas y legales). Este financiamiento provino de 11 dependencias con un presupuesto combinado para la nanotecnología de aproximadamente 1,054 millones de dólares. Se ha criticado este nivel de financiamiento (el 7.8% del total) como insuficiente para el componente de las dimensiones sociales y para el subconjunto dedicado a la seguridad y salud ocupacional (Bartis y Landree 2006; Maynard 2006; Service 2005). No obstante, hay un esfuerzo internacional concertado por abordar los aspectos de salud y seguridad de los nanomateriales (NSTC 2006; Thomas et al. 2006).

**Promoción del respeto hacia las personas.** En los debates sobre la nanotecnología subyace la cuestión de tolerar los daños potenciales para algunos en aras de los beneficios para la sociedad anticipados. Este tipo de pensamiento encarna el punto de vista utilitario de que el daño a una persona puede estar justificado por un beneficio mayor para otra u otras (Harris 2003). Este punto de vista contrasta con el principio ético del respeto hacia

las personas, que hace énfasis en los derechos del individuo y está asociado con la regla de oro (“No hagas a los demás lo que no quieras que te hagan”) (Gewirth 198, 1986). En el lugar de trabajo este principio se traduce en reconocer que cada trabajador tiene el derecho a un ambiente de trabajo seguro y saludable. Este derecho impone a los patrones y gobiernos deberes correlativos que deben garantizar los derechos de los trabajadores a un lugar de trabajo seguro y saludable (Gewirth 1986). La objeción a esta interpretación es que los derechos de los patrones, y por ende los derechos de la sociedad, a la propiedad y a las ventajas resultantes de la nanotecnología, pueden estar (o pueden parecer estar) en conflicto con los derechos de los trabajadores. Cuando dos derechos están en conflicto debe encontrarse alguna manera racional de determinar su prioridad relativa. Gewirth (1986) identificó un criterio esencial para esta prioridad como los grados de necesidad de acción. Por ejemplo, cuando los derechos de propiedad de los patrones puedan estar en conflicto con los derechos de los trabajadores a la seguridad y la salud, la disminución de la salud o la amenaza a la seguridad disminuyen la capacidad de acción y constituyen una pérdida mayor que algún grado de disminución de la propiedad de otra persona, de su riqueza o de su libertad para controlarla. La implicación práctica es ésta: en ausencia de información adecuada sobre los riesgos, peligros y controles de la nanotecnología, los patrones tendrían que verse motivados a emplear más medidas de control, no menos (Hett 2004).

La realización de evaluaciones de los peligros específicos del lugar y el uso de los controles adecuados parecen demostrar conformidad con el principio del respeto hacia las personas y con los principios de autonomía, beneficencia y no maleficencia. Sin embargo, el grado de las medidas de control requeridas puede ser el tema fundamental de las controversias. En su mayoría, el control de la generación actual de la mayoría de las partículas fabricadas está dentro de las capacidades de las tecnologías actualmente existentes. La cuestión es cuánto invertir en la aplicación de esas tecnologías en un determinado lugar de trabajo.

### **Estrategias de apoyo para la toma de decisiones ética**

**Hacer especial énfasis en las pequeñas empresas.** Los problemas de seguridad y salud ocupacional de las empresas pequeñas han sido un importante foco de preocupación, en particular en la última década, puesto que la mayoría de los lugares de trabajo están clasificados como pequeños (es decir, como lugares de trabajo en los que laboran menos de 250, 100 ó 20 trabajadores, dependiendo de la definición). Esta afirmación probablemente

es válida para aquellos lugares de trabajo en los que se utiliza la nanotecnología, pero no está bien documentada (Aitken et al. 2004; Roco y Bainbridge 2003). La frecuencia de las lesiones y enfermedades ocupacionales en las empresas pequeñas puede exceder el promedio para la industria general en todas las empresas de un sector, pero la frecuencia puede no resultar evidente en una compañía individual (NIOSH 1999). En general se considera que las empresas pequeñas dedican poco tiempo y pocos recursos a la seguridad y salud ocupacional.

