TECNOECUATORIANO
INSTITUTO SUPERIOR TECNOLÓGICO

FOLLETO COMPLEMENTARIO DOCENTE:

RIESGOS NANOTECNOLÓGICOS

ENRIQUE GERMÁN
BARRENO PARRA

Quito – Ecuador
Septiembre 2024

Folleto complementario docente: Riesgos nanotecnológicos

Enrique Germán Barreno Parra
Instituto Superior Tecnológico Tecnoecuatoriano
ebarreno@istte.edu.ec
https://orcid.org/0009-0003-0475-0167

Este libro ha sido sometido a revisión de doble par académico:
Dra. Selene Ayala Pilco, Mgs.
Instituto Superior Tecnológico Vicente León
SENESCYT

Abg. Casandra Zambrano Chávez, Mgs.
Gerente
Plus Soluciones

Corrección de estilo: Ángel Velásquez Cajas
Diseño y diagramación: Juan Carlos Tapia Calama

Primera Edición
Instituto Superior Tecnológico Tecnoecuatoriano
Rimana Editorial
Quito – Ecuador
Septiembre 2024

ISBN: 978-9942-676-96-2

ÍNDICE

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Prólogo 12

13

CAPÍTULO I

El significado de nano

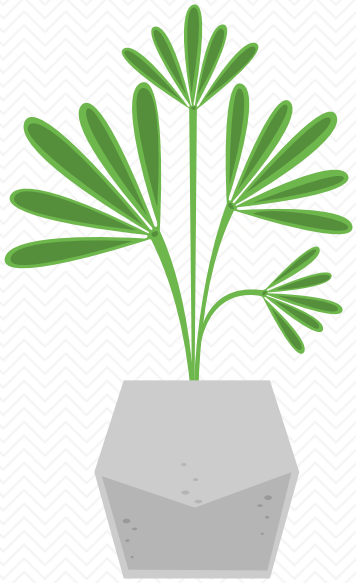
Introducción. 14

El sufijo Nano. 15

Prefijos y Sufijos. 15

Conversiones. 16

Ejercicios. 17



18

CAPÍTULO II

Nanomateriales

Introducción. 19

La Nanotecnología. 20

Definición. 20

Tipos de Nanotecnología. 22

Descendente (top-down). 22

Ascendente (bottom-up). 22

Seca. 22

Húmeda. 22

Nanomateriales. 23

Aplicaciones de los nanomateriales. 28

34

CAPÍTULO III

¿Los riesgos por la presencia de nanomateriales

Introducción. 35

Entornos laborales expuestos a nanomateriales. 36

Fabricación del Nanomaterial. 36

Incorporación del nanomaterial al producto intermedio o final. 37

Utilización profesional de productos que contienen nanomateriales. 37

Los riesgos por la presencia de nanopartículas. 39

Riesgos de Seguridad (Incendios y Explosiones). 39

Riesgos para la salud (toxicidad). 39

42

CAPÍTULO IV

Evaluación de riesgos por la presencia de nanopartículas

Introducción. 43

Evaluación del Riesgo por exposición a nanopartículas. 44

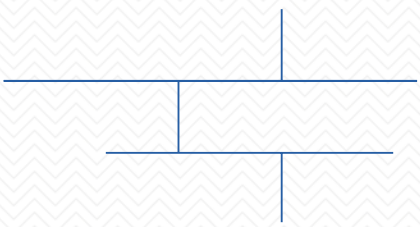
Método cuantitativos. 44

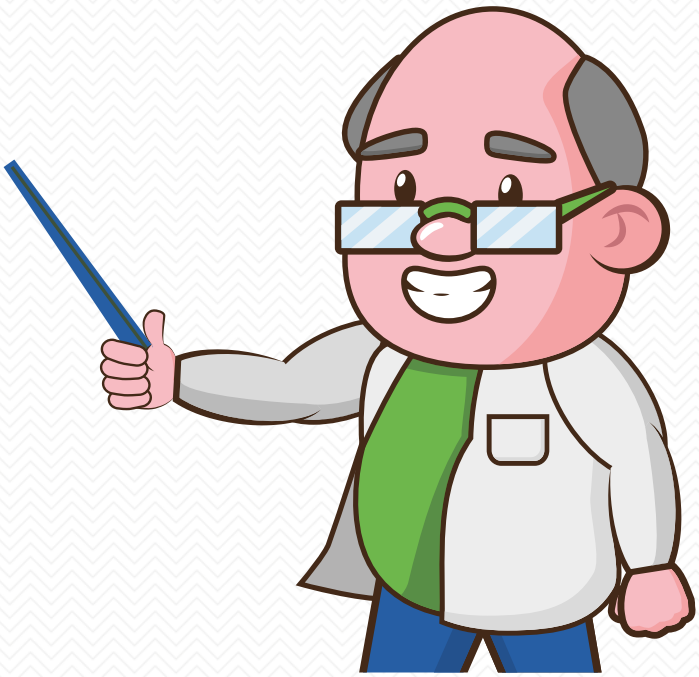
Métodos cualitativos. 49

Controles. 53

Estudios de Caso. 59

Referencias. 63





ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1

Comparativas de los sufijos. 16

Figura 2

Bloques con nanopartículas y bloques con materiales normales. 20

Figura 3

Acabado de pintura automotriz con nanopartículas. 21

Figura 4

Circuito impreso elaborado con tinta conductiva con nanopartículas. 21

Figura 5

Tipos de nanotecnología. 22

Figura 6

Nanomaterial. 23

Figura 7

Clasificación de nanomateriales. 24

Figura 8

Clasificación de nanomateriales por sus dimensiones. 24

Figura 9

Nanomateriales 0-D. 25

Figura 10

Nanomateriales 1-D. 26

Figura 11

Nanomateriales 2-D. 27

Figura 12

Equipo para la fabricación de nanomateriales. 36

Figura 13

Mezcla de nanomateriales con otros productos. 37

Figura 14

Toxicocinética de nanopartículas. 41

Figura 15

Proceso de evaluación de riesgos por presencia de nanopartículas. 45

Figura 16

Publicaciones de la ACGIH e INSST anuales. 46

Figura 17

Base del método de Evaluación del riesgo. 50

Figura 18

Base del método de evaluación del riesgo. 52

Figura 19

Métodos de evaluación cualitativa. 53

Figura 20

Proceso de obtención de nanopartículas en húmedo. 54

Figura 21

Recirculación de aire. 55

Figura 22

Ventilación. 56

Figura 23

Aislamiento o confinamiento del proceso. 56

Figura 24

Ingerir alimentos en sitios de trabajo aumenta los riesgos. 57

Figura 25

Equipos de Protección Personal (EPP). 58

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1

Prefijos y sufijos. 15

Tabla 2

Clasificación de nanopartículas por su tamaño. 28

Tabla 3

Aplicaciones de los nanomateriales en la electrónica. 29

Tabla 4

Aplicaciones de los Nanomateriales en la industria de la cosmética. 30

Tabla 5

Aplicaciones de los nanomateriales en la industria alimenticia. 31

Tabla 6

Aplicaciones de los nanomateriales en la industria textil. 32

Tabla 7

Aplicaciones de los nanomateriales en generación de energía. 33

Tabla 8

Tabla resumen de propiedades y aplicaciones de los nanomateriales. 38

Tabla 9

Valores límites de exposición. 47

Tabla 10

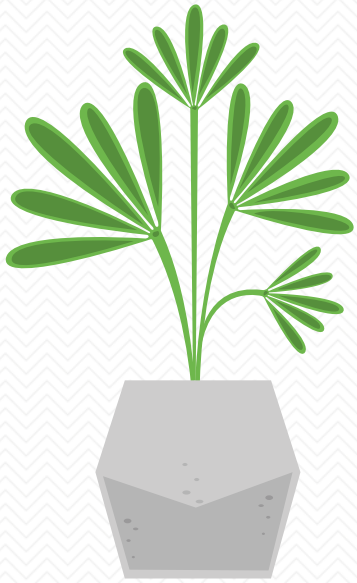
Valores límites de exposición propuestas por país. 48

Tabla 11

Matriz de decisiones en función de la severidad y probabilidad. 50

Tabla 12

Factores considerados para la puntuación de la severidad. 51



Agradecimientos

Agradezco al Departamento de Investigación del Instituto Superior Tecnológico Tecnoecuatoriano por sus valiosos aportes y consejos.

A la Dra. Helen Pazmiño por su confianza hacia mi persona.

A mi esposa Diana y mis padres por su paciencia y compañía.

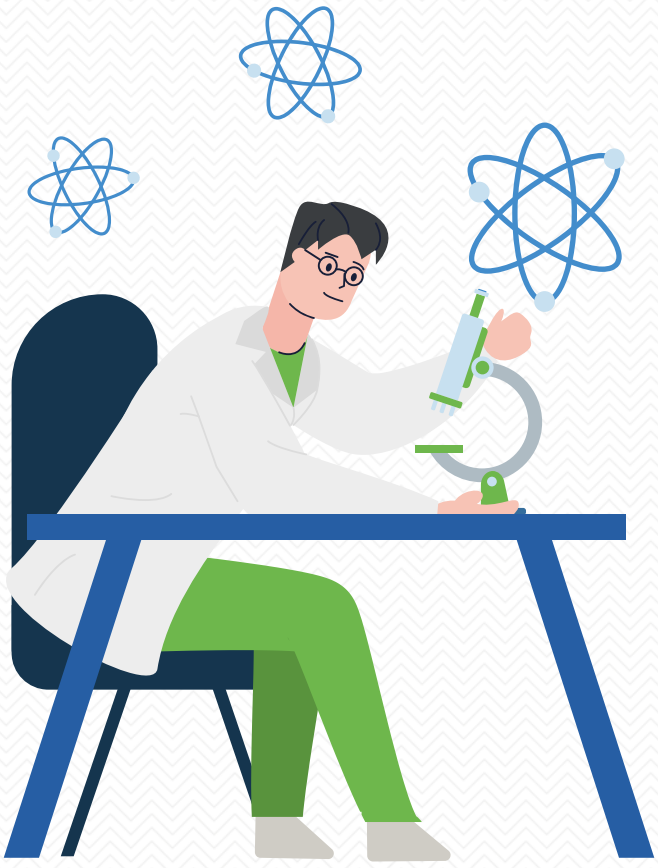
Biografía del autor

Enrique Barreno Para es un destacado docente en el ámbito de la educación técnica y tecnológica, especializado en sistemas eléctricos y electrónicos del vehículo, así como en gestión administrativa, gestión técnica y procedimientos operativos básicos de seguridad y salud ocupacional. Con una sólida formación académica y una trayectoria de más de 22 años en el ámbito educativo, ha sido una pieza clave, tanto en instituciones públicas como privadas, brindando conocimientos y experiencias a las nuevas generaciones.

Enrique es Magíster en Pedagogía con mención en Educación Técnica y Tecnológica. Esto le ha permitido integrar de manera efectiva métodos de enseñanza innovadores y adaptados a las necesidades del siglo XXI. Además, es Magíster en Seguridad y Salud Ocupacional y ha consolidado su experticia en la prevención de riesgos laborales, desempeñándose como asesor y capacitador en esta área para diversas empresas.

El autor también es Ingeniero en Gestión de Procesos y ha aplicado sus conocimientos en la creación y ejecución de proyectos empresariales, lo que le ha otorgado un enfoque integral entre la educación y el ámbito laboral. Como Tecnólogo en Electrónica, su pasión por la tecnología lo ha llevado a obtener importantes logros, siendo un líder comprometido en el campo laboral y educativo.

Su enfoque pedagógico y su dedicación al aprendizaje continúan siendo una inspiración para estudiantes y colegas, consolidándose como un referente en su campo de especialización.



PRÓLOGO

Prólogo

En la búsqueda constante por mejorar la calidad de vida y desarrollar nuevas tecnologías, la nanotecnología ha surgido como una revolución científica que ofrece un sinfín de posibilidades. Desde su capacidad para crear materiales más resistentes y livianos hasta su aplicación en la medicina para tratamientos más precisos, las nanopartículas han capturado la imaginación de investigadores y la atención de industrias en todo el mundo. Sin embargo, esta promesa viene acompañada de desafíos significativos, especialmente, en cuanto a los riesgos que estas partículas pueden representar para la salud humana y el medio ambiente.

Ecuador, un país en vías de desarrollo con una biodiversidad excepcional y un ecosistema único, no es ajeno a las oportunidades que la nanotecnología puede ofrecer. Sin embargo, a medida que el uso de nanopartículas se expande en diversas industrias, desde la agricultura hasta la medicina, es crucial considerar los riesgos potenciales asociados con su presencia y dispersión en los entornos laborales. La capacidad de las nanopartículas para interactuar con sistemas biológicos de maneras todavía no completamente comprendidas, junto con su capacidad para ingresar al medio ambiente y acumularse en los ecosistemas, plantea serias preguntas sobre su seguridad y salud ocupacional.

En el país, existe investigaciones en centros de nanociencia y nanotecnología que principalmente se encuentran en ciertas universidades dedicadas a la investigación y desarrollo en este campo. También, se investiga la gran cantidad de productos de uso cotidiano que contienen nanopartículas, con el fin de mejorar sus características y calidad, transformando diversas industrias en el Ecuador; por el contrario, su manejo inadecuado podría acarrear consecuencias adversas que aún no se comprenden del todo.

Por eso es necesario conocer sobre esta nueva tecnología, para poder aplicar evaluaciones, sean cuantitativas o cualitativas que permitan implementar controles y prevenir los riesgos laborales de toxicidad, incendios y explosiones que las nanopartículas puedan producir.

CAPÍTULO I

EL SIGNIFICADO DE NANO

Introducción

La mayoría de personas están familiarizadas con términos como micro, mili, kilo, mega, giga, entre otras, a las que se denominan múltiplos y submúltiplos. Estos, están acompañados de una unidad, sea de longitud, masa o tiempo, entre las más utilizadas.

El nano es un submúltiplo, es decir, hace referencia a algo más pequeño que la unidad. Pero, ¿qué tan pequeño significa esta palabra? ¿Cuál es la cantidad asociada y por qué razón se ha tomado de manera apropiada para medir estructuras formadas por unos cuantos átomos? Se puede decir que el término nano se encuentra en todas las definiciones que merecen ser analizadas en capítulos posteriores, como nanotecnología, nanopartícula, nanomaterial, nanotubos, etc. Por esto, se considera importante comprender el significado matemático del submúltiplo nano.

El sufijo nano

Prefijos y sufijos

Las personas están familiarizadas con términos científicos como kilo, por ejemplo, por el término kilómetro. Si separan las palabras tendremos kilo – metro, donde el prefijo es kilo y la unidad es metro. Este kilo representa un múltiplo que equivale a mil, es decir, la unidad se ha multiplicado por mil. En lugar de decir mil metros, se dice de manera científica que se tiene una distancia de un kilómetro.

Otro múltiplo que comúnmente se utiliza en el vocabulario común es la palabra mega. En este caso, la unidad se ha multiplicado por un millón. Este prefijo se ha hecho muy común a la hora de seleccionar la capacidad de almacenamiento de una memoria de computadora. Por decir, 128 mega bytes, en este caso, se indica que esta memoria del computador almacena 128 millones de bytes.

En cambio, para indicar cosas más pequeñas que la unidad, se utilizan los sufijos que dividen. Por ejemplo, milímetro, si se separa estas dos palabras tenemos: mili – metro. El sufijo mili divide a la unidad en mil partes, en vez de decir 0,001 metros se dice un milímetro. En este sentido, se toma como referencia las medidas de longitud cuya unidad es el metro. En la siguiente tabla, se puede ver cómo están distribuidos los prefijos y sufijos más utilizados, incluyendo al sufijo nano.

