

Exposición dérmica a sustancias químicas: métodos de medida

Dermal exposure to chemicals: methods of measurement
L'exposition cutanée aux produits chimiques: les méthodes de mesure

Redactores:

Isaac Abril Muñoz

Ldo. en Ciencias Químicas

Pedro Delgado Cobos

Dr. en Ciencias Químicas

CENTRO NACIONAL DE MEDIOS
DE PROTECCIÓN

Juan Porcel Muñoz

Ldo. en Ciencias Químicas

CENTRO NACIONAL DE VERIFICACIÓN
DE MAQUINARIA

Esta NTP es la primera de tres notas técnicas de prevención sobre la evaluación del riesgo por exposición dérmica a sustancias químicas. En las dos primeras (NTP 895 y NTP 896) se analizan los métodos para la determinación de la exposición dérmica laboral a sustancias químicas, centrándose ésta en la medición de la misma, mientras que en la siguiente se analizarán los métodos existentes para la determinación simplificada de la exposición dérmica a sustancias químicas. La tercera de las NTP (NTP 897) aborda la metodología simplificada para la evaluación y gestión del riesgo por exposición dérmica a sustancias químicas.

Mediante esta NTP se amplía la información relativa a la evaluación directa de la exposición dérmica introducida en la NTP 697 "Exposición a contaminantes químicos por vía dérmica".

Las NTP son guías de buenas prácticas. Sus indicaciones no son obligatorias salvo que estén recogidas en una disposición normativa vigente. A efectos de valorar la pertinencia de las recomendaciones contenidas en una NTP concreta es conveniente tener en cuenta su fecha de edición.

1. INTRODUCCIÓN

Los métodos de medida de la exposición dérmica existentes se basan en los desarrollados en el campo de los plaguicidas que se encuentran publicados en varios protocolos. Los dos más utilizados son los de la Organización Mundial de la Salud (OMS) y el de la U.S. Environmental Protection Agency (EPA). En ambos se perfila la metodología para la medida de la cantidad de plaguicida en contacto con la ropa y piel del individuo (exposición potencial) y en contacto con la piel del individuo (exposición real). En 1997 se publicó la guía de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OCDE) titulada: "Guidance Document for the Conduct of Studies of Occupational Exposure to Pesticides During Agricultural Application", que incluye una recopilación de procedimientos recomendados.

En el año 2005, el Comité Europeo de Normalización (CEN) publicó el Informe Técnico CEN/TR 15278:2005 "Exposición en los lugares de trabajo – Estrategia para la evaluación de la exposición dérmica" y la Especificación Técnica CEN/TS 15279:2005 "Exposición en los lugares de trabajo – Medición de la exposición dérmica – Principios y métodos".

El primero de ellos tiene por objetivo describir las diferentes estrategias de evaluación de la exposición cualitativa y cuantitativamente, tanto de forma simplificada como detallada, siguiendo las etapas de evaluación descritas en la norma UNE-EN 689:1996, *Directrices para la evaluación de la exposición por inhalación a agentes químicos para la comparación con los valores límite y estrategia de muestreo*, sobre atmósferas en el lugar de trabajo. Este Informe Técnico contiene además una serie de recomendaciones para el control de la exposición dérmica a agentes químicos.

Por su parte, la Especificación Técnica CEN/TS 15279:2005 tiene como objetivos:

- Describir los principales métodos utilizados para la medición de la exposición dérmica, así como analizar sus principales ventajas e inconvenientes.
- Describir los requisitos necesarios que deben reunir los métodos de muestreo, atendiendo a diferentes aspectos como la eficacia del muestreo, la estabilidad de la muestra, el sesgo, la precisión, la incertidumbre global, etc.

En esta NTP se analizarán los principales métodos utilizados para la medición de la exposición dérmica, valorando para cada uno de ellos las ventajas e inconvenientes, así como la estrategia de muestreo para la selección de la técnica más adecuada en función de las condiciones existentes en el lugar de trabajo.

2. MODELO CONCEPTUAL

La exposición dérmica ha sido descrita como un proceso interactivo entre la fuente de contaminación y el cuerpo, con múltiples procesos de transferencia de materia.

De manera simplificada la contaminación de la piel puede ocurrir por deposición de aerosoles, por contacto directo con la sustancia, como puede ser la inmersión directa o salpicaduras, o por contacto con superficies contaminadas.