Las pequeñas empresas son la fuerza impulsora de la mayoría de las economías, incluyendo el subconjunto de las economías relacionadas con la nanotecnología (Roco y Bainbridge 2003). Los asesores independientes, las asociaciones comerciales, las compañías aseguradoras, los proveedores de productos y las dependencias gubernamentales son las principales fuentes de información sobre seguridad y salud ocupacional para las empresas pequeñas. Esta información también puede ser pasada de los proveedores y distribuidores de productos con nanopartículas a los detallistas y usuarios de los mismos. De hecho, en el caso de los peligros documentados, los proveedores pueden tener una obligación ética o legal de transmitir esta información a los clientes al menudeo. Hay una necesidad de contar con información orientadora sobre los peligros y riesgos de la nanotecnología y sobre los controles para las pequeñas empresas.

### **La adopción de una perspectiva global.**

El crecimiento de la nanotecnología es un fenómeno global que requiere de un enfoque global de los riesgos y peligros, particularmente en el lugar de trabajo. El mundo necesita normas internacionalmente válidas para los materiales de la nanotecnología, así como una nomenclatura uniforme (Sociedad Americana de Pruebas y Materiales [American Society for Testing and Materials] 2005; Hett 2004). Sin una nomenclatura uniforme, los investigadores, aseguradores, reguladores, gobiernos, compañías y trabajadores tendrían dificultades para comunicarse y para llevar a cabo acciones concertadas.

El flujo de los materiales en la economía global cruza muchas fronteras, incluyendo las de las naciones en vías de desarrollo (Salamanca-Buentello et al. 2005). Así, para asegurar la seguridad y la salud de los trabajadores, los tomadores de decisiones (patrones o autoridades gubernamentales) deben saber y comprender qué materiales se utilizan en los diversos procesos y operaciones. Este problema es complejo porque pueden emplearse muchas definiciones y descripciones diferentes en los documentos basados en la ciencia y en las regulaciones. Para desarrollar la nanotecnología con un mínimo de riesgos, deben

identificarse las lagunas de conocimiento, mismas que deben ser enfrentadas mediante la cooperación internacional. También se requiere de un marco de evaluación de riesgos transparente que pueda lograr una amplia aceptabilidad (SCENIHR 2005).

Los enfoques globales respecto al compartir información sobre salud y seguridad ocupacional requieren de crecientes oportunidades y capacidades de obtener acceso a la información. Ni siquiera se reconoce mundialmente la manera "correcta" de saber acerca de los riesgos —o, en términos más amplios, el derecho a la información (Pantry 2002). La Organización Mundial de la Salud (OMS) promueve el derecho a la salud en el trabajo para todos. La información es un medio para realizar ese derecho. Pese que hay un gran número de países que son miembros de la OMS, el verdadero acceso a la información y a la distribución dentro de los países sigue siendo un problema.

Las comunicaciones sobre riesgos (incluyendo hojas de datos sobre la seguridad de los materiales) deberían reflejar cierto grado de uniformidad en todo el mundo. Está justificada una colaboración internacional para garantizar que los procesos peligrosos no queden relegados a los países con un mercado de mano de obra barata o con controles ambientales poco estrictos (Singer et al. 2005, 2006). Una cuestión crítica que tiene implicaciones tanto nacionales como globales es si los países darán las nanopartículas hechas de una sustancia determinada un trato diferente del que dan a los materiales hechos con partículas mayores de la misma sustancia. Las características de las nanopartículas pueden diferir de las de las partículas mayores con la misma composición. Por ejemplo, en general la mayoría de los materiales hechos a partir del carbono parecen presentar riesgos mínimos para la salud; sin embargo, los nanotubos hechos de carbono pueden plantear un riesgo mayor para la salud y aun así estar regulados a un nivel de protección menor (Shvedova et al. 2005). La cuestión es si recomendar la misma comunicación sobre riesgos y la misma estrategia de manejo para ambos. Con base en el ejemplo de los nanotubos de carbono, es probable que se requieran nuevas normas y materiales de comunicación sobre riesgos por lo menos para ciertas nanopartículas.

## Conclusiones

Las cuestiones de ética respecto a la nanotecnología en el lugar de trabajo surgen del estado del conocimiento sobre los peligros de los nanomateriales y los riesgos que éstos pueden plantear para los trabajadores. La falta de claridad respecto a estas cuestiones requiere de una evaluación provisional de los riesgos y peligros que pudieran existir en diversas situaciones. Los trabajadores podrán ejercer

su autonomía únicamente si los procesos que llevan a la identificación y evaluación de los riesgos son transparentes y comprensibles.

Los patrones se apegarán a los principios de la autonomía, beneficencia, no maleficencia, justicia, privacidad y respeto hacia las personas en la medida en que *a)* representen con exactitud los riesgos y peligros, *b)* tengan un enfoque precautorio respecto a los peligros, *c)* establezcan una comunicación y un diálogo con los trabajadores y *d)* den los pasos necesarios para controlar los riesgos de modo que éstos les resulten razonables y aceptables para los trabajadores.