Tabla 1

Prefijos y sufijos.

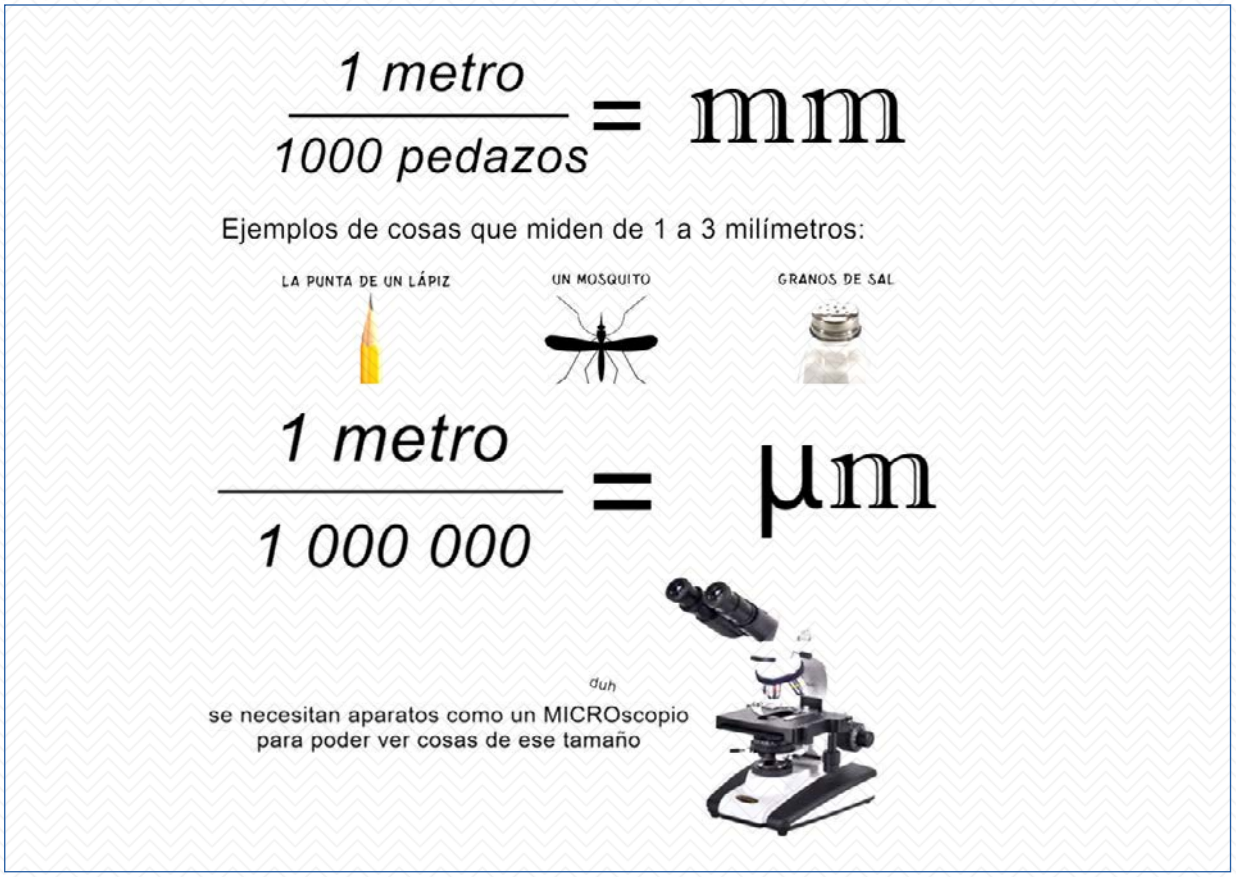
Nombre	Símbolo	Notación científica	Notación convencional	Significado
Giga	G	$1x10^{9}$	1000.000.000	Mil millones
Mega	M	$1x10^{6}$	1000.000	Millón
Kilo	K	$1x10^{3}$	1000	Mil
		Unidad		
Mili	M	$1x10^{-3}$	0.001	Milésima
Micro	μ	$1x10^{-6}$	0.000001	Millonésima
Nano	N	$1x10^{-9}$	0.000000001	Mil millonésima

Fuente: autoría propia.

Para poder comprender de mejor manera los sufijos de la Tabla 1, se toma una regla de un metro y a esta le dividimos en 1000 partes, obteniendo el milímetro que es todavía visible para el ojo humano. Ahora, si se puede hacerlo, se toma el milímetro y se lo vuelve a dividir en 1000 partes y de esta manera obtenemos el micrómetro. Este, ya no es visible para el ojo, por lo que se recurre a los microscopios. Finalmente, si al micro se le divide en otras mil partes, se obtiene el nanómetro (Figura 1).

Figura 1

Comparativas de los sufijos.



Fuente: imagen tomada del video de La Nanósfera (2021). https://bit.ly/40vGbF1

Es decir, para obtener un nanómetro, el metro se ha dividido para mil millones de partes (1000.000.000). En este sentido, se concluye que la nanotecnología significa manipular las cosas a un nivel nanométrico.

Conversiones

Para pasar de una cantidad inferior a otra inmediatamente superior se dividirá por 1.000 cada vez la unidad inferior. Para pasar de una cantidad superior a una inmediatamente inferior se multiplicará por mil la cantidad superior. Ejemplos.

- Pasar 10 µm a nm.

La micra es mayor a nano y su diferencia es de 1000; por tanto, 10 µm x 1000 = 10.000 nm.

- Pasar 0.75 mm a nm.

El mm es mayor a nm y su diferencia es 1000000; por tanto, 0,75 mm x 1000.000 = 750.000 nm.

Ejercicios

1. Por medio de una P marque los prefijos y S los sufijos.

Micrómetro _____
Kilómetro _____
Milímetro _____
Nanómetro _____

2. Coloque enfrente de cada prefijo y sufijo su equivalencia numérica.

Kilo _____
Nano _____
Mili _____
Mega _____

3. Convierta:

0.025 µm a nm
0.5 m a mm
34 nm a mm
700 nm a µm

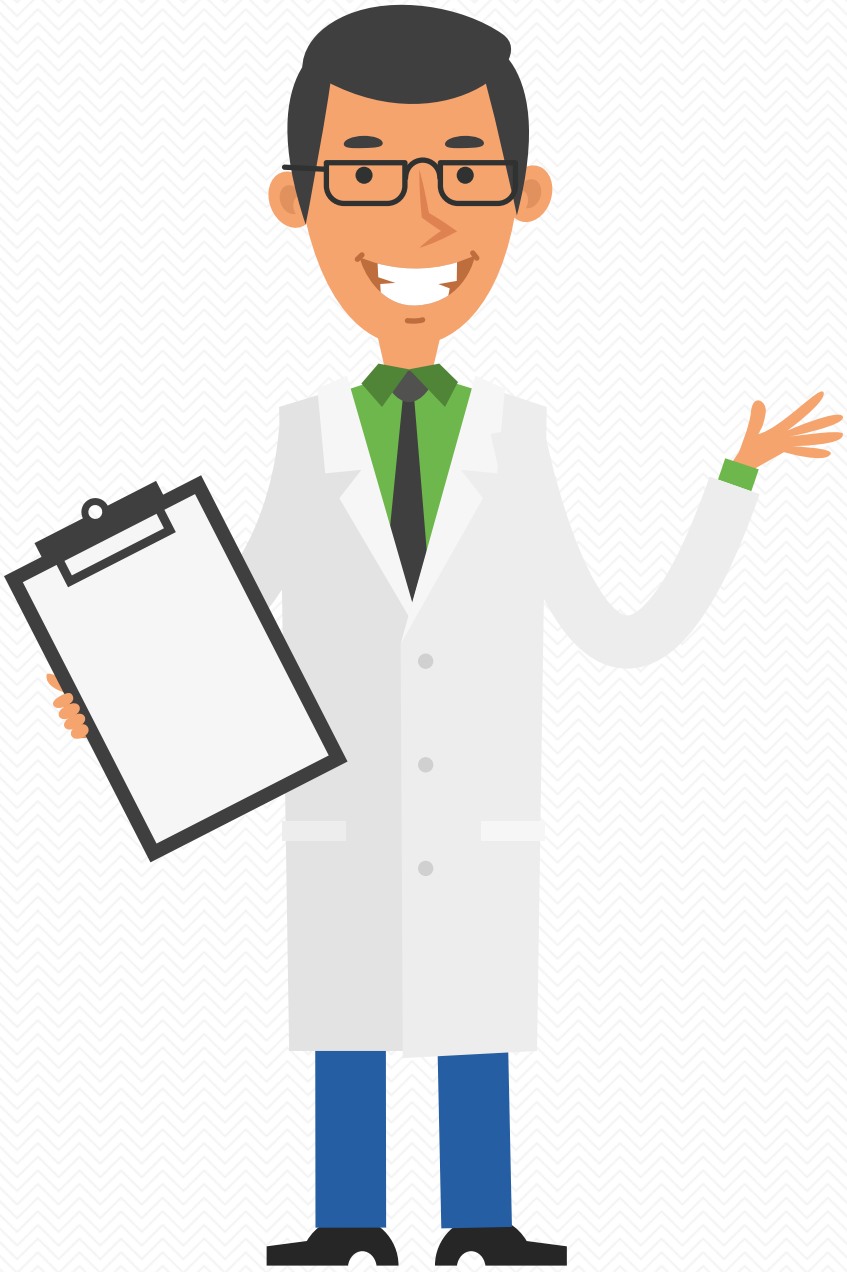
CAPÍTULO II

NANOMATERIALES

Introducción

Es importante comprender algunas definiciones que se utilizan en el ámbito de la nanotecnología. Todo este contexto comienza el 20 de septiembre de 1959, cuando el físico Richard Feynman premio Nobel de física en 1965, impartió su famosa conferencia "queda mucho sitio al fondo", en la que consideraba poder manipular átomos individuales.

De esta manera se abrió una ventana a una nueva dimensión con una visión en esos años casi profética, pero, que hoy en día, gracias a los avances científicos, se ha convertido en una realidad dando lugar a todo un nuevo mundo de nuevos materiales. Estos, se han manipulado en procesos de fabricación a escala manométrica: "cuando se manipula la materia a una escala tan minúscula de átomos y moléculas, demuestra fenómenos y propiedades totalmente nuevas" (Díaz, 2012, p. 3).



Nanotecnología

Definición

La nanotecnología es el estudio, diseño, creación, síntesis, manipulación y aplicación de materiales, aparatos y sistemas funcionales a través del control de la materia a nano escala y la explotación de fenómenos y propiedades de dicha materia a nano escala (Díaz, 2012, p. 3).
Los tamaños que se manejan son a nivel de 1 nm a 100 nm.

Al manipular la materia a nivel de átomos y moléculas, los materiales, que comúnmente se conocen, demuestran características y propiedades totalmente nuevas. Por ejemplo, en la construcción actualmente se está empleando esta ciencia en la elaboración de bloques, al ser enriquecidos con nanopartículas que previenen la humedad (Figura 2).

Figura 2

Bloques con nanopartículas y bloques con materiales normales.

Nota. La imagen que muestra como un bloque no permite el paso de la humedad al recubrirlo con nanomateriales. *Fuente:* autoría propia.

En este contexto, existen empresas comerciales que están promocionando el recubrimiento de la pintura con nanopartículas, quedando un acabado de pintura automotriz totalmente diferente, como se observa en la Figura 3.

Figura 3

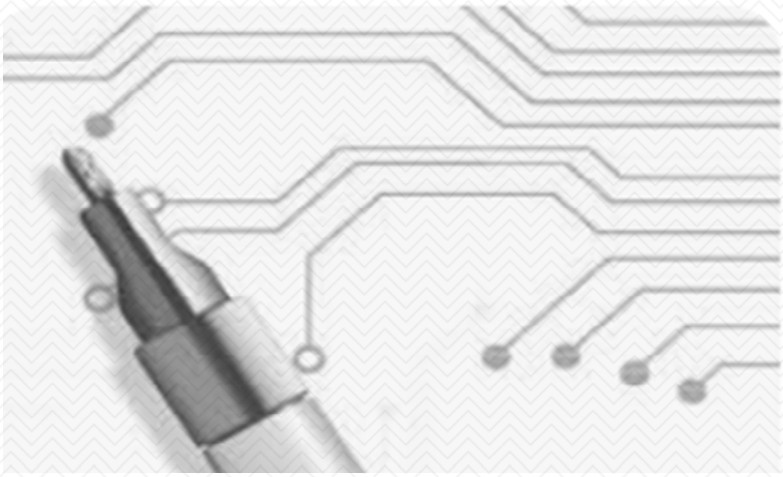
Acabado de pintura automotriz con nanopartículas.

Fuente: autoría propia.

En electrónica, las tintas conductivas que contiene nanopartículas facilitan la elaboración de circuitos impresos (Figura 4).

Figura 4

Circuito impreso elaborado con tinta conductiva con nanopartículas.



Fuente: tomado de Nanocintech (2024). https://bit.ly/40uvsL2

La utilización de productos que contienen nanomateriales está introducida en casi todos los sectores industriales. "Entre las aplicaciones más destacadas se encuentran productos de la industria de la alimentación, la energía, la construcción, la medicina, la ingeniería de materiales y la aeroespacial" (Instituto Nacional de Seguridad e Higiene del Trabajo , 2015, p. 5).

Tipos de nanotecnología

Descendente (top-down). Los mecanismos se utilizan para miniaturizar las estructuras a un tamaño de 1 a 100 nanómetros (López, 2022).

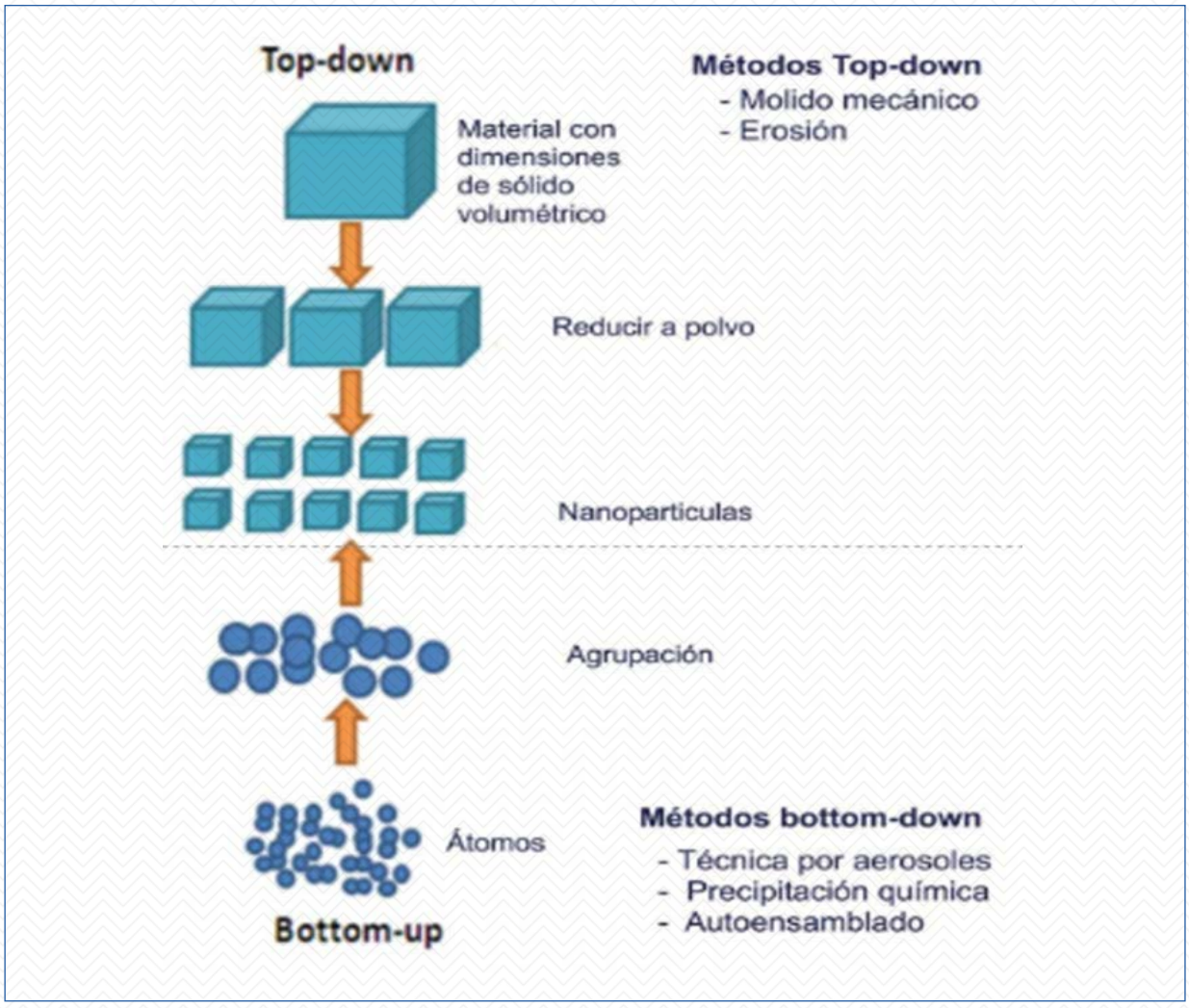
Ascendente (bottom-up). Se comienza con una estructura nanométrica como una molécula. Por ejemplo, mediante un proceso de montaje o auto ensamblado se crea un mecanismo mayor que el inicial (López, 2022).