Sin embargo, con objeto de asegurar una correcta evaluación de la exposición dérmica, es necesario conocer de forma detallada los procesos de transporte de materia y los compartimentos físicos conectados por estos procesos, por lo que se desarrolló un modelo conceptual que describe sistemáticamente el transporte de materia contaminante desde una fuente de emisión a la superficie de la piel. Se definen ocho procesos de trans-

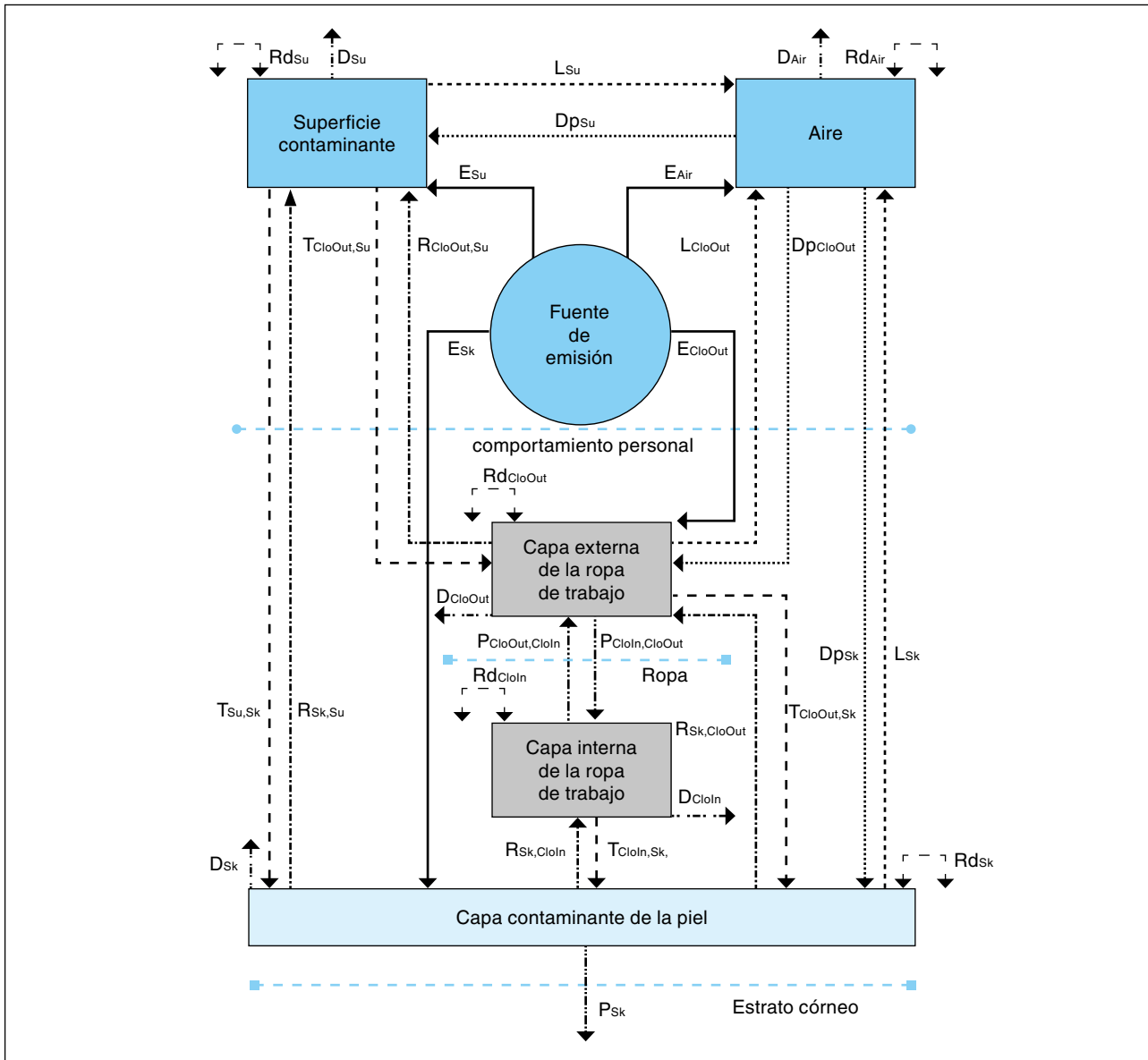


Figura 1. Modelo conceptual (Schneider et al, 1999)

porte de materia (emisión: E, deposición: Dp, resuspensión o evaporación: L, transferencia: T, eliminación: R, redistribución: Rd, descontaminación: D, penetración y permeación: P), seis compartimentos (fuente de emisión, aire, superficie contaminante, capa externa e interna de la ropa de trabajo, capa contaminante de la piel) y dos barreras (ropa y estrato córneo), tal y como se detalla en la figura 1.

De acuerdo con este modelo, el contaminante puede llegar a la piel a través de los procesos de transporte de emisión, deposición o transferencia. Como se aprecia en la figura 1, la emisión es la liberación directa del contaminante desde la fuente de emisión a la piel o a la ropa, deposición es la fijación del contaminante en la piel o la ropa desde el aire y la transferencia es el transporte del contaminante desde superficies contaminadas.

El modelo proporciona un esquema para evaluar la exposición dérmica, tanto cualitativa como cuantitativamente.