## REFERENCES

- ACGIH. 2001. *Industrial Ventilation: a Manual of Recommended Practice*. Cincinnati, OH: American Conference of Governmental Industrial Hygienists.
- Aitken RJ, Creely KS, Tran CL. 2004. Nanoparticles: An Occupational Hygiene Review. Health Safety Executive, Research Report 274. London: HSE Books.
- Ashford NA, Spadafor CJ, Hattis DB, Caldard CC. 1990. *Monitoring the Worker for Exposure and Disease: Scientific Legal and Ethical Considerations in the Use of Biomarkers*. Baltimore, MD: The Johns Hopkins University Press.
- American Society for Testing and Materials. 2005. *New Standard Terminology for Nanotechnology*. WK8051. Available: <http://www.astm.org/cgi-bin/SoftCart.exe/DATABASE.CART/WORKITEMS/WK8051.htm?L=mystore-rdik5786-1158038968> [accessed 11 September 2006].
- Bartis JT, Landree E. 2006. *Nanomaterials in the Workplace: Policy and Planning Workshop on Occupational Safety and Health*. Arlington, VA: RAND Corporation.
- Beauchamp TL, Childress JL. 1994. *Principles of Biomedical Ethics*. 4th ed. New York: Oxford University Press.
- Berube DM. 2004. The rhetoric of nanotechnology. In: *Discovering the Nanoscale* (Baird D, Nordman A, Schummer J, eds). Amsterdam: IOS Press, 173–192.
- Brown RC. 1993. *Air Filtration*. New York: Pergamon Press.
- Burton J. 1997. General methods for the control of airborne hazards. In: *The Occupational Environment—Its Evaluation and Control* (DiNardi SR, ed). Fairfax, VA: American Industrial Hygiene Association.
- Cairns J Jr. 2003. Integrating top-down/bottom-up sustainability strategies: an ethical challenge. *Ethics Sci Environ Politics* 1–6. Available: <http://www.int-res.com/articles/esep/2003/E26.pdf#search=%22cairns%20integrating%20top-down%202003%22> [accessed 11 September 2006].
- Caws P. 1998. Communication lag. *Sci Commun* 20:14–20.
- Crawford-Brown DJ, Brown KG. 1997. A framework for assessing the rationality of judgments in carcinogenicity hazard identification. *Risk* 8:307. Available: <http://www.piercelaw.edu/risk/vol8/fall/Cr-Br+.htm> [accessed 11 September 2006].
- Davies CN. 1966. *Aerosol Science*. London: Academic Press.
- Donaldson K, Aitken R, Tran L, Stone V, Duffin R, Forrester G, et al. 2006. Carbon nanotubes: a review of their properties in relation to pulmonary toxicology and workplace safety. *Toxicol Sci* 92:5–22.
- Donaldson K, Stone V, Tran CL, Kreyling W, Borm PJA. *Nanotoxicology*. 2004. *Occup Environ Med* 61: 727–728.
- Draper E. 2003. *The Company Doctor: Risk and Responsibility and Corporate Professionalism*. New York: Russell Sage Foundation.
- Drew S. 1999. Building knowledge management into strategy: making sense of a new perspective. *Long Range Planning* 32:130–136.
- Drexler KE. 1986. *Engines of Creation*. New York: Anchor Press/Doubleday.
- Elder A, Gelein R, Silva V, Feikert T, Opanashuk L, Carter J, et al. 2006. Translocation of inhaled ultrafine manganese oxide particles to the central nervous system. *Environ Health Perspect* 114:1172–1178.
- ETC Group. 2003. *The Big Down: From Genomes to Atoms*. Winnepeg, Ontario, CN: Action Group on Erosion, Technology and Concentration.
- ETC Group (Action Group on Erosion, Technology and Concentration). 2004. *Down on the Farm: The Impact of Nano-Scale Technologies on Food and Agriculture*. [http://www.etcgroup.org/upload/publication/80/01/etc\\_dot-farm2004.pdf](http://www.etcgroup.org/upload/publication/80/01/etc_dot-farm2004.pdf) [accessed 16 November 2006].
- Fischhoff B. 1994. Acceptable risk: a conceptual proposal. *Risk* 5:1. Available: <http://www.piercelaw.edu/risk/vol5/winter/Fischhof.htm> [accessed 11 September 2006].
- Friedlander SH. 1997. *Smoke, Dust, and Haze: Fundamentals of Aerosol Behavior*. New York: John Wiley and Sons.
- Fuchs NA. 1964. *The Mechanics of Aerosols*. Oxford, UK: Pergamon Press.