Seca. Es la utilizada en la fabricación de estructuras en materiales como el carbón o diferentes metales que no interactúan con la humedad (López, 2022).

Húmeda. Al contario que la seca, este tipo de nanotecnología es la que utiliza elementos que funcionan en un entorno acuoso. Por ejemplo, el material genético y sus membranas (López, 2022).

Figura 5

Tipos de nanotecnología.



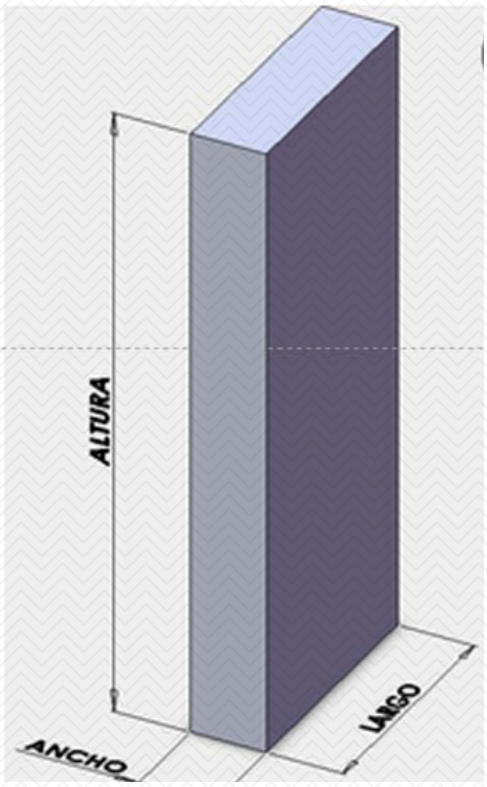
Fuente: tomado de Interempresas (2024). https://img.interempresas.net/fotos/1999671.jpeg

Nanomateriales

Los nanomateriales son todos aquellos nano objetos aislados con tamaño típico entre 1nm y 100 nm en algunas de sus tres dimensiones.

Figura 6

Nanomaterial.

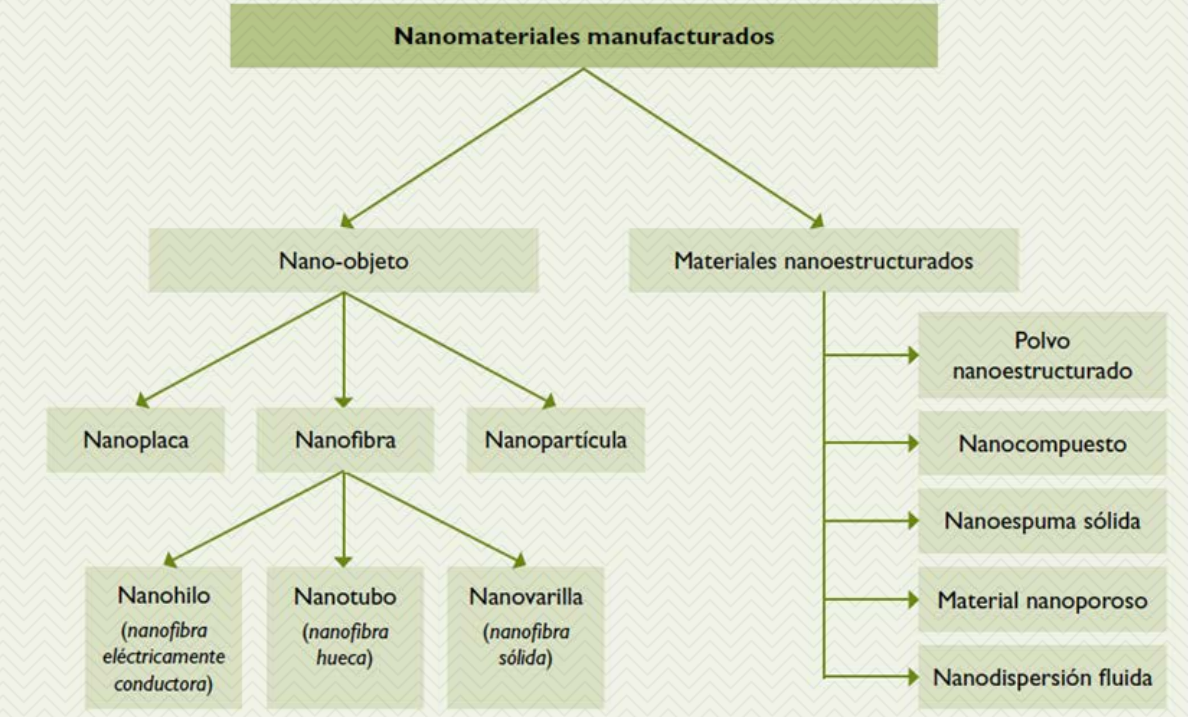


Fuente: autoría propia.

Los nanomateriales se pueden presentar de forma natural, por ejemplo, las cenizas generadas por un volcán. Además, como subproducto no intencionado de un proceso industrial, como el humo de soldadura o los productos de combustión, denominándose en estos casos nanomateriales incidentales o accidentales y tra¬dicionalmente conocidos como partículas ultrafinas. "El término nanomaterial también incluye los nanomate¬riales manufacturados, diseñados intencionadamente con unas propiedades específicas (mecánicas, eléctricas, ópticas, catalíticas, etc.) muy diferentes y en muchos casos, a las que presenta el mismo material a tamaño no nano" (Instituto Nacional de Seguridad e Higiene del Trabajo , 2015, p. 7). Los nanomateriales se pueden clasificar por su manufactura como se muestra en la Figura 7.

Figura 7

Clasificación de nanomateriales.

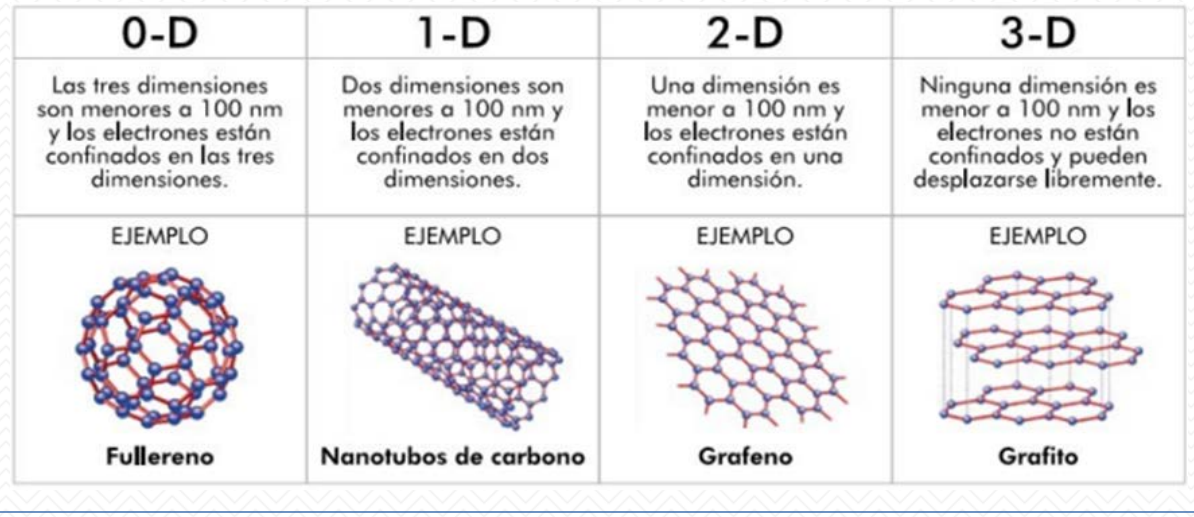


Fuente: autoría propia.

De acuerdo a la Organización Internacional de Normalización (ISO), los nanomateriales son clasificados en función de sus dimensiones, 0-D, 1-D y 2-D, según nomenclatura ISO (Figura 8).

Figura 8

Clasificación de nanomateriales.

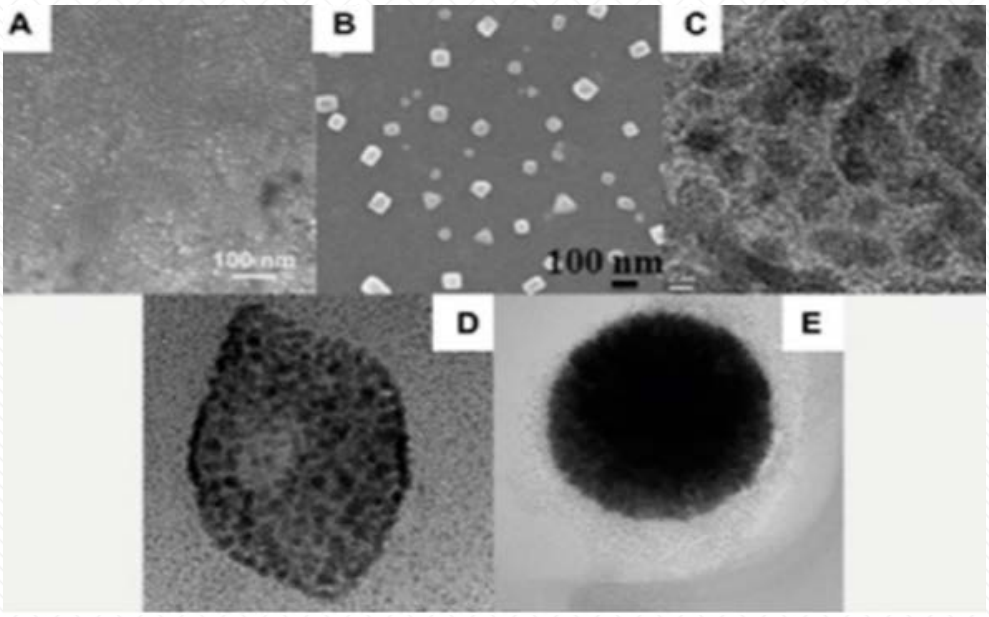


Fuente: tomado de Yan et. al. (2016).

Los nanomateriales 0-D (Figura 9) tienen formas esféricas. Los electrones están confinados en las tres dimensiones. Como ejemplo, característicos están los fulleranos, partículas coloidales, puntos cuánticos, nanoclusters, ADN's, virus, proteínas, nanopartículas de cobre y oro (Cornejo, 2015).

Figura 9

Nanomateriales 0-D.

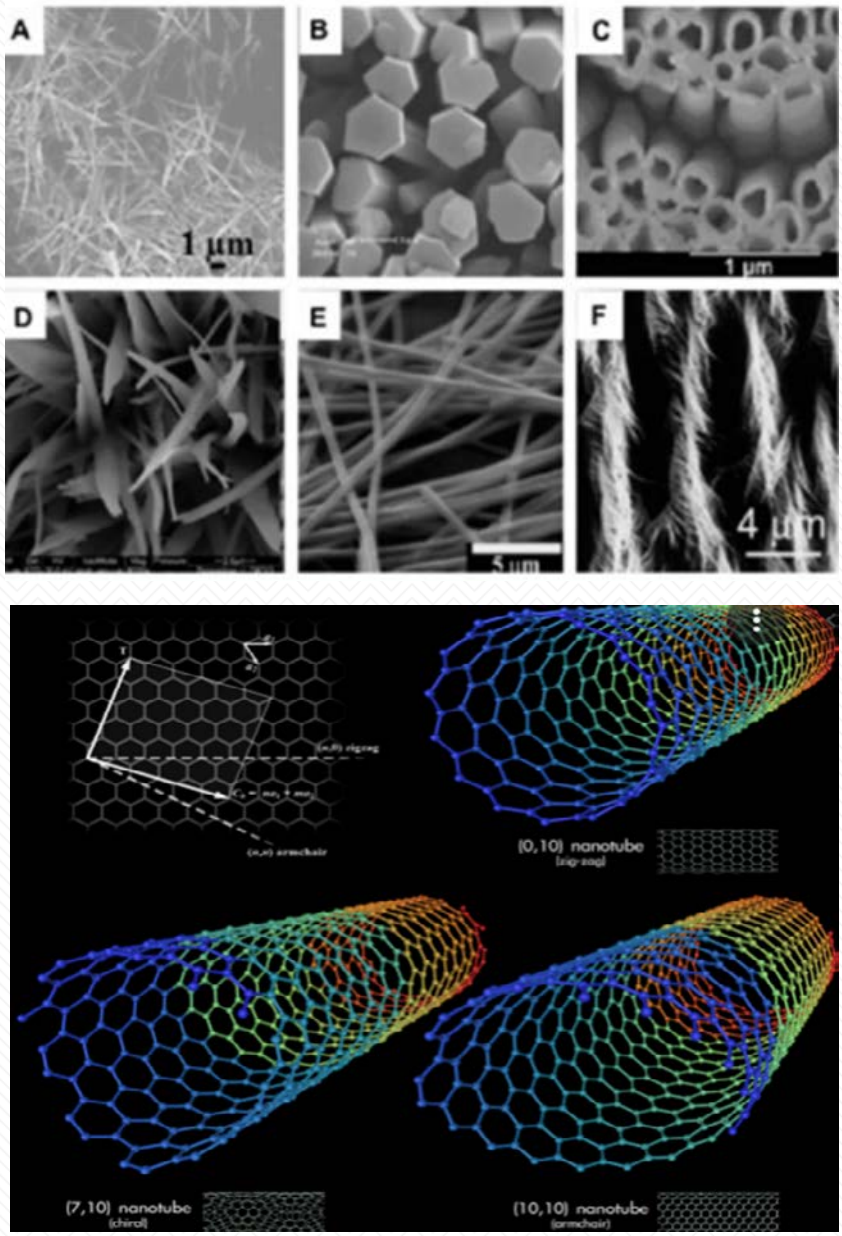


Fuente: Paraguay-Delgado (2020).