Uno de los propósitos del modelo conceptual es ayudar a identificar los compartimentos y los procesos de transferencia de materia más importantes en una situación dada con el objetivo de establecer una estrategia

de muestreo apropiada. Así, por ejemplo, si se pretende medir la exposición dérmica de un líquido en una situación en la que existe una importante contaminación de las superficies de trabajo, se debería recoger información sobre la probabilidad de evaporación del líquido de la superficie, la frecuencia y el método de limpieza de la superficie, el número de veces que el trabajador debe entrar en contacto con la superficie y la forma de producirse este contacto (una mano, ambas manos, los dedos, etc.)

3. MÉTODOS DE MEDIDA DIRECTA DE LA EXPOSICIÓN DÉRMICA

En la determinación de la exposición por vía dérmica cabe distinguir entre medidas de exposición potencial, de exposición real y de dosis absorbida, tal y como se indica en la NTP 697 "Exposición a contaminantes químicos por vía dérmica", siendo las dos primeras medidas directas de la exposición dérmica, mientras que la dosis interna se determina mediante control biológico. Esta NTP se centra en la

descripción de las medidas directas de exposición dérmica.

Las técnicas de medida directa de la exposición dérmica son: la técnica de interceptación o sustitutiva de la piel, la técnica de eliminación o retirada del contaminante y la técnica de recuperación in situ o de evaluación directa. Adicionalmente puede usarse la técnica de muestreo de superficies para evaluar la exposición dérmica indirectamente ya que recoge el contaminante depositado en una superficie de trabajo determinada, estimando cuál podría ser su contribución a la exposición dérmica si se produjera contacto físico con ella.

En la tabla 1 se enumeran los métodos más comúnmente utilizados de cada una de las técnicas anteriormente comentadas.

Técnica de muestreo	Método de muestreo
Técnica sustitutiva de la piel	Parches
	Cuerpo completo
	Guantes absorbentes
Técnica de retirada del contaminante	Lavado de manos
	Limpieza con disolvente
	Retirada del contaminante con cinta adhesiva
Técnica de recuperación in situ	Video imagen
	ATR - FTIR
	Sonda luminosa
	PXRF
Técnica de muestreo de superficies	Aspirado de superficies, limpieza con disolvente, determinación del residuo foliar desprendible, etc.

Tabla 1: Principales técnicas de muestreo aplicables a la exposición dérmica

Los resultados de las mediciones deben ser interpretados en relación con la estrategia de muestreo seguida, ya que éstos estarán influenciados por la utilización de un método u otro.

A continuación se describen y analizan cada uno de estos métodos de muestreo.

Técnica sustitutiva de la piel

El fundamento de esta técnica de muestreo es la interceptación y posterior retención del contaminante antes de que alcance la piel del trabajador, mediante la interposición de un medio de toma de muestra. Los materiales de muestreo se colocan sobre la ropa o la piel del trabajador en diferentes partes del cuerpo antes de estar expuesto al contaminante. Finalizado el periodo de toma de muestra, la cantidad de contaminante retenida en los muestreadores se extrae de los mismos y se analiza mediante un método de análisis apropiado.

De esta forma, el contaminante recuperado del medio de toma de muestra representaría:

- La exposición potencial, si el muestreador se coloca en el exterior de la capa de ropa más externa que utilice el trabajador.

- La exposición real, en el caso en el que el muestreador se coloque inmediatamente sobre la piel protegida por ropa.

- Tanto exposición potencial como real, si el muestreador se sitúa sobre la piel no protegida del trabajador.

Estos métodos asumen que el material de muestreo captura y retiene el contaminante de la misma manera que la piel, aunque en algunos casos pueda producirse una sobreestimación de la exposición real. Las propiedades físicas del material, como por ejemplo la porosidad y la capacidad de absorción, determinarán la capacidad de captura y retención del contaminante. La elección del material a utilizar deberá tener en cuenta la naturaleza del contaminante en cuestión. En general, cuando se evalúa la exposición a líquidos, el material debe ser lo suficientemente absorbente como para retener todos los líquidos que entren en contacto con él. El muestreo de partículas presenta sus propios problemas, pero la guía de la OCDE recomienda que se use un material suficientemente poroso como para retener todas las partículas con las que entre en contacto. Asimismo es indispensable que el material no contenga ninguna sustancia que pueda interferir en el análisis del contaminante, por lo que en algunos casos será necesaria una extracción previa para eliminar cualquier posible interferencia.

Los métodos sustitutivos de la piel son apropiados, en general, para evaluar los procesos de transporte de materia. Sin embargo son inapropiados para cuando se producen procesos de transporte de materia elevados desde la piel por evaporación, resuspensión, etc. Las estimaciones de la exposición serán tanto más satisfactorias mediante esta técnica cuanto mayor sea el nivel de exposición y menor el número de procesos de eliminación del contaminante.

Una consideración importante para el diseño de la estrategia de muestreo es que estos métodos pueden ser aplicados repetidas veces durante el turno de trabajo para monitorear las diferentes tareas desarrolladas por el trabajador.

Los principales métodos sustitutivos de la piel son el método de parches absorbentes, el de guantes absorbentes y el método del cuerpo completo o método de la ropa de trabajo.