- Gallagher C. 1997. Types of health and safety management systems. In: *Health and Safety Management Systems: An Analysis of System Types and Effectiveness*. Canberra, ACT: Office of the Australian Safety and Compensation Council.
- Gert B, Culver CM, Clouser, KD. 1997. *Bioethics: A Return to Fundamentals*. New York: Oxford University Press.
- Gewirth A. 1978. *Reason and Morality*. Chicago: University of Chicago Press.
- Gewirth A. 1986. Human rights in the workplace. *Am J Ind Med* 9:31–40.
- Halperin WE, Ratcliffe J, Frazier TM, Wilson L, Becker SP, Schulte PA. 1986. Medical screening in the workplace: proposed principles. *J Occup Med* 28:547–552.
- Harber P, Conlon C, McCunney RJ. 2003. Occupational medical surveillance. In: *A Practical Approach to Occupational and Environmental Medicine* (McCunney RJ, ed). Philadelphia: Lippincott Williams and Wilkins, 582–599.
- Harris CE. 2003. Methodologies for case studies in engineering ethics. In: *Emerging Technologies and Ethical Issues in Engineering*. Washington, DC: National Academy of Sciences, 79–93.
- Heinrich U, Fuhrst R, Rittinghause S, Creutzenberg O, Bellmann B, Koch W, et al. 1995. Chronic inhalation exposure of Wistar rats and 2 different strains of mice to diesel-engine exhaust, carbon black, and titanium dioxide. *Inhal Toxicol* 7:533–556.
- Hett A. 2004. *Nanotechnology: Small Matter, Many Unknowns*. Zurich: Swiss Reinsurance Company. Available: [http://www.swissre.com/INTERNET/pwfsfilepr.nsf/vwFilebyID-KEYLU/ULR-68AKZF/FILE/Pub04\\_nano\\_en.pdf](http://www.swissre.com/INTERNET/pwfsfilepr.nsf/vwFilebyID-KEYLU/ULR-68AKZF/FILE/Pub04_nano_en.pdf) [accessed 16 November 2006].
- Hinds WC. 1999. *Aerosol Technology*. New York: John Wiley & Sons.
- HSE. 2004. *Nanotechnology HSE Information Note*. Horizons Scanning Information Note no. HSIN1. London: Health and Safety Executive.
- Jensen PL. 2002. Assessing assessment: the Danish experience of worker participation in risk assessment. *Econ Ind Democracy* 23:201–207.
- Kantowitz A. 1995. The separation of facts and values. *Risk* 6:105. Available: <http://www.piercelaw.edu/risk/vol6/spring/Kantro2.htm> [accessed 12 September 2006].
- Kipen HM, Laskin DL. 2005. Smaller is not always better: nanotechnology yields nanotoxicology. *Am J Physiol Lung Cell Mol Physiol* 289(5):L696–L697.
- Kuempel ED, Wheeler M, Smith R, Bailer J. 2004. A quantitative risk assessment in workers using rodent dose-response data of fine and ultrafine titanium dioxide. In: *Report of Presentations of Plenary and Workshop Sessions and Summary of Conclusions*. Nanomaterials—A Risk to Health at Work? 12–14 October 2004, Buxton, UK. Buxton, UK: Health and Safety Laboratory. Available: [http://www.hsl.gov.uk/capabilities/nanosymp\\_final.pdf](http://www.hsl.gov.uk/capabilities/nanosymp_final.pdf) [accessed 12 September 2006].
- Lam CW, James JT, McCluskey R, Hunter RL. 2004. Pulmonary toxicity of single-wall carbon nanotubes in mice 7 and 90 days after intratracheal instillation. *Toxicol Sci* 77:126–134.
- Lam CW, James JT, McCluskey RL, Arlli S, Hunter RL. 2006. A review of carbon nanotube toxicity and assessment of potential occupational and environmental health risks. *Crit Rev Toxicol* 36:159–217.
- Lynn FM. 1997. Public Participation in Risk Management Decisions: The Right to Define, the Right to Know, and the Right to Act. *Risk* 1:95. Available: <http://www.piercelaw.edu/risk/vol1/spring/lynn.htm> [accessed 11 September 2006].
- Mark D. 2004. *Nanomaterials—A Risk to Health at Work?* Buxton, UK: Health and Safety Laboratory, SK17 9 JN. Available: [www.hsl.gov.uk/capabilities/nanosymp\\_final.pdf](http://www.hsl.gov.uk/capabilities/nanosymp_final.pdf) [accessed 11 September 2006].
- Maynard AD. 2006. *Nanotechnology: A Research Strategy*