Los nanomateriales tipo 1-D (Figura 10), son aquellos donde dos de sus dimensiones son menores a los 100 nm y los electrones que están confinados en dos dimensiones. Dentro de este grupo están los nanocables (a), nanotubos (b), nanofibras (c), nanovariallas (d), fibras poliméricas (e) y nanocampanas (f) (Cornejo, 2015).

Figura 10

Nanomateriales 1-D.

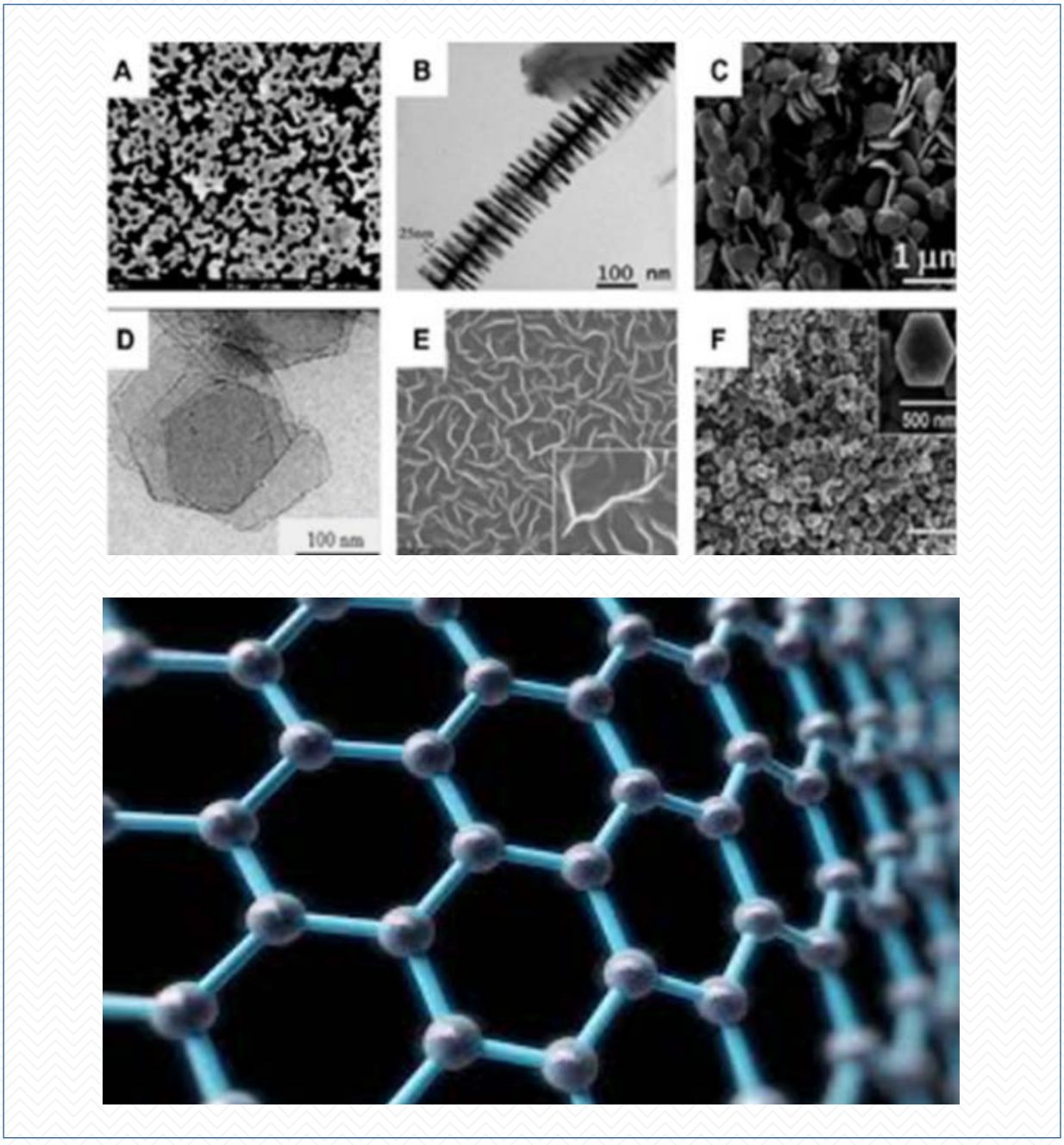


Fuente: Paraguay-Delgado (2020).

Los nanomateriales tipo 2-D (Figura 11), son aquellos donde una de sus dimensiones es menor a los 100 nm y los electrones están confinados en una dirección. Contienen geometrías bien definidas que presentan características dependientes de la forma y como consecuencia son usadas en bloques de construcción, para la formación de nanodispositivos como materiales nanoestruturados, policristales, nanobolas, nanobobinas, nanoflores (Cornejo, 2015).

Figura 11

Nanomateriales 2-D.



Fuente: Paraguay-Delgado (2020).

Desde el punto de vista del tamaño del nanomaterial, este se puede clasificar acorde a la Tabla 2.

Tabla 2

Clasificación de nanopartículas por su tamaño.

Nanomaterial	Tamaño (nm)		Nanomaterial	Tamaño (nm)
Punto cuántico Nanocristales	1-50 < 1.5-10	<10-50	Silicio Aluminio	0.111 0.118
Fulleranos C_{60} Partículas coloidales	0.88-1.10 1.0-100		Carbono Nanopolvo de grafeno	0.067
Nanotubos de carbono	1.0-10	100-1000	Oro	
Cd's Negro de humo	0.7-10 15-80-280		Plata Dendrímero	
Grafeno	Espesor lámina 0.1		Óxidos Metálicos Al_2O_3, TiO_2, ZnO, ZrO_2, Fe_2O_3	

Fuente: autoría propia.

Aplicaciones de los nanomateriales

Las aplicaciones de la nanotecnología son diversas. Se estima que ya se cuenta con más de 11.172 productos reconocidos según Nanotechnology Products Database y son múltiples los que se están creando alrededor del mundo, debido a su versatilidad en las áreas industriales que se aplican.

Un ejemplo claro, es en la electrónica (Tabla 3). Los nanomateriales se utilizan para la elaboración de circuitos integrados, memorias, diodos emisores de luz, sensores, celdas solares, super capacitores, etc.

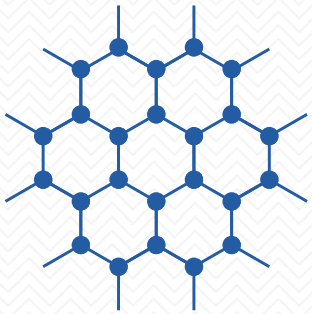
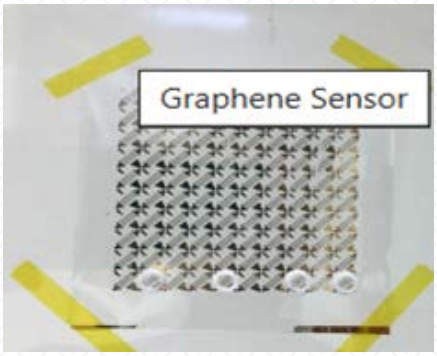


Tabla 3

Aplicaciones de los nanomateriales en la electrónica.

Figura	Nombre	Descripción
	Quantum dots (QD's).	Son pequeñas nanopartículas semiconductoras que pueden transformar la luz ultravioleta o azul en otros colores puros. Al controlar su tamaño, se puede sintonizar el color emitido por los QD.
	Sensor de grafeno.	Permite la adquisición y transmisión de datos a grandes velocidades.
	Transistor de nanotubos de carbón.	En un futuro próximo, los transistores de nanotubos de carbono están preparados para superar a los transistores basados en silicio, debido a sus propiedades eléctricas y térmicas ideales. Los transistores de nanotubos de carbono serán más pequeños, funcionarán a una frecuencia mucho más alta, consumirán menos energía e incluso podrán convertirse en factores de forma libre.

Fuente: autoría propia.

En este mismo contexto, se evidencia una tendencia creciente al uso de la nanotecnología en el sector industrial de la cosmética. Los principales fabricantes a nivel mundial están utilizando nanomateriales en muchos de sus productos de cuidado de cabello, protección de la piel, bienestar sexual y productos de belleza en general (Tabla 4).

Tabla 4

Aplicaciones de los Nanomateriales en la industria de la cosmética.

Figura	Nombre	Descripción
	Vegan Shampoo - Nano Hair Growth, 250ml.	Shampoo Vegano. Ultraconcentrado con factores de crecimiento y tecnología avanzada de nanopartículas de acción fortificante. Sus activos actúan directamente sobre el bulbo piloso, aumentando el flujo vascular del cuero cabelludo debido a sus propiedades antioxidantes.
	Nanocare gel de higiene íntima.	Gel súper suave diseñado específicamente para la higiene diaria de la zona genital femenina. Con nanopartículas que limpian refrescan y desodoriza sin alterar el equilibrio fisiológico natural.

Fuente: autoría propia.

La industria alimentaria, el sector manufacturero más grande del mundo entre todas las divisiones industriales, utiliza moléculas como material de partida, modificándolas y creando interacciones para obtener las propiedades deseadas. En este sentido, la nanotecnología está preparada para crear mejores comidas, desde cómo se cultivan hasta cómo se empaquetan.

Tabla 5

Aplicaciones de los nanomateriales en la industria alimenticia.

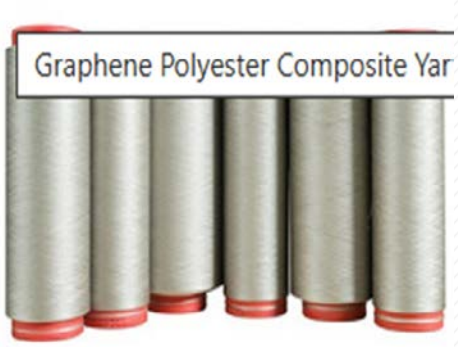
Gráfico	Nombre	Descripción
	Food sensor.	Cada paquete de cuatro piezas tiene un punto sensor que cambia de color y muestra exactamente qué tan madura está la fruta. Este sensor está hecho con base en nanomateriales.
	Nano omega.	Las dietas ricas en omega-3, se han relacionado con la salud del corazón, el cerebro, los nervios y la visión. Se incorpora semillas de lino orgánicas MeadowPure, vitaminas B6, B12, E y D3, ácido fólico y *SuperSorb*® en NanOmega3.

Fuente: autoría propia.

En el campo textil, se buscan nuevos enfoques para utilizar la nanotecnología con el fin de aumentar la calidad de sus productos en fibras, telas deportivas, zapatos y bolsos.

Tabla 6

Aplicaciones de los nanomateriales en la industria textil.

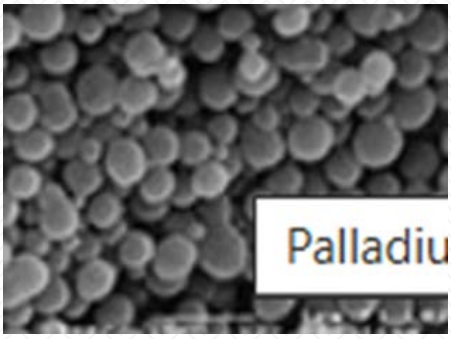
Gráfico	Nombre	Descripción
	Norda 001 G+® Spike - W.	La primera zapatilla de trail running sin costuras del mundo, fabricada con dyneema y grafeno, los materiales más ligeros y resistentes del mundo.
	Hilo compuesto de poliéster y grafeno.	La fibra compuesta de poliéster y grafeno combina óxido de grafeno de una sola capa. Esta nueva fibra compuesta tiene muchas funciones, como emisión de infrarrojo lejano, antibacteriana y antiácaros, anti ultravioleta, emisión de iones negativos, etc.

Fuente: portadas manuales ACGICH e INSST (2015).

Hoy en día, está muy claro que la generación de energía a través de nuevos enfoques es de vital importancia para la vida del ser humano, debido al agotamiento ampliamente proyectado de las reservas de combustibles fósiles y al rápido aumento de los gases de efecto invernadero.

Tabla 7

Aplicaciones de los nanomateriales en generación de energía.

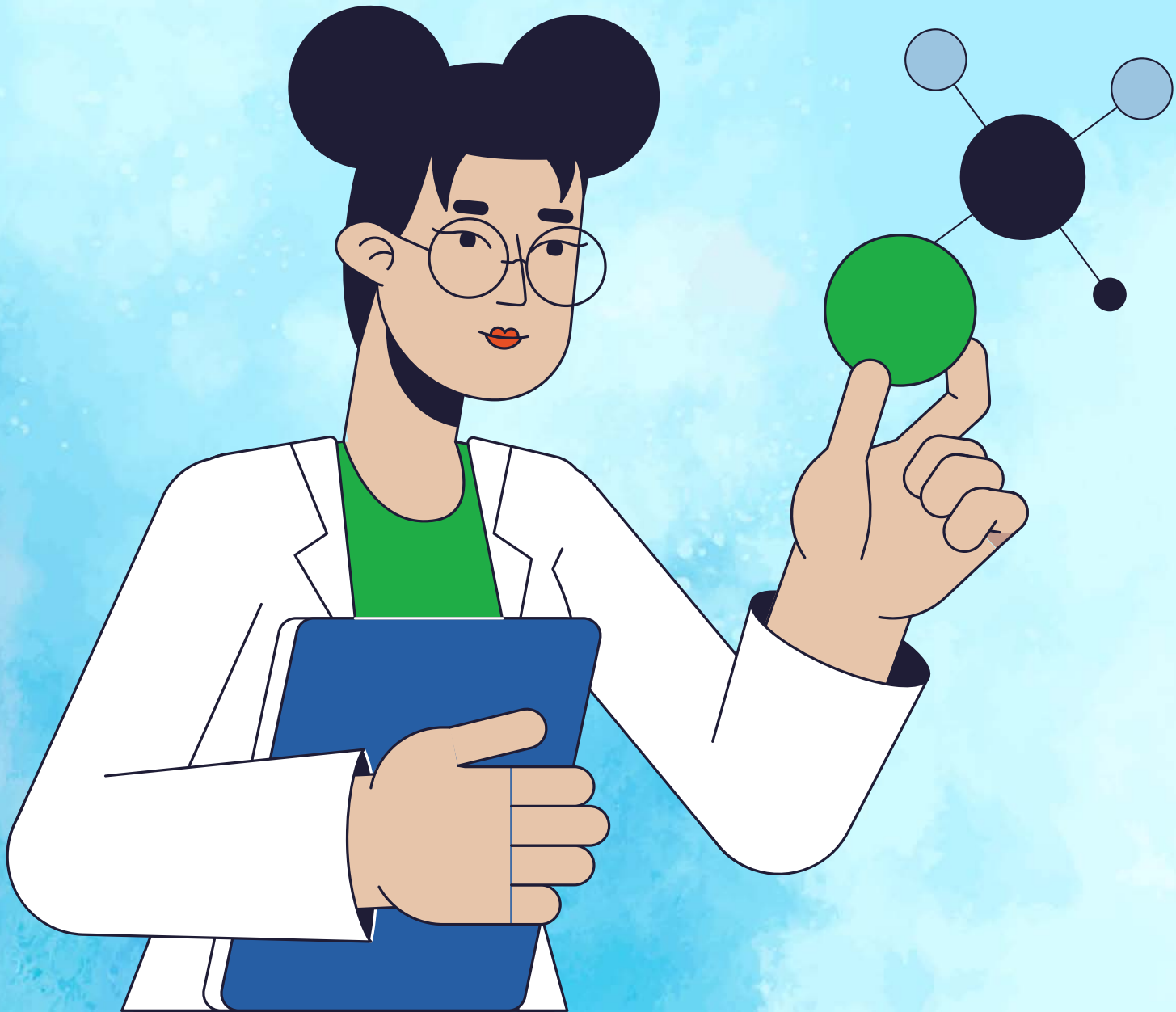
Gráfico	Nombre	Descripción
	Nanopartículas de paladio.	Las nanopartículas, nanopuntos o nanopolvos de paladio (Pd) son partículas metálicas esféricas de color negro y de gran superficie. Las partículas de paladio a nanoescala suelen tener un tamaño de 20 a 100 nanómetros (nm) y un área de superficie específica (SSA) en el rango de 1 a 3 m2/g.
	Celdas solares policristalinas.	Las células solares multicristalinas tienen una superficie azul. Su estructura cristalina está sólo parcialmente ordenada, lo que les da menos voltaje, lo que significa un factor de eficiencia algo menor. Las células policristalinas son más fáciles de fabricar, más baratas de producir y son la tecnología más utilizada en el sector fotovoltaico.