Método de los parches

Sobre la ropa o piel del trabajador se colocan en lugares escogidos, un número determinado de parches que servirán para la determinación de la exposición a la sustancia química mediante su análisis.

El número de parches usado por trabajador varía según el protocolo que se emplee. El protocolo más utilizado, especialmente en estudios de exposición a plaguicidas, es el protocolo de la OCDE, que recomienda 13 parches.

Todos los protocolos existentes recomiendan la utilización de α - celulosa como material del parche. La guía de la OCDE sugiere la utilización de algodón o algodón/poliéster, como alternativa. También se contempla la posibilidad de utilización de carbón activo para la estimación de la exposición de compuestos volátiles.

Los parches se colocan generalmente sobre un material impermeable como papel de aluminio o polietileno para evitar que los contaminantes traspasen el parche. El tamaño más habitual de un parche es de 10x10cm².

Transcurrido el tiempo de exposición, se retiran los parches y se determina la cantidad de contaminante depositado sobre los mismos. Posteriormente se extrapola la cantidad medida a las zonas corporales representadas

por los diferentes parches, teniendo en cuenta las áreas de cada zona especificadas en el protocolo seguido. Existen varias propuestas en cuanto al área de las zonas corporales y los parches representativos de ellas. En la tabla 2 se muestran las áreas asignadas a las diferentes zonas corporales, según la guía de la OCDE.

Zona corporal	Área	Localización del parche
Cabeza	1300 (a)	Pecho, espalda, hombro (b)
Cara	650	Pecho
Nuca	110	Espalda
Cuello	150	Pecho
Pecho	3550	Pecho
Espalda	3550	Espalda
Brazos	2910	Brazo
Antebrazos	1210	Antebrazo
Manos	820	Mano (c)
Muslos	3820	Muslo
Piernas	2980	Espinilla
Pies	1310	Pie

(a) En el área de la cabeza están incluidos los 650 cm² de la cara.
 (b) La exposición de la cabeza puede estimarse usando un parche en la cabeza o con la medida de la espalda, pecho y hombros.
 (c) La exposición de las manos se estimará usando guantes absorbentes o el método del lavado de manos. En cualquier caso no es necesaria ninguna extrapolación.

Tabla 2: Áreas de las distintas zonas corporales de un adulto y localización de los parches para evaluar la exposición dérmica de éstas.

En el método de los parches se asume o bien que la exposición es uniforme, es decir, que la cantidad que se deposita sobre el parche es homogénea en todo el área por él representada, o que se ha seleccionado el peor de los casos, es decir, que el parche está localizado en el punto de mayor exposición potencial de la parte del cuerpo en cuestión. Por lo tanto, la extrapolación en algunos casos puede infraestimar, por ejemplo salpicaduras que no captadas por el parche, o sobreestimar (salpicaduras que caen directamente en el parche o rozaduras con superficies contaminadas). Por este motivo, el método de los parches no es aplicable para determinar la exposición en estudios de re-entrada. La localización, número y tamaño del parche son fundamentales para disminuir la variabilidad de los estudios, siendo la localización la fuente fundamental de variabilidad. En la mayoría de los estudios revisados en los que se compara la exposición potencial a partir del método de los parches y de la ropa de trabajo se concluye que el método de los parches infraestima la exposición sustancialmente.

Actualmente se prefiere utilizar el método del cuerpo completo o de la ropa de trabajo antes que el método de los parches absorbentes.

Método del cuerpo completo o de la ropa de trabajo

Mediante la utilización de este método desaparece la necesidad de asumir una exposición uniforme en la superficie corporal del trabajador como en el método de los parches, pero presenta la desventaja de conllevar un tratamiento de muestra más tedioso. La variación en la talla de los trabajadores suele ser una fuente de error en este método.

Los estudios más recientes que utilizan este método emplean un traje de algodón/poliéster para determinar la exposición potencial y pantalones y camiseta de manga larga por debajo del mismo, para determinar la exposición real. Tras el periodo de muestreo los trajes suelen ser seccionados en diferentes partes para facilitar su análisis y para poder determinar las partes del cuerpo más expuestas. (Figura 2).

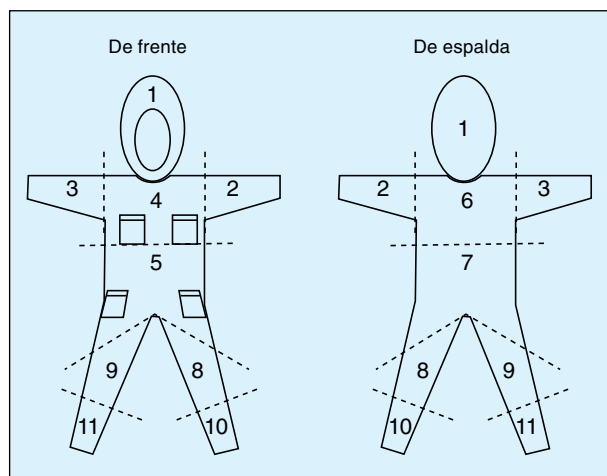


Figura 2. Localización usual de las secciones

Asimismo, mediante este método se puede estimar la exposición real y la eficacia de la ropa de protección en las condiciones reales de utilización. La ropa normal de trabajo también se puede usar para determinar la exposición real del trabajador, pudiéndose utilizar en este caso el control biológico para determinar la dosis absorbida, ya que no se añade una capa adicional de tejido que interfiera con el proceso normal de exposición del trabajador.