- for Addressing Risk. Washington, DC:Woodrow Wilson International Center for Scholars.
- Maynard AD, Kuempel ED. 2005. Airborne nanostructured particles and occupational health. *J Nanoparticles Res* 7:587–614.
- Mnyusiwalla A, Daar AS, Singer PA. 2003. "Mind the Gap": science and ethics in nanotechnology. *Nanotechnology* 14:R9–R13.
- Moor J, Wechert J. 2004. Nanoethics: assessing the nanoscale from an ethical point of view. In: *Discovering the Nanoscale* (Baird D, Nordmann A, Schummer J, eds). Amsterdam:IOS Press, 301–310.
- National Academy of Engineering. 2004. *Emerging Technologies and Ethical Issues in Engineering: Papers from a Workshop, 14–15 October 2003, Washington, DC*. Washington, DC:National Academies Press. Available: <http://newton.nap.edu/books/030909271X/html> [accessed 16 November 2006].
- NCI (National Cancer Institute). 2006. Lung Cancer (PDQ®): Screening. Available: <http://www.cancer.gov/cancertopics/pdq/screening/lung/healthprofessional> [accessed 16 November 2006].
- Nel A, Xia T, Mädler L, Li N. 2006. Toxic potential of materials at the nanolevel. *Science* 311: 622–627.
- NIOSH. 1999. *Identifying High-Risk Small Business Industries: The Basis for Preventing Occupational Injury, Illness, and Fatality*. NIOSH (DHHS) Publ no. 99–107. Cincinnati, OH:National Institute for Occupational Safety and Health.
- NIOSH. 2006. *Approaches to Safe Nanotechnology: An Information Exchange with NIOSH*. Cincinnati, OH: National Institute for Occupational Safety and Health, Available: <http://www.cdc.gov/niosh/topics/nanotech/safenano/> [accessed 11 September 2006].
- NNI (National Nanotechnology Initiative). 2004. *NNI Strategic Plan*. Available: [www.nano.gov/html/about/strategic-plan2004.html](http://www.nano.gov/html/about/strategic-plan2004.html) [accessed 12 September 2006].
- NSTC. 2006. *The National Nanotechnology Initiative. Environmental, Health and Safety Research for Engineered Nanoscale Materials*. Arlington, VA:National Nanotechnology Coordination Office, National Science and Technology Council.
- Oberdörster G, Oberdörster E, Oberdörster J. 2005. Nanotoxicology: an emerging discipline evolving from studies of ultrafine particles. *Environ Health Perspect* 113:823–837.
- OTA. April 1985. *Preventing Illness and Injury in the Workplace. OTA-H-256*. Washington, DC:U.S. Congress, Office of Technology Assessment.
- Pantry S. 2002. *The Unequal OSH (Occupational Safety and Health) World of Information*. Available: <http://www.sheilapantry.com/oshworld/editorial/2002/200206.html> [accessed 16 November 2006].
- Peters A. 2005. Particulate matter and heart disease: evidence from epidemiological studies. *Toxicol Appl Pharmacol* 207:S477–S482.
- Pimple KD. 2002. Six domains of research ethics. A heuristic framework for the responsible conduct of research. *Sci Eng Ethics* 8:191–205.
- Radomski A, Jurasz P, Alonso-Escolano P, Drew M, Morandi M, Tadeusz M, et al. 2005. Nanoparticle-induced platelet aggregation and vascular thrombosis. *Br J Pharmacol* 146:882–893.
- Ratherman S. 1996. *Methods of control*. In: *Fundamentals of Industrial Hygiene* (Plog B, ed). Itasca, IL: National Safety Council.
- Regis E. 1995. *Nano: The Emerging Science of Nanotechnology: Remaking the World-Molecule by Molecule*. New York: Little Brown and Co.
- Roco MC, Bainbridge WS. 2003. *Societal Implications of Nanoscience and Nanotechnology*. Nanoscale Science, Engineering and Technology (NSET) Workshop Report, 3–5 December 2005, Arlington, VA. Arlington, VA:National Science Foundation.
- Royal Society and Royal Academy of Engineering. 2004. *Nanoscience and Nanotechnologies: Opportunities and Uncertainties*. London:Royal Society and Royal Academy of Engineering.