Fuente: portadas manuales ACGICH e INSST (2015).

Otras industrias en las que se utilizan los nanomateriales son: construcción, automotriz, cuidado del medio ambiente, productos del hogar, agricultura, impresiones.

CAPÍTULO III

LOS RIESGOS POR LA PRESENCIA DE NANOMATERIALES



Introducción

La exposición laboral a nanomateriales puede darse en cada una de las etapas del ciclo de vida del nanomaterial (fabricación, incorporación al producto intermedio o final, utilización profesional de estos productos y eliminación de los residuos que los contienen), como en las tareas de mantenimiento y limpieza.

La Norma Técnica de Prevención (NTP) 797 de los riesgos asociados a la nanotecnología del Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo indica que las acciones preventivas deben abordar dos aspectos: prevención de incendios y explosiones que se deriva de su condición de partículas materiales en el ambiente de trabajo y la vinculada a su posible toxicidad.

Actualmente se desconocen los efectos para la salud y la toxicidad de muchos de los nanomateriales producidos en fábricas y laboratorios, pues la toxicología de los nanomateriales no sigue los razonamientos generales de los materiales tóxicos de mayor tamaño y no se pueden aplicar, por carecer de evidencia científica para ello, los principios conocidos de la toxicología clásica. (Serena Domingo & Bermejo Bermejo, 2017, p. 71)

Sin embargo, algunos de los conceptos que se utilizan en la evaluación de riesgos químicos, son necesarios para aplicar las evaluaciones cuantitativas y cualitativas de riesgos producidos por nanomateriales.

Entornos laborales expuestos a nanomateriales

Fabricación del nanomaterial

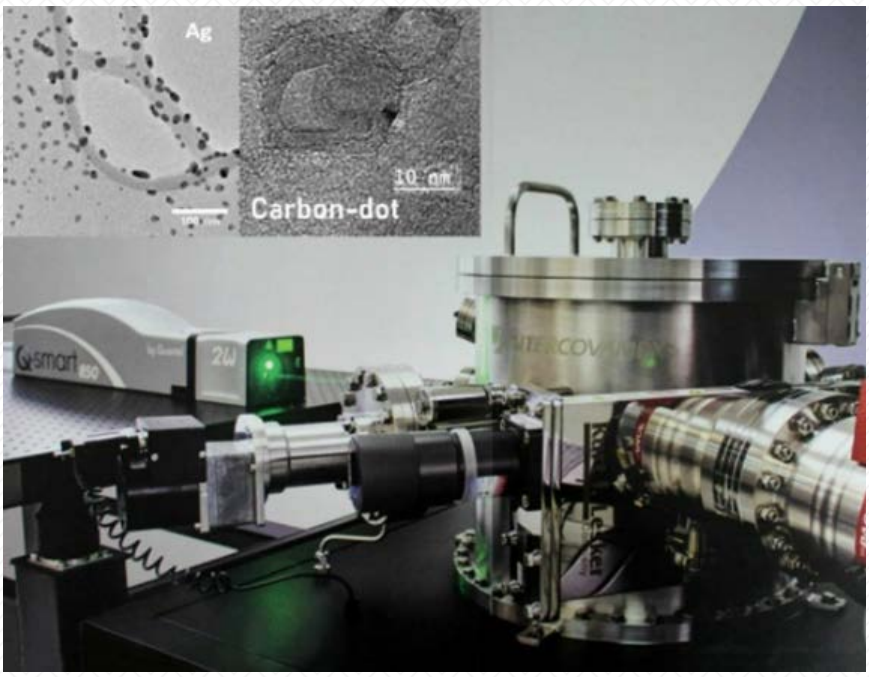
La producción de nanomateriales se puede realizar mediante procesos de molienda del material a granel (métodos *top-down*) o de síntesis a partir de la nucleación con el subsiguiente crecimiento de las partículas mediante condensación y/o coagulación (métodos *bottom-up*). Estos últimos métodos son los más comunes en la fabricación de nanomateriales y se pueden llevar a cabo en fase gaseosa o en fase líquida o coloidal (Instituto Nacional de Seguridad e Higiene del Trabajo, 2015).

Estos procesos involucran actividades de recuperación de materiales, mantenimiento y limpieza de equipos, recogida de derrames, purificación, recubrimiento y envasado de productos. En estas actividades, el trabajador se encuentra en contacto directo con las nanopartículas. Ya sea que el proceso se realice en fase sólida, líquida o gaseosa, se tiende a que las nanopartículas queden suspendidas en el aire produciendo riesgo de toxicidad en personas que no estén en las actividades laborales.

Otras industrias en las que se utilizan los nanomateriales son: construcción, automotriz, cuidado del medio ambiente, productos del hogar, agricultura, impresiones.

Figura 12

Equipo para la fabricación de nanomateriales.



Fuente: tomado de PUC-Rio. (2024). https://bit.ly/4hwPc7A

Incorporación del nanomaterial al producto intermedio o final

La gran variedad de productos que contienen nanomateriales puede ser una indicación del elevado número de sectores industriales implicados y de las diferentes exposiciones a nanomateriales que se podrán dar durante la fabricación de dichos productos. Las bases de datos como, por ejemplo, la del American Woodrow Wilson11 o la del Instituto Nacional para la Salud Pública y Medioambiental holandés (RIVM)12 permiten co¬nocer diferentes productos de consumo que contienen nanomateriales. (Instituto Nacional de Seguridad e Higiene del Trabajo, 2015)

En estos procesos, se puede indicar que existe actividad laboral como manipulación del nanomaterial, carga de ingredientes en recipientes de mezcla, molienda, tamizado, entre otras.

Figura 13

Mezcla de nanomateriales con otros productos.

Fuente: tomado de Gestiopolis (2024). https://bit.ly/3Co17Wu

Utilización profesional de productos que contienen nanomateriales

A nivel industrial, se han desarrollado numerosas aplicaciones que incluyen el uso de nanomateriales. A continuación, se indican algunos ejemplos de diversos sectores de actividad en los que se ha generalizado el uso de nanomateriales: construcción (en productos que mejoran la resistencia al desgaste y aumentan la rigidez de los materiales), medicina (como transportadores de fármacos para su liberación en el órgano dia¬na), energía (células fotovoltaicas), automóvil y aeroespacial (agentes reforzantes en neumáticos y productos de caucho), química (inhibidores de la corrosión), electrónica y comunicación (componentes ópticos y op¬toelectrónicos incluyendo láseres y ordenadores compactos ultra-rápidos),

cosmética (cremas solares), textil (protección contra el fuego y ropa anti-olor). (Instituto Nacional de Seguridad e Higiene del Trabajo, 2015)

En el capítulo anterior, se dio algunos ejemplos de productos que en la actualidad contienen nanomateriales. Como se ha manifestado, las industrias aplican la nanotecnología con el fin de mejorar sus productos y mejorar su calidad. La Tabla 7 muestra las propiedades y aplicaciones de algunos de estos.

Tabla 8

Tabla resumen de propiedades y aplicaciones de los nanomateriales.

Nanomaterial	Algunas aplicaciones
Dióxido de titanio (TiO_2)	Cremas solares, revestimientos para plásticos y metales y productos autolimpiables por sus propiedades fotocatalíticas, antimicrobianas y de protección frente a rayos UV.
Sílice (SiO_2)	La sílice coloidal se utiliza para mejorar la resistencia al rayado y a la abrasión en revestimientos, pinturas, tintas y adhesivos. La sílice precipitada se utiliza para mejorar la tracción y reducir el desgaste en reforzamiento de neumáticos, calzado, artículos de goma y recubrimientos de cables. La sílice pirogénica se utiliza para mejorar la elasticidad y durabilidad en plásticos, cementos, gomas de silicona.
Óxido de cinc (ZnO)	Productos de autolimpieza, cosméticos, barnices, cerámicas por sus propiedades antimicrobianas y de protección frente a rayos UV, y en productos de caucho para mejorar la resistencia a la abrasión.
Óxido de aluminio ($A1_2,01_3$)	En revestimientos de herramientas de corte y molienda, gafas de seguridad y exteriores de automóviles para mejorar la resistencia a los arañazos y a la abrasión. También se utiliza como retardante de llama en recubrimientos de bombillas y tubos fluorescentes.
Óxido de hierro (Fe_2O_3)	Como pigmento en automoción y cosméticos para mejorar la tonalidad de los colores sin afectar la protección frente a los rayos UV; como vehículo de medicamentos y agentes de diagnóstico.
Óxido de cerio (CeO_2)	En superficies de cristal como material de pulido; en pintura de exteriores y en placas metálicas como material anticorrosivo; en el combustible diésel como aditivo catalítico para reducir las emisiones tóxicas y aumentar la eficacia del combustible.
Oro	Diagnóstico in vitro, sondas de diagnóstico, sensores y revestimientos de superficie.

Plata	Apósitos para heridas; textiles para hospitales, ropa deportiva anti olor, juguetes, electrodomésticos, cosméticos, etc. por sus propiedades antimicrobianas.
Hierro	Para la descontaminación de agua y suelos.
Fullerenos	Aditivos para polímeros para aumentar su resistencia (raquetas de tenis y pelotas de golf).
Grafeno	Materiales específicos para aviones (prevención de la adhesión del hielo, resistencia a la radiación) y automóviles (prevención de la acumulación de electricidad estática en los conductos de combustible).
Nanotubos de carbono	Materiales plásticos para dotarlos de conductividad eléctrica, aditivos poliméricos, pinturas y recubrimientos.
Negro de humo	Como agente reforzante en productos de caucho para aumentar la resistencia mecánica al desgaste, como pigmento en tóner y tintas de impresora, y como cargas antiestáticas para los envases de plástico.
Nanoarcillas	En tratamientos de aguas residuales.

Fuente: autoría propia.

Los riesgos por la presencia de nanopartículas

La Norma Técnica de Prevención (NTP) 797, sobre los riesgos asociados a la nanotecnología, publicada en el año 2008, por el Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, indica que los riesgos son:

- Riesgos de seguridad (incendios y explosiones).
- Riesgos para la salud (toxicidad).

Riesgos de seguridad (incendios y explosiones). A pesar que existe muy poca información respecto de los peligros para la seguridad que pueden entrañar los nanomateriales, la bibliografía consultada coincide en afirmar que los riesgos que más preocupación suscitan son los de incendio y de explosión. En ellos, influye el tamaño de las partículas que posibilita su permanencia en el aire durante más tiempo y su mayor área superficial específica.

> Para los riesgos de incendio y explosión, la recomendación sería tomar como punto de partida la información disponible para tamaños de partícula superiores a la nanométrica, especialmente, la que más se aproxime a esta fracción de tamaño. Así, debería considerarse que los riesgos de incendio y explosión de las formas nano son, como mínimo, las asociadas a las partículas de mayor tamaño del mismo material. (Instituto Nacional de Seguridad e Higiene del Trabajo, 2015)

Por tanto, en ausencia de información específica determinante, a la hora de evaluar los riesgos laborales es prudente asumir que las nubes de polvo de nanomateriales pueden presentar peligro de incendio y explosión.

Riesgos para la salud (toxicidad). "Los nanomateriales manufacturados presentan unas propiedades específicas que hacen que sean de gran interés para la industria. Sin embargo, aún no se conocen con certeza los efectos que pueden tener para la salud de los seres vivos" (Serena Domingo & Bermejo Bermejo, 2017).

El tamaño extremadamente pequeño de los nanomateriales los hace más reactivos químicamente, lo que puede generar un mayor nivel de toxicidad, comparado con partículas más grandes del mismo material. A menudo, los nanomateriales pueden inducir la producción de especies reactivas de oxígeno (ROS), lo que resulta en estrés oxidativo. Este proceso puede dañar las células, proteínas y el ADN, lo que puede desencadenar efectos adversos como inflamación, daño tisular y, en casos extremos, cáncer.

Un ejemplo notable son los nanomateriales de dióxido de titanio, comúnmente utilizados en protectores solares y otros productos cosméticos. Aunque se considera que no presentan riesgo significativo a nivel cutáneo, algunos estudios sugieren que, al ser inhaladas en forma de aerosol, podrían causar daños pulmonares. Otro caso es el de las nanopartículas de plata, que se usan como antimicrobianos en una amplia gama de productos. Si bien son eficaces para eliminar bacterias, algunos estudios han señalado que pueden tener efectos adversos sobre las células humanas, incluso a niveles bajos de exposición.

Una de las principales preocupaciones con respecto a las nanopartículas es su posible acumulación en los tejidos y órganos, lo que podría derivar en toxicidad crónica. A diferencia de las partículas más grandes, las nanopartículas pueden no ser fácilmente eliminadas por los mecanismos naturales del cuerpo, como el sistema linfático o los macrófagos. Esto podría llevar a una acumulación progresiva y potencialmente a efectos adversos a largo plazo.

Estudios en animales han mostrado que algunas nanopartículas pueden acumularse en el hígado, riñones y cerebro, lo que ha generado preocupación por la seguridad a largo plazo de estos materiales en aplicaciones médicas. Los estudios clínicos todavía son limitados, pero la evidencia sugiere que se necesita más investigación para entender completamente las implicaciones de la acumulación de nanopartículas en el organismo.

Los efectos toxicológicos de los nanomateriales en el organismo dependen principalmente de los siguientes factores:

- Factores relacionados con la exposición: vías de entrada en el organismo, duración y frecuencia de la exposición y concentración ambiental.

- Factores relacionados con el trabajador expuesto: susceptibilidad individual, actividad física en el lugar de trabajo, lugar de depósito y ruta que siguen los nanomateriales una vez que penetran en el organismo.

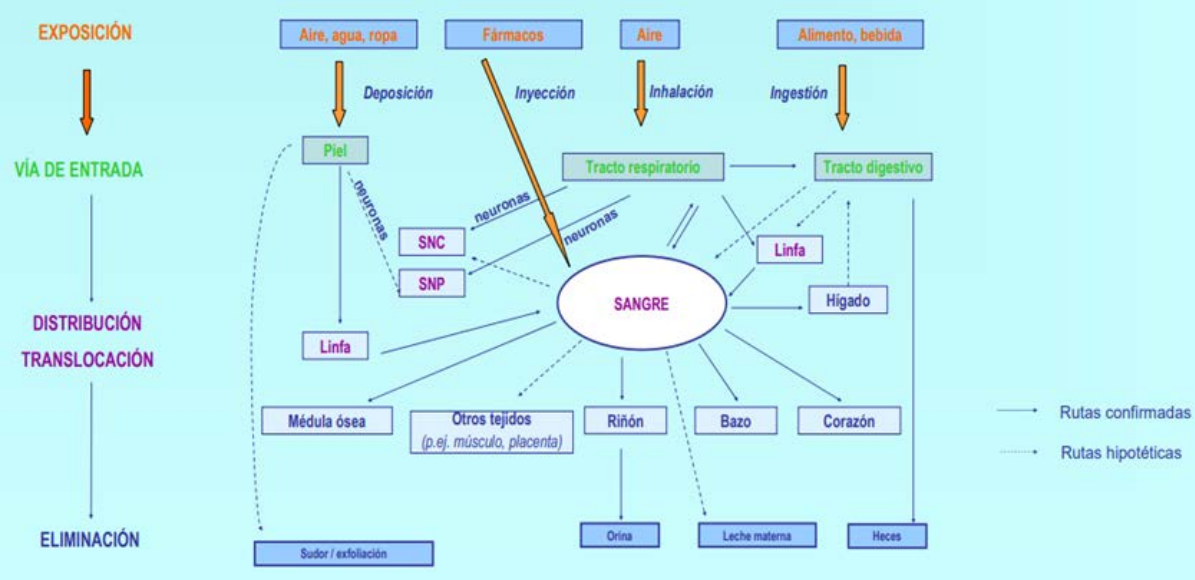
- Factores relacionados con los nanomateriales: toxicidad intrínseca del mismo, como la composición química, solubilidad en fluidos biológicos, tamaño y área superficial específica, forma, estructura cristalina, estado de aglomeración.