Método de los guantes absorbentes

Son guantes convencionales, generalmente de algodón, que el trabajador usa durante todo el período que dura la operación. Se pueden usar encima, debajo o en lugar de los guantes de protección del trabajador.

La principal limitación es que los guantes pueden absorber más plaguicida del que retendría la piel en las mismas circunstancias, por lo que es posible una sobreestimación de la exposición. Según diferentes estudios de comparación del método de los guantes absorbente frente al método del lavado de manos, que se verá a continuación, el método de los guantes absorbentes suele generar valores de exposición mayores que el del lavado de manos.

Entre las ventajas que presenta destacan las siguientes: posibilidad de ser cambiados rápidamente, capacidad de atrapar las sustancias tóxicas durante el período de exposición, y además son útiles en casos de residuos que son insolubles o degradados por el disolvente, casos

en los que es muy complicado el uso del método del lavado de manos.

Técnica de retirada del contaminante

El fundamento de esta técnica es la retirada del contaminante un vez depositado sobre la superficie de la piel y antes de que sea absorbido. El principal inconveniente de estos métodos es la infraestimación de la exposición debido a la absorción de parte del contaminante depositado en la piel. Conceptualmente estos métodos miden la cantidad recuperable de la piel más que la cantidad de contaminante depositada.

Se pueden distinguir tres métodos: lavado de manos, limpieza con disolvente y retirada del contaminante con cinta adhesiva.

La técnica de retirada del contaminante es en general inapropiada para la evaluación de la exposición dérmica cuando el contaminante puede ser rápidamente eliminado de la piel mediante una resuspensión o evaporación del mismo, por ejemplo, o rápidamente absorbido en la piel. Es igualmente inapropiada para elevados niveles de exposición. En la práctica, los periodos de muestreo deben ser tan pequeños como sea posible, salvo que exista alguna información adicional.

Con excepción del muestreo de las manos, se suelen utilizar plantillas para determinar de forma exacta la superficie corporal a muestrear.

La mayor limitación de esta técnica es que únicamente puede ser usada para determinar la exposición de determinadas partes del cuerpo. Otra limitación de este método es que solamente puede ser realizado un número limitado de veces al día ya que la función de barrera de la piel puede verse afectada.

Método del lavado de manos

En este método la fuerza externa empleada para retirar el contaminante de la capa externa de la piel es una acción mecánica, un arrastre hidrodinámico o una acción química (disolución).

Se distinguen dos procedimientos de lavado de manos. La *limpieza con disolvente* consiste en lavar las manos como se hace habitualmente, mediante movimientos de ambas manos con un líquido. La retirada del contaminante se realiza por acción mecánica y por acción química (disolución). El *aclarado* consiste en introducir las manos en unas bolsas que contienen un disolvente adecuado y después agitarlas vigorosamente. La retirada del contaminante se realiza por un arrastre hidrodinámico y por acción química (disolución).

La distinción fundamental entre estos dos procedimientos es la presencia o ausencia de fuerzas mecánicas.

Durante el procedimiento de *limpieza con disolvente* los trabajadores deben lavarse las manos de manera similar a como se realiza habitualmente o de acuerdo con el procedimiento de 6 pasos descrito en la norma EN 1499:1997 - *Desinfectantes químicos y antisépticos – Lavado higiénico de las manos – Método de ensayo y requisitos*.

Durante el procedimiento de *aclarado*, una mano se sumerge en el líquido de lavado en el interior de una bolsa, que está sujeta alrededor de la muñeca del trabajador para evitar derrames. La mano se agita vigorosamente durante un tiempo concreto, un número fijo de agitaciones o un número establecido de agitaciones durante un tiempo determinado.

Los líquidos de lavado pueden ser agua destilada o

desionizada, en combinación con algún surfactante comercial, jabones líquidos comerciales o disolventes orgánicos. Adicionalmente suele usarse detergentes para facilitar la retirada de partículas insolubles.

La eficacia de la recuperación del contaminante de la piel dependerá de múltiples factores entre los que destacan el tipo de líquido usado, si éste es vertido durante el proceso o se encuentra retenido en un recipiente, el tiempo de permanencia del contaminante en la piel, la cantidad de contaminante a recuperar de la piel, el proceso de contaminación y el estado físico-químico del contaminante en la piel, el número de lavados consecutivos realizados, la duración del proceso del lavado de manos, la cantidad de surfactante, jabón o disolvente utilizado, la dureza del agua y la temperatura del líquido empleado, etc.