- Salamanca-Buentello F, Persad DL, Court EB, Martin DK, Daar AS, Singer PA. 2005. Nanotechnology and the developing world. *PLoS Med* 2:e97.
- Samuels S. 2003. Occupational medicine and its moral discontents. *J Occup Environ Med* 45:1226–1233.
- SCENIHR. 2005. *Request for a Scientific Opinion on the Appropriateness of Existing Methodologies to Assess the Potential Risks Associated with Engineered and Adventitious Nanotechnologies*. SCENIHR/002/05. Brussels: European Commission, Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks.
- Schrader-Frechette K. 1994. *Ethics of Scientific Research*. Lanham, MD:Ronan and Littlefield.
- Schrader-Frechette K. 2002. *Environmental Justice: Creating Equality, Reclaiming Democracy*. New York: Oxford University Press.
- Schulte PA. 1986. Problems in notification and screening of workers at high risk of disease. *J Occup Med* 28:951–957.
- Schulte PA, Lentz TJ, Anderson VP, Lamborg AD. 2004. Knowledge management in occupational hygiene: the United States example. *Ann Occup Hyg* 48:583–594.
- Seaton A. 2006. Nanotechnology and the occupational physician. *Occup Med (Lond)* 56(5):312–316.
- Service RF. 2005. Calls rise for more research on toxicology of nanomaterials. *Science* 310:1609.
- Shearn P. 2005. *Workforce Participation in Occupational Health and Safety in Non-Unionized Workplaces*. HSE Report no. HSL/2005/41. London:Health and Safety Executive.
- Shvedova AA, Kisin EK, Mercer R, Murray AR, Johnson VJ, Potapovich AI, et al. 2005. Unusual inflammatory and fibrogenic pulmonary responses to single-walled carbon nanotubes in mice. *Am J Physiol Lung Cell Mol Physiol* 289(5): L698–L708.
- Singer P. 2004. *Nanotechnology Ethics. Designing Nanostructures—A Tutorial*. New York:New York Academy of Sciences. Available: <http://www.nyas.org/ebriefreps/splash.asp?intbriefID=321> [accessed 16 November 2006].
- Singer PA, Daar AS, Salamanca-Buentello F, Court EB. 2006. Nano-diplomacy. *Georgetown J Int Affairs Winter/Spring*:129–137.
- Singer PA, Salamanca-Buentello F, Daar AS. 2005. Harnessing nanotechnology to improve global equity. *Iss Sci Technol Summer*: 57–64.
- Thomas K, Aguar P, Kawasaki H, Morris J, Nakanishi J, Savage N. 2006. *Research strategies for safety evaluations of nanomaterials. Part VIII: International efforts to develop risk-based safety evaluations for nanomaterials*. *Toxicol Sci* 92:23–32.
- Tran CL, Buchanan D, Cullen RT, Searl A, Jones AD, Donaldson K. 2000. Inhalation of poorly soluble particles. II. Influence of particle surface area on inflammation and clearance. *Inhal Toxicol* 12:1113–1126.
- Tran CL, Donaldson K, Stones V, Fernandez T, Ford A, Christofi N, et al. 2005. *A Scoping Study to Identify Hazard Data Needs for Addressing the Risks Presented by Nanoparticles and Nanotubes*. Research Report. London: Institute of Occupational Medicine.
- U.S. EPA. 2004. *Air Quality Criteria for Particulate Matter. Vol 1. 600/p-99/002aF. Research Triangle Park, NC:U.S. Environmental Protection Agency*.
- Wardak A, Rejeski D. 2003. *Nanotechnology and Regulation: A Case Study Using the Toxic Substances Control Act (TSCA); A Discussion Paper*. Publication 2003–6. Washington, DC:Woodrow Wilson International Center for Scholars, Foresight and Governance Project.
- Warheit DB, Laurence BR, Reed KL, Roach DH, Reynolds GAM, Webb TR. 2004. Comparative toxicity assessment of single-wall carbon nanotubes in rats. *Toxicol Sci* 76:117–125.
- Weil V. 2002. Making sense of scientists' responsibilities at the interface of science and society. *Sci Eng Ethics* 8:223–227.