Las nanopartículas pueden ingresar al cuerpo humano a través de diferentes rutas: inhalación, absorción cutánea, ingestión o mediante aplicaciones médicas. Una vez dentro, tienen la capacidad de atravesar barreras biológicas que las partículas más grandes no pueden, como la barrera hematoencefálica y la barrera placentaria, lo que genera preocupación sobre posibles efectos en el cerebro y en el desarrollo fetal.

Por ejemplo, estudios han demostrado que nanopartículas inhaladas pueden llegar a los pulmones, donde podrían causar inflamación; de allí, pasar al torrente sanguíneo y a otros órganos. Esta capacidad de distribución plantea riesgos aún desconocidos, especialmente, cuando se trata de exposición prolongada, a través de productos de uso cotidiano, como cosméticos, alimentos, productos de limpieza y dispositivos médicos.

Figura 14

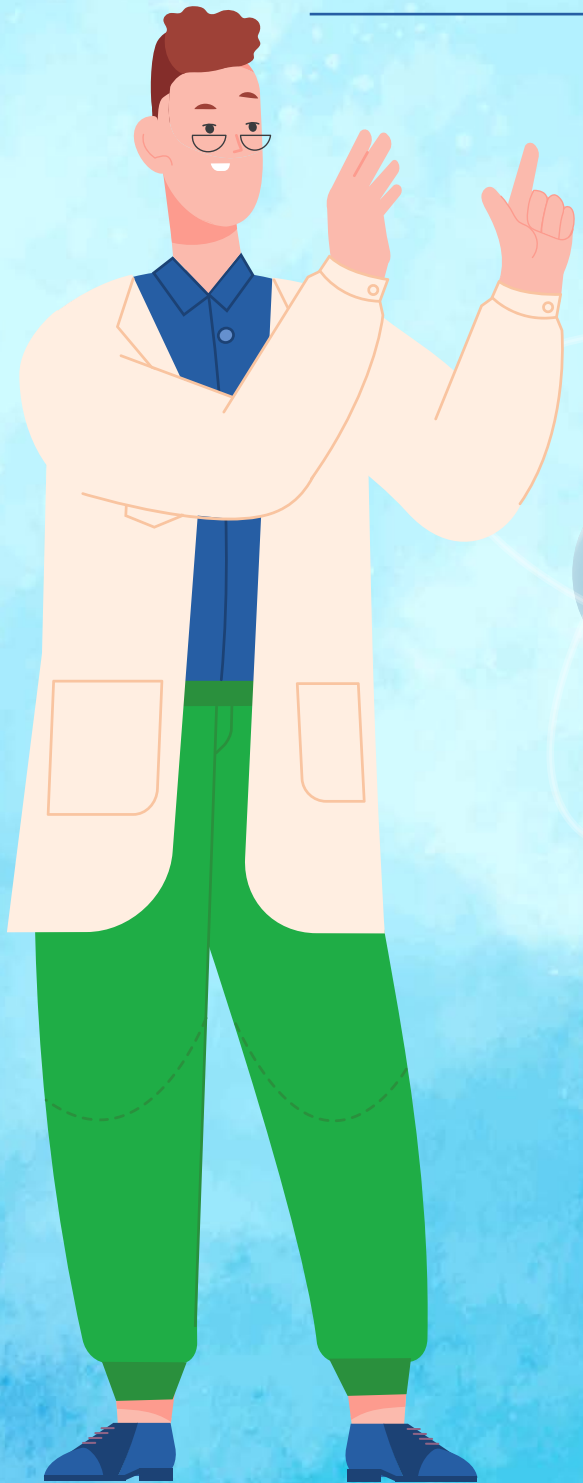
Toxicocinética de nanopartículas.

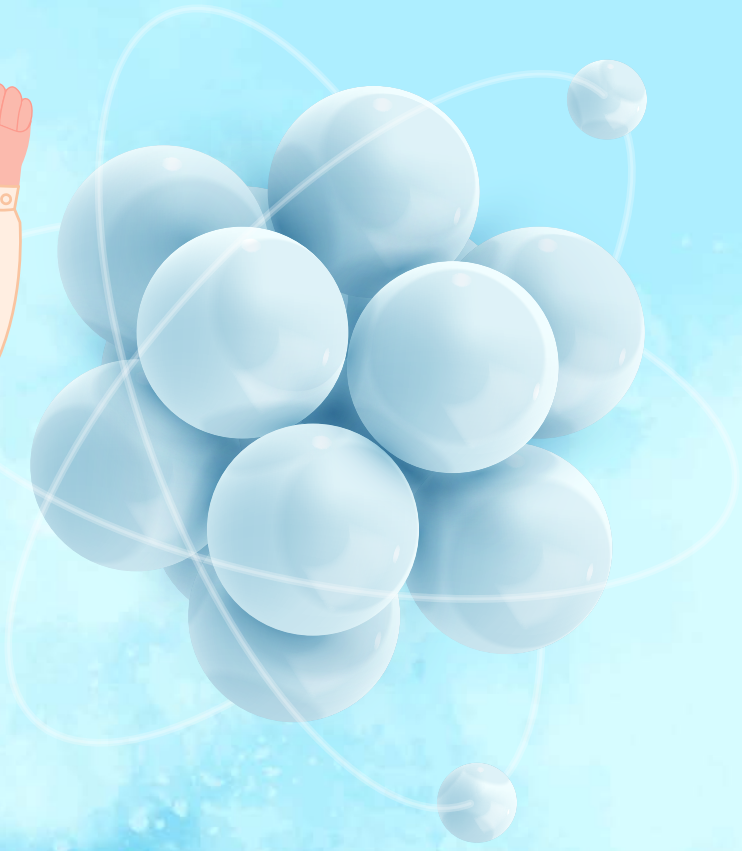


Fuente: SESST (2024). https://www.sesst.org/

CAPÍTULO IV

EVALUACIÓN DE RIESGOS POR LA PRESENCIA DE NANOPARTÍCULAS





Introducción

La nanotecnología, debido a su capacidad para manipular la materia a escalas atómicas y moleculares, ha revolucionado numerosos campos, desde la medicina hasta la industria manufacturera. Sin embargo, a medida que las nanopartículas y otros productos derivados de la nanotecnología se integran en más aspectos de la vida cotidiana, surgen preocupaciones sobre los riesgos potenciales para la salud humana y el medio ambiente.

La evaluación de estos riesgos nanotecnológicos se ha vuelto crucial para garantizar su uso seguro y sostenible. Dada la naturaleza única de los nanomateriales, con propiedades físicas y químicas diferentes a las de sus contrapartes a mayor escala, es necesario desarrollar enfoques específicos y precisos para identificar, medir y mitigar posibles efectos adversos. Esta evaluación debe considerar, no solo los riesgos a corto plazo, sino también las implicaciones a largo plazo de la exposición a estos materiales, lo que plantea nuevos desafíos regulatorios y científicos.

En este capítulo, se pondrá mayor énfasis a las metodologías de evaluación de riesgos nanotecnológicos por métodos cualitativos, al ser más accesibles. El caso de las metodologías cuantitativas, se requiere de equipos y procedimientos para la obtención de muestras y luego, a través de laboratorios, determinar el grado de concentración de las nanopartículas en el ambiente de trabajo.

Evaluación del riesgo por exposición a nanopartículas

Métodos cuantitativos

Para los métodos cuantitativos se tiene como referencia la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN-ISO / TR 12885, denominada: "Nanotecnologías. Prácticas de seguridad y salud en lugares de trabajo relacionados con las nanotecnologías", que es una traducción idéntica del Reporte Técnico Internacional ISO / TR 12885:2008.

En esta norma, se hace referencia al proceso de evaluación de riesgos mediante la utilización de equipos para efectuar un muestreo de partículas, con la finalidad de adoptar medidas preventivas para la seguridad y salud de los trabajadores. La norma se divide en los siguientes capítulos:

- Nanomateriales: descripción y fabricación.
- Caracterización del peligro.
- Evaluación de la exposición a nanomateriales.
- Evaluación de riesgos en los lugares de trabajo.
- Metodologías de control.
- Anexos.

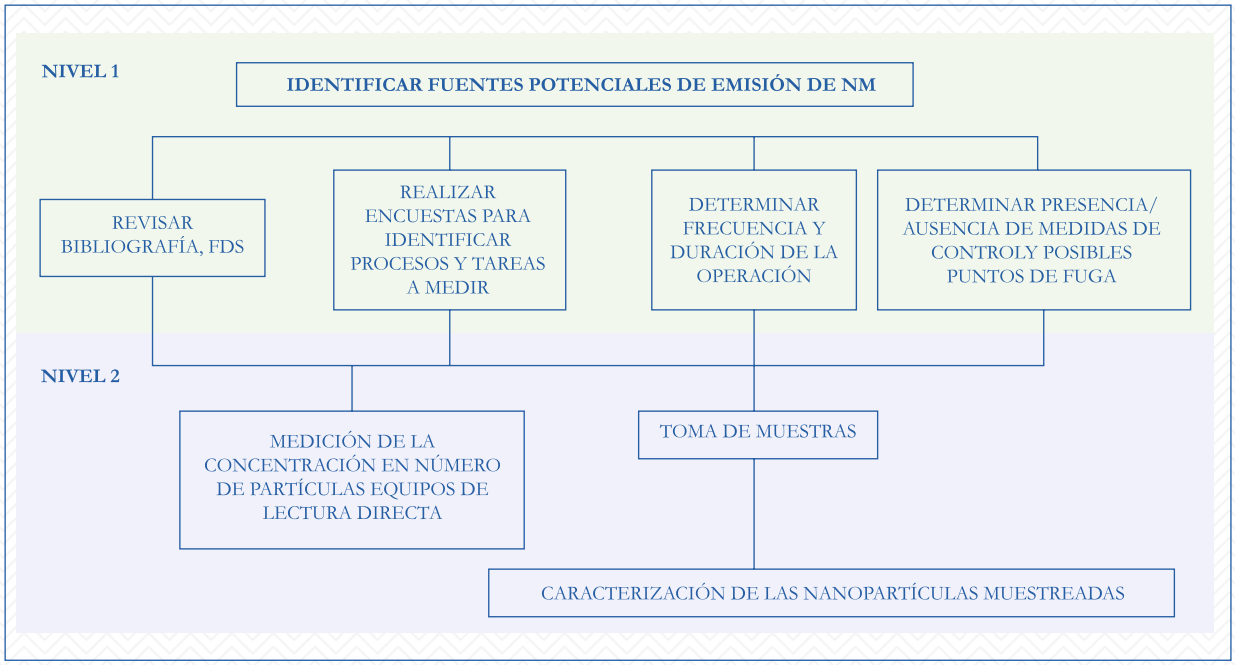
De esta manera, tomando en cuenta la ruta de exposición ya sea por inhalación, ingestión y/o contacto por la piel, se propone procedimientos y equipos para evaluar la exposición a nanopartículas. Los aspectos sugeridos en la norma para realizar la evaluación del riesgo por presencia de nanopartículas son:

1. Evaluación de la exposición personal para determinar la conformidad con la legislación.
2. Evaluación de la exposición personal para relacionarla con efectos potenciales adversos sobre la salud en estudios epidemiológicos.
3. Identificación de las principales fuentes de emisión para establecer un plan de control selectivo.
5. Evaluación de la eficiencia de los sistemas de control utilizados.

Para cada una de estas tareas, se requieren tipos de instrumentación específicos y diferentes. Para las mediciones de exposición personal, la mejor solución es la utilización de pequeños muestreadores autónomos, colocados sobre el trabajador que lo lleva durante la jornada de trabajo. Mientras que, para la identificación de las fuentes, puede utilizarse monitores portátiles que, en general, proporcionan mediciones continuas de concentración que pueden correlacionarse con detalles de localización, ventilación y procesos de trabajo específicos realizados.

Figura 15

Proceso de evaluación de riesgos por presencia de nanopartículas.



Fuente: autoría propia.

Para efectuar la evaluación, es importante tener datos y referencias bibliográficas de los nanomateriales. Para este efecto, se debe revisar los valores límite umbral / threshold limit value (TLV), que son parámetros cruciales en la gestión de la seguridad e higiene en ámbitos industriales. Estos valores son publicados por la American Conference of Governmental Industrial Hygienist (ACGIH). Su función principal consiste en medir la concentración máxima de una sustancia química en el aire a la que los trabajadores pueden estar expuestos a diario, sin experimentar efectos significativos para la salud de estos (Pérez, s.f.).

En España, el Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (INSST), es el encargado de establecer y revisar los límites de exposición profesional. Su existencia es fundamental para asegurar que las empresas cumplan con las medidas adecuadas de protección en el entorno laboral. En España, los TLV son conocidos como VLA (Valores Límite Ambientales) y fueros establecidos en el Real Decreto 374/2001.

Tanto los equipos como los TLV o VLA vienen expresados en ciertas unidades, dependiendo del país de origen en los que se efectuaron las investigaciones necesarias para obtener los TLV de exposición a nanopartículas.

Las medidas de exposición métricas son las siguientes:

- Concentración de partículas por unidad de volumen (pt/cm3).
- Medidas de masa convencionales (mg/m3).
- Área superficial (Surface-area µg/cm3).

Los valores límite para nanomateriales actuales asumen el término de materia particulada total (inhalable, torácica y respirable). De esta forma, quedan descartados los límites de exposición selectivo por tamaño de la partícula. Las unidades de medida aplicadas se basan en la cuantificación de nanopartículas presentes en el aire de la zona de respiración del trabajador. Estas son las siguientes:

- Concentración, expresada cómo # de nanopartículas / cm3.
- Masa, expresada como µg/m3 o mg/m3.

Actualmente, tanto la Conferencia Americana de Higienistas Industriales Gubernamentales (ACGIH) como el INSST, en sus publicaciones respectivas ya reportan los TLV o VLA respectivamente de los nanomateriales.

Figura 16

Publicaciones de la ACGIH e INSST anuales.

Fuente: Portadas manuales ACGICH e INSST (2015)

Tabla 9

Valores límites de exposición.

NANOMATERIAL	VALOR LÍMITE
Dióxido de silicio (SiO_2)	0,1 mg/m^3
Nanofibras de carbono	0,01 $fibras/cm^3$
Nanofibras de celulosa	0,01 $fibras/cm^3$
Nanoarcillas	0,3 mg/m^3
Polvo de Tóner	0,6 mg/m^3 0,06 mg/m^3 0,006 mg/m^3
NANOMATERIAL	**VALOR LÍMITE**
MWCNT	0,05 mg/m^3 0,0025 mg/cm^3
Fullerenos	0,27 mg/m^3 0,39 mg/cm^3
Ag (18-19 nm)	0,098 $fibras/cm^3$
Ag (≤ 100 nm)	0,9 $\mu g/m^3$
CNTs y Nanofibras	0,001 mg/m^3
TiO_2 (Ultrafino)	0,3 mg/m^3
TiO_2 (Fino)	2,4 mg/m^3

Fuente: autoría propia.