Debido a todas estas variables que pueden afectar a la eficacia del método (la eficacia del muestreo puede variar de 23 % a 96 %, según un estudio que recopila estudios de eficacia del lavado de manos), se debe realizar previamente a la toma de muestra un ensayo de eficacia, aunque no exista hasta el momento un procedimiento estandarizado para realizarlo.

La guía de la OCDE recomienda la realización del lavado de manos cuando los trabajadores se laven habitualmente las manos durante el turno de trabajo. Sin embargo, cuando el objetivo es monitorear una tarea determinada el periodo de muestreo debe ser la duración de la tarea o un tiempo determinado durante la realización de la misma.

Tanto la guía de la OCDE como el protocolo de la US EPA recomiendan el lavado previo de las manos con algún disolvente para evitar la presencia de contaminantes de fondo.

Método de la limpieza con disolvente

Este método consiste en la retirada del contaminante de la piel mediante el arrastre por fricción con un medio de toma de muestra humedecido con algún líquido. De manera similar al lavado de manos, el contaminante se recupera de la piel mediante la combinación de una acción mecánica y química (disolución).

El medio de muestreo usualmente utilizado para la limpieza con disolvente son tejidos de algodón, aunque también está descrita la utilización de materiales de celulosa para la toma de muestra de PCBs (policlorobifenilos) de las manos de los trabajadores. El líquido con el que se humedece el material de muestreo suele ser agua desionizada o alcoholes como el etanol o isopropanol.

En este método, al contrario del método del lavado de manos que puede aplicarse usando un método estandarizado (EN 1499:1997), la eficacia de la limpieza con disolvente depende de la habilidad del técnico que toma la muestra. Se recomienda limitar el número de operarios debido a la elevada dependencia del método con el procedimiento seguido. En diferentes estudios se demuestra que este método tiende a infraestimar la exposición de los trabajadores. La eficacia del muestreo varía entre 36 a 104 (mediana 51 %) según una recopilación de estudios de eficacia de la limpieza con disolvente. La eficacia de la limpieza depende igualmente del número de pases con el medio de muestreo que se realicen sobre la superficie de piel a muestrear y de la relación entre la superficie a muestrear y la superficie del muestreador. Se ha propuesto el uso de un ratio de 1:5 entre la superficie del muestreador y de la piel. Hay que tener en cuenta que como en el caso del lavado de

manos, la aplicación consecutiva del método afecta a la recuperación del contaminante.

Al igual que el lavado de manos y debido a las múltiples variables que pueden influir en este método, se recomienda realizar un estudio de la eficacia previo al muestreo. Este estudio de eficacia debe ser diseñado para imitar las condiciones de exposición, el tiempo de permanencia del contaminante en la piel y el nivel de exposición.

Método de la retirada del contaminante con cinta adhesiva

La exposición real a un contaminante puede ser estimada midiendo la cantidad del mismo, retirado de la piel con una cinta adhesiva. Para aumentar la eficacia del procedimiento éste se suele repetir un número determinado de veces de forma consecutiva. El método se aplica tanto para materia particulada como para compuestos viscosos que permanecen en la piel un periodo de tiempo significativo. Es un método no invasivo y lo que lo diferencia fundamentalmente de los otros dos métodos de retirada de contaminante es que se puede recuperar de la capa más superficial del estrato córneo, no solo residuos de la superficie de la piel.

El procedimiento de muestreo es el siguiente:

- Colocación de la pieza de cinta adhesiva en una superficie de la piel determinada, presionando a continuación la zona, evitando cualquier contaminación.
- Mantenimiento de la cinta adhesiva durante un periodo de tiempo determinado previamente, aunque se suele limitar a 2 minutos.
- Retirada de la cinta a una velocidad constante y con un ángulo de 45° con respecto a la piel, evitando cualquier contaminación.
- Introducción de la muestra en un recipiente correctamente etiquetado.
- Repetición de los pasos 1 a 4 un número de veces determinado según las estrategia de muestreo seguida. De 1 a 3 veces suele ser lo habitual.
- Adición de una determinada cantidad de disolvente al recipiente que contiene la(s) muestra(s). Transporte al laboratorio y posterior análisis.

Los adhesivos utilizados son sustancias orgánicas de elevado peso molecular. La eficacia de la recuperación del contaminante depende de las propiedades del muestreador, de las propiedades del contaminante de la superficie de piel contaminada y de las propiedades de la piel.

La mayor limitación es su elevada dependencia de la habilidad del técnico que toma la muestra, al igual que el método de la limpieza con disolvente.

Técnica de recuperación in situ

La exposición dérmica puede ser estimada midiendo la cantidad de contaminante o de un trazador químico fluorescente o colorante, directamente sobre la ropa o sobre la piel del trabajador. La principal ventaja de este método es la detección "in situ" del contaminante utilizando como medio de muestreo la propia piel o la ropa del trabajador, en vez de parches u otros medios diferentes.