Tabla 10

Valores límites de exposición propuestas por país.

NANOMATERIAL	PAÍS	MASA	CONCENTRACIÓN
Fine TiO2 (respirable)	EEUU	2.4 mg/m3	–
Ultrafine TiO2 (respirable)	EEUU	0.3 mg/m3	–
Nanotubos de carbono Nanofibras de carbono. Ambos fracción respirable.	EEUU	1 µg/m3	–
TiO2	Japón	0.6 mg/m3	–
Fullerenos (C60)	Japón	0.39 mg/m3	–
Nanotubos de carbono	Japón	0.03 mg/m3	–
Nanofibras	Reino Unido	0.01 fibra/ml	–
Nanomateriales clasificados cancerígenos, mutagénicos generadores de asma y tóxicos reproducción (CMAR)	Reino Unido	0.1 x VLA del material padre	–
Nanomateriales insolubles	Reino Unido	0.066 x VLA del material padre	20.000 particulas/ml
Nanomateriales solubles	Reino Unido	0.5 x VLA del material padre	–
Nanomaterial granular con densidad >6000kg m-3	Alemania	–	20.000 particulas/cm3
Nanomaterial granular con densidad <6000kg m-3	Alemania	–	40.000 particulas/cm3
Nanomaterial granular	Alemania	0.1 mg/m3	Establece una concentración de nanopartículas distinta en función de su densidad y su tamaño, para 0.1 mg/m3.
Nanofibras rigidas, biopersistentes con efectos similares al amianto no están excluidas.	Holanda	0.01 fibres/cm3	Ejemplos. Nanotubos de carbono de pared múltiple, nanotubos de carbono de pared simple, fibras de óxido de metales con efectos similares al amianto no están excluidas.

Nanomateriales granulados biopersistentes entre 1-100 nm y >6000kg m-3	Holanda	–	20.000 partículas/cm3
Nanomateriales granulados biopersistentes entre 1-100 nm y >6000kg m-3	Holanda	–	40.000 partículas/cm3
Nanomateriales granulados no biopersistentes entre 1-100 nm.	Holanda	-	Valor Límite Ambiental aplicable.

Fuente: autoría propia.

Otra de las fuentes bibliográficas que se puede tener información, con respecto a las nanopartículas, son la Ficha de Datos de Seguridad (FDS), Material Safety Data Sheets (MSDS) en inglés. Este es un método aceptado y eficaz que contiene información relevante para el destinatario de sustancias y mezclas químicas. En la FDS se especifican las particularidades, propiedades y peligrosidad de una determinada sustancia o mezcla. También, se tratan temas relativos a la manipulación, almacenamiento, transporte, gestión de residuos, medidas a tomar en una situación de riesgo y consejos de primeros auxilios. La FDS aporta información útil y necesaria para la empresa y trabajadores que van a utilizar el producto (Reglamento 1907, 2015).

De igual manera, los fabricantes publican FDS, exclusivamente de nanopartículas o nanomateriales, estas fichas acordes a las normativas contienen:

- Identificación química.
- Información sobre el fabricante.
- Ingredientes peligrosos.
- Propiedades físico y químicas.
- Información sobre peligros de incendio y explosión.
- Información sobre su reactividad.
- Información sobre peligros a la salud.
- Precauciones para uso y manejo seguros.
- Control de la exposición y protección personal.

Métodos cualitativos

Para la aplicación de métodos cualitativos, se citará a la Norma Técnica de Prevención (NTP) 877: Evaluación del riesgo por exposición a nanopartículas mediante el uso de metodologías simplificadas. Esta metodología es una propuesta, en el caso de no tener equipos de medición, para los cuál es necesario lo siguiente:

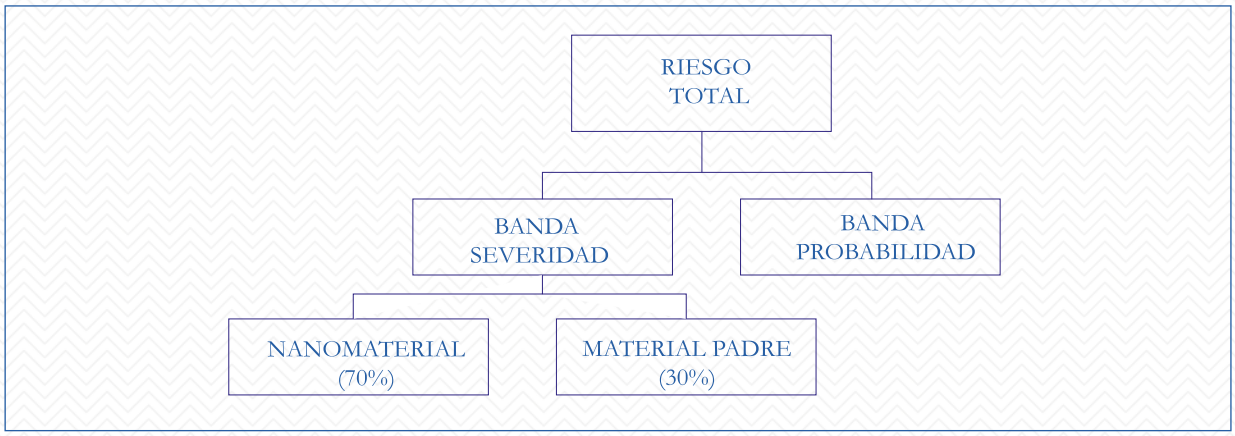
- Existencia de un índice para definir adecuadamente la exposición.
- La medida que se obtenga de este índice sea representativa de lo que está respirando el trabajador.
- Se disponga de métodos analíticos capaces de medir ese índice de exposición.

- Se conozcan niveles a los que dichas partículas tienen efectos para la salud.

La metodología propuesta, considera como parámetros para la evaluación cualitativa la "severidad" y la "probabilidad". El modelo utiliza un número limitado de factores para evaluar el riesgo con el fin de reducir la complejidad del método. La puntuación de severidad se determina en función de parámetros toxicológicos y la de probabilidad con el riesgo potencial de exposición. El resultado de la evaluación puede dar lugar a cuatro niveles de riesgo e indica las medidas necesarias a poner en marcha en cada caso.

Figura 17

Base del método de Evaluación del riesgo.



Fuente: autoría propia.

Tabla 11

Matriz de decisiones en función de la severidad y probabilidad.

		PROBABILIDAD			
		Extremadamente imposible (0-25)	Poco probable (26-50)	Probable (51-75)	Muy Probable (75-100)
SEVERIDAD	Muy alta (76-100)	RL3	RL3	RL4	RL4
	Alta (51-75)	RL2	RL2	RL3	RL4
	Media (26-50)	RL1	RL1	RL2	RL3
	Baja (0-25)	RL1	RL1	RL1	RL2

Fuente: autoría propia.

Para el cálculo de la puntuación de la severidad, la metodología toma en cuenta las propiedades físico - químicas del nanomaterial, con una puntuación del 40 % y las propiedades toxicológicas con una puntuación del 30 %, aportando en la evaluación el 70% de la calificación de la severidad que tiene la nanopartícula. El otro 30 % se obtiene de las propiedades toxicológicas del material padre, es decir, del material de donde se extraen las nanopartículas.

Tabla 12

Factores considerados para la puntuación de la severidad.

CARACTERÍSTICAS DEL NANOMATERIAL (70%)	
• Química superficial (10) • Forma de la partícula (10) • Diámetro de la partícula (10) • Solubilidad (10)	PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS (40%)
•Carcinogenicidad (6) • Toxicidad para la reproducción (6) • Mutagenicidad (6) • Toxicidad dérmica (6) • Capacidad para producir asma (6)	PROPIEDADES TOXICOLÓGICAS (30%)
CARACTERÍSTICAS DEL MATERI ALPADRE (30%)	
• Toxicidad (10) • Carcinogenicidad (4) • Toxicidad para la reproducción (4) • Mutagenicidad (4) • Toxicidad dérmica (4) • Capacidad para producir asma (4)	PROPIEDADES TOXICOLÓGICAS (30%)

Fuente: autoría propia.

Es importante tener en cuenta las definiciones a las que se refiere cada aspecto son posibles encontrarlas en las FDS. Para el cálculo de la probabilidad, se estima la exposición de los trabajadores, se considera la posibilidad que las nanopartículas pasen al ambiente, lo que aumenta principalmente la probabilidad de inhalación, pero también la de contacto con la piel.

Al igual que en el caso de la severidad, la máxima puntuación de probabilidad es 100 y se calcula sumando la puntuación de cada uno de los factores que se detallan a continuación:

- Cantidad estimada de nanomaterial por tarea (25).
- Pulverulencia /capacidad de formar nieblas (30).
- Número de empleados con exposición similar (15).
- Frecuencia de la operación (15).
- Duración de la operación (15).

Figura 18

Base del método de evaluación del riesgo.

	BAJO	MEDIO	DESCONOCIDO	ALTO
CANTIDAD ESTIMADA DEL NANOMATERIAL DURANTE LA TAREA	6.25 Menor de 10 mg	12,5 Entre 11 y 100 mg	18,75	25 Mayor de 100 mg
PULVERULENCIA/ CAPACIDAD DE FORMAR NIEBLAS	7,5	15	22,5	30
N.° DE TRABAJADORES CON EXPOSICIÓN SIMILAR	5 6-10	10 11-15	11,25	15 >15
FRECUENCIA DE LA OPERACIÓN	5 mensual	10 semanal	11,25	15 diario
DURACIÓN DE LA OPERACIÓN	5 30-60 min	10 1-4 horas	11,25	15 >4 horas

Fuente: autoría propia.

Este tipo de evaluación es conocido también como CB Nanotool 2.0, que prácticamente es una hoja de cálculo que contiene los parámetros de la NTP 877. Este método no es el único para evaluar de manera cualitativa el riesgo por la exposición a nanopartículas. Otros países han propuesto otros tipos de evaluación como se puede ver en la siguiente Figura 19.

Figura 19

Métodos de evaluación cualitativa.

Nombre	Tipo	Web	País
SWISS PRECAUTIONARY MATRIX	Risk prioritisation	http://www.bag.admin.ch	
CB NANOTOOL 2.0	Control banding	http://www.controlbanding.net	
ANSES NANO	Control banding	http://www.anses.fr	
STOFFENMANAGER NANO 1.0	Risk prioritisation	https://nano.stoffenmanager.nl/	
NANOSAFER	Semiquantitative	http://nanosafer.i-bar.dk/	
ISO/TS 12901-2:2014	Control banding	http://iso.org	
COMISIÓN EUROPEA	Control banding	http://ec.europa.eu/	
Groso et al. J Nanobiotechnol (2016)	Control banding	Research laboratories	

Fuente: Groso et al. (2016).

Controles

Una vez efectuada la evaluación cualitativa aplicando la NTP 877, se puede ver que en la Tabla 10, Matriz de decisiones en función de la severidad y probabilidad, se obtienen cuatro niveles de riesgo. Dependiendo de cada nivel de riesgo, la norma indica qué controles se pueden implementar para mitigar o minimizar el riesgo por la exposición a nanopartículas. Para indicar los posibles controles a implementar, se citarán los sugeridos en la NTP 797 y son los siguientes:

Sustitución. El primer paso para el control del riesgo es la aplicación del principio de sustitución de la nanopartícula, aplicable también a los procesos (prioridad del húmedo frente al seco) y a equipos antiguos u obsoletos. Por ejemplo, se puede pensar en la sustitución de un proceso de trabajo en seco por un proceso de trabajo en húmedo.

Figura 20

Proceso de obtención de nanopartículas en húmedo.

Fuente: Hielscher (2024). https://bit.ly/40LbHQP

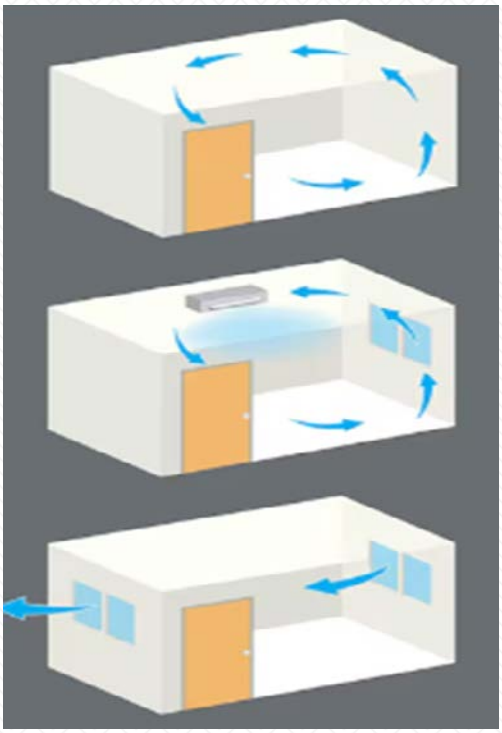
Ingeniería. Es importante disponer de instalaciones seguras, teniendo en cuenta la reglamentación vigente, para eliminar situaciones de riesgo. Cabe indicar que es aquí donde hacen referencia los niveles de riesgo de la Tabla 11.

- R1: ventilación general.
- R2: ventilación por extracción localizada o campanas de humos.
- R3: confinamiento.
- R4: buscar asesoramiento externo.

Recirculación del aire y filtración. La filtración del aire recirculado o su descarga al exterior juegan un papel importante en el control de la exposición a nanopartículas. Debe tenerse en cuenta que los filtros HEPA (High Efficiency Particulate Air) presentan una eficacia superior al 99,97% para partículas de un tamaño medio de 0,3 µm, pudiendo, las partículas que son más pequeñas que la malla del filtro, ser capturadas por diferentes mecanismos, tales como la difusión, intercepción, impactación, sedimentación o fuerzas electrostáticas. La difusión browniana, causante de las colisiones entre el aire y las nanopartículas, crea un movimiento al azar de los nanomateriales que incrementa la posibilidad que puedan chocar o contactar con el filtro, favoreciendo la filtración de las mismas; cuando las partículas se adhieren a la superficie del filtro quedan retenidas eficazmente por fuerzas de Wan der Waals. Todos estos mecanismos deberían asegurar la filtración eficaz de las nanopartículas mediante los filtros HEPA, aunque está descrito que su eficacia decrece para partículas inferiores a 2nm.

Figura 21

Recirculación de aire.



Fuente: Freepik (2024). https://bit.ly/4hwk8oI

Ventilación. Cuando no se pueda trabajar en circuito cerrado, la captación de estos contaminantes en el foco de emisión mediante la extracción localizada será la opción más eficaz para evitar su propagación en el ambiente de trabajo y evitar la exposición de los trabajadores. Para los nanomateriales, las especificaciones y la calidad de estos sistemas de extracción deben ser similares a aquellos que se utilicen para gases, vapores y aerosoles. A pesar de ello, en algunos procesos es imposible evitar la presencia de nanopartículas en el ambiente. En estos casos, la ventilación general por dilución puede controlar el nivel de contaminación ambiental de nanopartículas.

Las operaciones de limpieza deben realizarse mediante aspiración y antes de cualquier operación de mantenimiento del equipo, este debe de limpiarse con aspiración. Un sistema de extracción, bien diseñado, con un filtro de partículas de alta eficacia HEPA debe ser efectivo para evitar que los nanomateriales pasen al ambiente. Es condición indispensable que el filtro esté bien anclado al soporte, ya que la eficacia de filtración será muy baja. Es preciso disponer de medidas de control para garantizar la eficacia del sistema.

Figura 22

Ventilación.

Fuente: Sispro (2024). https://sisproservice.es/aire-acondicionado-industrial-en-madrid/

Aislamiento o encerramiento del proceso. El principal método de control para evitar emisiones de nanopartículas es el encerramiento del proceso. Las operaciones de riesgo deben realizarse preferiblemente en circuito cerrado; si ello no es posible, en locales cerrados y equipados con sistemas de ventilación que eviten el paso de la contaminación a otras áreas. Cuando el proceso genere mucha contaminación que no sea controlable debe procederse a aislar a los trabajadores que pueden utilizar sistemas de control remoto para controlar el proceso.

Debe tenerse en cuenta que, en caso de una fuga en el circuito cerrado o en el encerramiento del proceso, las nanopartículas se comportarán como un gas y se dispersarán llegando a cualquier lugar de la planta. Como ya se ha indicado anteriormente, con el paso del tiempo, las nanopartículas se aglomeran (coagulación), dejando de ser nanopartículas dificultando su dispersión en el ambiente. En este sentido, se hallan descritos procedimientos de trabajo en circuito cerrado en la producción a escala nanométrica del negro de carbón, TiO_2 nanométricos, metales y óxidos de metales.

Figura 23

Aislamiento o confinamiento del proceso.

Fuente: Conquerscientific (2024). https://bit.ly/4h8M2Hp

Controles administrativos. Prácticas de trabajo seguras. Algunas normas de trabajo como las que se detallan a continuación pueden ayudar a minimizar la exposición a nanomateriales:

- No guardar o consumir comida y bebidas en el puesto de trabajo.
- Prohibir la aplicación de cosméticos en lugares donde se manipulen, usen o almacenen nanomateriales.
- Disponer de lavabos para lavarse las manos y promover los hábitos de utilizarlos antes de comer o al dejar el puesto de trabajo.
- Quitarse la ropa de protección o batas para acceder a otras áreas de trabajo como administración, cafetería, sala de relax, etc.
- Facilitar las duchas y el cambio de ropa para prevenir la contaminación de otras áreas de forma inadvertida debida al transporte de los nanomateriales a través de la ropa y de la piel
- El personal deberá evitar tocarse la cara u otras partes del cuerpo expuestas con los dedos contaminados. El uso de Equipos de Protección Individual (EPI), como máscaras, puede ayudar a evitar el potencial de transferencia de los nanomateriales. La exposición por ingestión puede ser consecuencia del contacto entre mano y boca. Por tanto, todas las estrategias para reducir la exposición dérmica también reducirán la exposición por ingestión.
- Limpiar el área de trabajo como mínimo al final de la jornada laboral, utilizando sistemas de aspiración dotados de filtros HEPA y sistemas de barrido húmedos.

Figura 24

Ingerir alimentos en sitios de trabajo aumenta los riesgos.

Fuente: Dreamstime (2024).

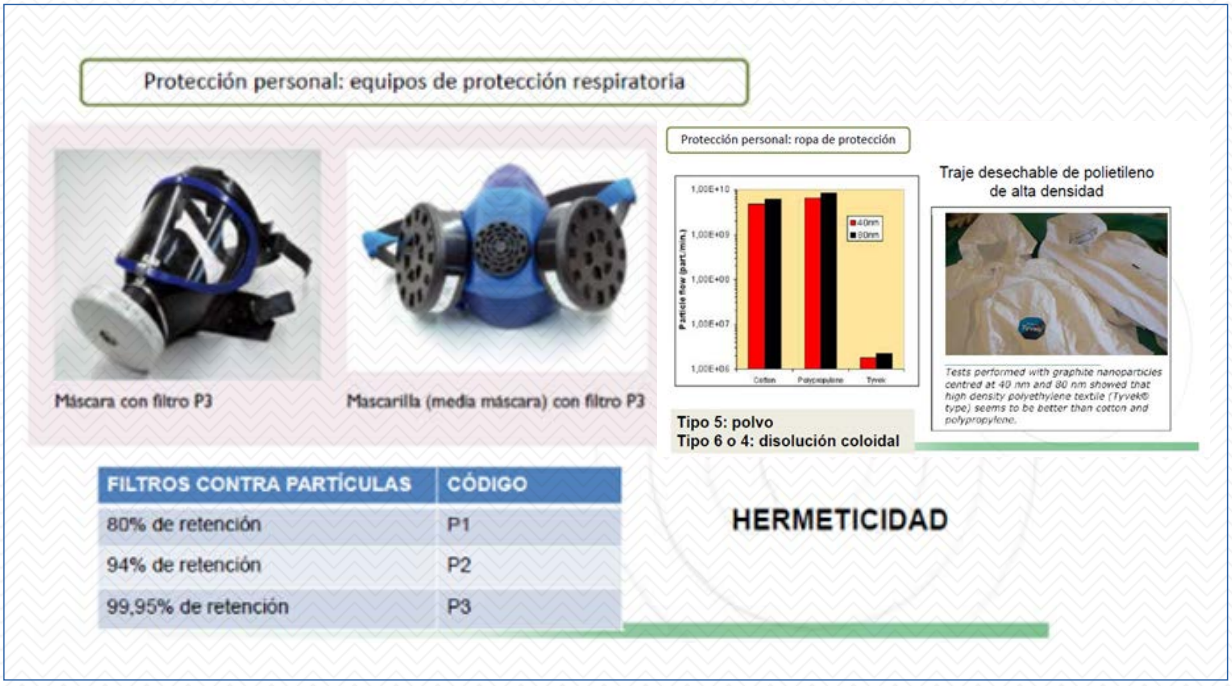
Equipos de Protección Personal (EPP). Dado que la exposición dérmica a nanopartículas puede conducir a la penetración directa de éstas a través de la epidermis, es necesario tomar medidas para evitar esta exposición. Se deben utilizar guantes adecuados, tanto cuando se manejen nanopartículas en estado sólido como en solución y fase gas. Los guantes utilizados, cuando las

nanopartículas están en suspensión en un líquido, además, deben tener una buena resistencia a éste. Si se prevé un contacto prolongado deberían utilizarse dobles guantes, dado que la resistencia química del guante puede variar dependiendo del fabricante, modelo y espesor. Por lo tanto, es recomendable consultar las especificaciones del propio fabricante.

Si se aplican adecuadamente las medidas técnicas expuestas, es poco probable que sean necesarias protecciones respiratorias. En todo caso, su utilización debe basarse en el criterio profesional y en los resultados de la evaluación de riesgos, teniendo en cuenta que se utilizan como último recurso. Cuando se emplean equipos dependientes del medio ambiente, la filtración es el mecanismo de limpieza del aire antes de ser inhalado por el trabajador y hay que tener presente que, por un lado, la eficacia de la filtración no es absoluta y, por otro, puede haber puntos de fuga por falta de estanqueidad, debido a: la sujeción de la máscara a la cara puede ser incorrecta o insuficiente, el periodo de uso no es ilimitado y, finalmente, el tipo de actividad puede dificultar su uso correcto. Por otro lado, tampoco hay que olvidar que la difusión de las nanopartículas es inferior a la de los gases.

Figura 25

Equipos de Protección Personal (EPP).



Fuente: CEO (2024). https://bit.ly/3CruPKj

Estudios de caso

Caso 1: Riesgos por la exposición a nanopartículas

Aunque, no es la vía más frecuente de penetración de nanopartículas (NPs) en el organismo, también se han descrito algunos casos de absorción dérmica de NPs, en Toyama T & Col. En 2008, se describió un caso de eritema multiforme, producido como respuesta alérgica, tipo dermatitis de contacto en una persona con exposición laboral a Fullerenos C60, en un laboratorio de investigación, cuya sintomatología desaparece en periodos de baja y reaparece tras la reincorporación al puesto de trabajo:

a) Investigue que es un eritema multiforme.
b) Investigue que son los Fulleranos C60.
c) Se conoce por una evaluación cuantitativa que el valor es de 0.67 mg/m3. Investigue el TLV de los Fulleranos C60 y confirme si el trabajador está expuesto. En caso de estar expuesto, acorde a la NTP 797, ¿qué medidas de control implementaría para evitar que el trabajador se vuelva a contagiar cuando se incorpora a su puesto de trabajo?

Caso 2: Estudio de caso del dióxido de titanio

El dióxido de titanio (TiO2), a nano-escala, se utiliza en la actualidad como un componente de los protectores solares. Por tal razón, es un producto de alta demanda en las fábricas que lo producen. En una fábrica de cosméticos, para mejorar el producto, se ha decidido utilizar NPs de dióxido de titanio obtenidas de oxisulfato de titanio. En el proceso de elaboración del producto, se producen 20 frascos en el lapso de 2 horas, donde se utilizan 3 mg de TiO2 por frasco. Se lo ejecuta a diario y el número de trabajadores que se encarga de este proceso son dos.

a) Consulte las FDS de las NPs de dióxido de titanio y la FDS del oxisulfato de titanio.
b) Utilice la hoja de Excel Nanotools para evaluar el riesgo por la presencia de nanopartículas.
c) Defina los controles que se deben implementar desde eliminación, sustitución, ingeniería, administrativos, EPP.

Caso 3: Estudio de caso del oxido de aluminio

Un técnico en Seguridad y Salud Ocupacional (SSO) es contratado por una empresa, donde manejan y embolsan un producto llamado Alox, cuyo principal componente (75%) son nanopartículas de óxido de aluminio (Al2 O3). Estas NP's son obtenidas del Sulfato de Aluminio (Al2(SO4)3). El técnico al momento de realizar su evaluación mediante el uso de la NTP 877 cuenta con los siguientes documentos:

FDS (Ficha de datos de seguridad) Al2 O3

Identificación de la sustancia:	Óxido de aluminio.
Nombre de la sustancia	Óxido de aluminio.
EC	215-691-6
CAS	1344-28-1
IUPAC	Óxido de aluminio.
Fórmula molecular	Al2O3
Formas en el mercado	Polvo.

Propiedades físico - químicas	
Forma	Esférico.
Tamaño (µm)	0.04 (media).
Capacidad de inducir radicales libres	Medio.
Soluble	No.

Información toxicológica	
Toxicidad aguda por inhalación	LC50 = 0.888 mg/L (Extremadamente tóxico).
Toxicidad aguda dérmica	No data.
Toxicidad aguda por ingestión	LD50 = >1000 mg/kg (No tóxico).
Genotoxicidad	Negativo in vibro.
	Positivo in vivo.
Citotoxicidad	Positiva.
Carcinogenicidad	Grupo 2A según la IARC.
Mutagenicidad y toxicidad para la reproducción	R46, R40
Información ecotoxicológica	

Toxicidad aguda agua dulce (Dafnia)	EC50 = 310.53 mg/L (No tóxico). LC50 = 53.29 mg/L (Prácticamente no tóxico).
Toxicidad aguda agua dulce (Alga)	EC50 = 45.4 mg/L (Prácticamente no tóxico). EC50 = 39.95 mg/L (Prácticamente no tóxico).
Toxicidad aguda agua dulce (Pez)	No datos disponibles.
Invertebrados del suelo (Gusano)	No datos disponibles.
Bioacumulación	No datos disponibles.

Aplicación	
Usos industriales	Recubrimientos.
Plástico.	
Automoción.	
Propiedades que mejora	Refuerzo mecánico.
Resistencia a la corrosión.	
Resistencia química.	
Resistencia al impacto.	

Datos del material padre investigado por el técnico de SSO

VLA-ED = 10 mg/m3.
H 350i Puede provocar cáncer por inhalación.
H 360 Puede perjudicar la fertilidad o dañar al feto.

Observaciones del técnico e información suministrada por Recurso Humanos (RRHH)

La jornada es de ocho horas efectivas de lunes a viernes. Se embolsa 50 mg en media jornada de trabajo, donde se cambia de turno por otros trabajadores. En este proceso, trabajan cinco personas directamente y dos indirectamente. El lugar dispone de ventilación mecánica y extracción localizada en aquellos puntos donde se espera que la exposición a nano partículas pueda ser mayor, ya que los

operarios se encuentran cerca de los focos de exposición.

Con todos los antecedentes dados:

a) Investigue en que se utiliza el Alox.

b) Utilizando los criterios de la NTP 877 y la herramienta nanotools, determine el RL (nivel de riesgo) por la presencia de nano partículas.

c) Como técnico de seguridad que controles sugiere acorde a los resultados.

d) ¿Cómo estructuraría en la matriz de riesgos simplificada de la OIT 2013, este riesgo producido por nanopartículas? Explique la justificación del plan al gerente que lo contrata.

Referencias

Amaya, J., & Quiroga, W. (2020). Nanomateriales: Una clasificación desde sus dimensiones. *Revista Química e Industria*, 8-12.

Cornejo, L. (14 de 07 de 2015). *Nuevas tecnologías y materiales.* Clasificación de los nanomateriales. https://nuevastecnologiasymateriales.com/clasificacion-de-los-nano-materiales/

Díaz, F. (2012). *Introducción a los Nanomateriales.* Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán.

Gálvez Pérez , V., & Tanarro, C. (2009). *Toxicología de las Nanopartículas.* INSHT.

INEN. (2014). *Nanotecnologías.* Prácticas de seguridad y salud en lugares de trabajo relacionadas con las nanotecnologías (ISO 12885/TR:2008, IDT). Ecuador: AENOR.

Instituto Nacional de Seguridad e Higiene del Trabajo . (2015). *Seguridad y Salud en el Trabajo con Nanomateriales.* INSHT.

López, J. (4 de 08 de 2022). *Business School.* Tipos de Nanotecnología y sus Aplicaciones: https://grupoioe.es/tipos-de-nanotecnologia/

Nanósfera (Dirección). (2020). *¿Qué es la Nanotecnología?* [YouTube].

Pérez, M. J. (s.f.). *¿Qué es el TLV en Seguirdad Industrial?* https://oroel.com/ayuda-y-consejos/que-es-el-tlv-en-seguridad-industrial/#:~:text=Es%20Espa%C3%B1a%20los%20TLV%2C%20son,cada%20incluyen%20nuevos%20agentes%20qu%C3%ADmicos.

Reglamento 1907. (22 de 12 de 2015). *eQgest.* Herramientas para la prevención de riesgos: Fichas de Datos de Seguridad: https://www.eqgest.com/blog/fichas-de-datos-de-seguridad#:~:text=La%20Ficha%20de%20Datos%20de,una%20determinada%20sustancia%20o%20mezcla.

Rosell Farrás, M., & Pujol Senovilla, L. (2008). NTP 797: *Riesgos Asociados a la Nanotecnología.* INSHT.

Serena Domingo, P., & Bermejo Bermejo, M. (2017). *Los Riesgos de la Nanotecnología.* Catarata.

Tanarro, C. (2010). *Evaluación de riesgos por exposición a nanopartículas mediante el uso de metodologías simplificadas.* INSHT.

Yan, Q., Gozín, M., Zhao, F., Cohen, A. y Pang, S. (2016). *Nanoscale* (9), 1-41.

ISBN: 978-9942-676-96-2

Matriz La Magdalena: Calle Jambelí Oe3-158 y La Unión.
Campus Eloy Alfaro: José Barreiro y Av. Eloy Alfaro N52-85, Sector Solca.
Campus Calderón: Calle Los Cipreses N6-99 y Giovanni Calles.
Campus Pifo: Ignacio Fernández Salvador Oe2-439 y Pasaje Baldeón.
Sede Santa Elena: La Libertad, barrio 25 de Septiembre, Av. 25 y calle 28.
Sede Guayaquil: Calle 6 de Marzo y Rosendo Avilés, Barrio del Centenario.
www.tecnoecuatoriano.edu.ec