Se pueden utilizar cuatro métodos: detección por video imagen del propio contaminante o un trazador, detección por espectroscopia de infrarrojos con transformada de Fourier con sistema de reflexión total atenuada (ATR-FTIR) del propio contaminante o un trazador, detección del propio contaminante o un trazador empleando de una sonda luminosa y el método de detección por espectroscopia de fluorescencia de rayos X (XRF).

El primer método puede usarse en amplias zonas corporales mientras que los otros tres solamente se aplican a pequeñas zonas.

Si el contaminante en cuestión no puede determinarse directamente con los métodos anteriores, puede incorporarse una cantidad conocida de trazador fluorescente, colorante o que absorba en la zona del infrarrojo en el producto. Estos trazadores deben tener un comportamiento similar al contaminante en cuestión (como puede ser su retención/penetración en la ropa de trabajo) sin alterar las propiedades físicas del producto, por lo que se deben realizar estudios previos que lo demuestren. Ésta es una de las mayores limitaciones de este tipo de métodos. Otras desventajas pueden ser la respuesta no lineal a elevados niveles de exposición, la descomposición del colorante o del trazador con la luz solar o con el tiempo, su absorción en la ropa, etc.

Como consideraciones para la estrategia de muestreo hay que destacar que la técnica de recuperación in situ es muy apropiada cuando el contaminante se absorba rápidamente en la piel ya que el uso del trazador puede ser la mejor opción. Además puede aplicarse de manera conjunta con el control biológico. Otra consideración que hay que tener en cuenta en el diseño de la estrategia de muestreo es que estos métodos pueden aplicarse en repetidas ocasiones a lo largo de la jornada, pudiendo observarse la evolución y la contribución a la exposición global de cada una de las tareas desarrolladas durante el turno de trabajo.

Método de detección por video imagen

Tras la realización de las tareas oportunas utilizando el producto con el contaminante en cuestión o con el trazador, el trabajador se sitúa en un haz de luz ultravioleta o visible. Las áreas expuestas se fotografían mediante una videocámara que graba la luz emitida (natural o fluorescente). La exposición dérmica se calcula en función de la intensidad de cada píxel de la imagen, según la curva de calibración establecida.

Este método también puede ser aplicable para determinar la eficacia de los trajes de protección y puede servir como una herramienta demostrativa en la formación y entrenamiento de los trabajadores. Las principales ventajas de este método son la capacidad de determinar de forma exacta las áreas expuestas y la posibilidad de recoger gran cantidad de muestras de forma sencilla.

Se han realizado dos estudios comparando este método con el método del cuerpo completo y del lavado de manos. Se observó una variación importante entre los resultados de la aplicación del método de los trazadores fluorescentes y el método y el análisis de la ropa de trabajo, mientras que la correlación fue buena cuando se comparó con el método del lavado de manos. Sin embargo en ambos estudios se reconocía que la exactitud del método de los trazadores fluorescentes no es tan buena como los métodos de análisis químicos cuando los niveles de exposición son bajos.

Método de detección por espectroscopia de infrarrojos con transformada de Fourier con sistema de reflexión total atenuada (ATR-FTIR)

La espectroscopia ATR-FTIR usada para el análisis superficial de la densidad óptica de materiales como lubricantes y productos alimenticios, también puede ser utilizada para la identificación de contaminantes.

El elemento clave en este método es un cristal trans-

parente al infrarrojo con un índice de refracción uniforme. El principio de esta medida se basa en el fenómeno de la reflexión total interna y la transmisión de la luz a través de un cristal con elevado índice de refracción. La radiación penetra (unos μm) más allá de la superficie del cristal donde se produce la reflexión total, en forma de onda evanescente. Si en el lado exterior del cristal se coloca un material absorbente (muestra), la luz que viaja a través del cristal se verá atenuada (de ahí el nombre de esta técnica) y se puede registrar el espectro de la muestra.

Este método sólo puede ser aplicado a pequeñas áreas de cómo máximo 2 cm^2 .

Método de detección empleando de una sonda luminosa

Se ha desarrollado un detector de luminiscencia móvil para la medición de los contaminantes en la piel. El diseño del instrumento se basa en una sonda de fibra óptica que transmite la luz de excitación ultravioleta hasta la superficie de la piel midiendo la fluorescencia inducida por detección de fotones.

Este método sólo puede ser aplicado en pequeñas áreas de piel (1cm^2) y para el muestreo de superficies, aunque actualmente se está comercializando otro dispositivo con mayor capacidad de análisis de superficies.

Método de detección por espectroscopia de fluorescencia de rayos X (XRF)

Mediante el empleo de un espectrofotómetro portátil de rayos X (PXRF) también se puede determinar la exposición dérmica del cuerpo de los trabajadores. El PXRF usado en un estudio de exposición emplea los rayos γ de tres fuentes radioactivas diferentes para excitar el metal depositado en la superficie de los trajes de protección. En este estudio se determinó la cantidad de producto depositado en 104 muestras distribuidas por el traje de protección y se compararon los resultados con los obtenidos mediante el método de los parches y del cuerpo completo. Los resultados muestran una mayor exactitud del método del cuerpo completo frente al método de los parches. La utilización de este método de detección frente al método del cuerpo completo tiene como principales ventajas la rapidez de análisis y la mayor resolución espacial de la exposición.

Técnica de muestreo de superficies

Esta técnica permite recoger el contaminante depositado en una superficie de trabajo de área conocida y estimar cuál podría ser su contribución a la exposición dérmica si se produjera un contacto físico con ella. Los métodos utilizados pueden ser la limpieza con disolvente de una superficie, el método de la cinta adhesiva, el aspirado del contaminante de una superficie determinada, o la extracción líquida del contaminante depositado sobre una superficie, como puede ser el residuo de plaguicida en una hoja.

En la mayoría de los casos no se pretende recuperar el 100 % del residuo presente en la superficie, sino el residuo que depositado sobre la superficie con capacidad de transferirse a la piel del trabajador.

Una aplicación de este método es la determinación del residuo foliar desprendible (DFR) empleada en la evaluación del riesgo por exposición durante la entrada a los cultivos previamente tratados con productos fitosanitarios. Se ha demostrado que el valor del DFR, medido por extracción con un surfactante determinado y siguiendo un

procedimiento establecido, es directamente proporcional con la exposición dérmica de los trabajadores, siendo el coeficiente de proporcionalidad, un valor dependiente de la actividad desarrollada por el trabajador.

4. ESTRATEGIA DE MUESTREO DE LA EXPOSICIÓN DÉRMICA

Las estrategias para la evaluación de la exposición por vía dérmica de contaminantes no han sido desarrolladas tan ampliamente como en el caso de la exposición inhalatoria, como por ejemplo en la norma UNE-EN 689:1996, sobre atmósferas en el lugar de trabajo. Sin embargo, sí que se han descrito una serie de recomendaciones en protocolos (WHO, EPA), guías (OCDE) y en el Informe Técnico CEN/TR 15278:2005 sobre la elección de los métodos de muestreo más apropiados, duración del muestreo, variación temporal y espacial de la exposición dérmica, la evaluación de la eficacia de la ropa de protección, etc.

Existe asimismo un método para estimar la exposición dérmica sin efectuar ninguna medición que es el método DREAM (Dermal Exposure Assessment Method). Este método también se puede utilizar para definir la estrategia de muestreo a seguir para medir la exposición de los trabajadores, ya que mediante el mismo se pueden determinar los procesos de transporte de materia más importantes, las partes del cuerpo que pueden resultar más expuestas, los grupos de trabajadores y las tareas con mayor exposición potencial, etc. El método DREAM se describirá con mayor detalle en la NTP 896 "*Metodología simplificada para la determinación de la exposición dérmica a sustancias químicas*", en la que se analizarán las metodologías simplificadas para la determinación de la exposición dérmica a sustancias químicas.

Todos los métodos de medida directa de la exposición dérmica, anteriormente descritos, tienen ventajas y desventajas que han de tenerse en cuenta en la planificación de la toma de muestra. Por ejemplo, cuando se pretende evaluar la exposición dérmica de un trabajador por contacto con una superficie o equipo de trabajo contaminado, únicamente habría que evaluar la exposición de las manos, siempre y cuando esta asunción haya sido demostrada con, por ejemplo, el método de detección por video imagen.

El Informe Técnico CEN/TR 15278:2005 utiliza el modelo conceptual descrito anteriormente como punto de partida para el diseño de la estrategia de muestreo. El método de muestreo se debe seleccionar en función de la importancia relativa de unos procesos de transporte de materia frente a otros, lo que influirá igualmente en la selección de la duración del periodo de muestreo. Los procesos de transporte de materia que hay que tener en cuenta son por un lado la absorción del contaminante en la piel y el paso del contaminante a otros compartimentos por los procesos de eliminación, descontaminación y resuspensión o evaporación.

En el caso de que el índice de transporte en ambos procesos de transferencia de materia sea bajo, es posible la utilización las técnicas de retirada de contaminante o de recuperación "in situ". Si el paso del contaminante a otros compartimentos es bajo, pero la absorción del contaminante por la piel es importante, la técnica de sustitutiva de la piel o la técnica de recuperación "in situ" dará una buena medición de la exposición dérmica. En el caso contrario, la técnica de sustitutiva de la piel tenderá a sobreestimar la exposición ya que las propiedades de

captación del material sustitutivo de la piel son mejores que las de la propia piel y la tasa de evaporación, eliminación y descontaminación es alta. En éste y en el caso de que ambos procesos de transferencia de materia sean elevados, es preferible la utilización del control biológico, siempre que sea posible. En la tabla 3 se exponen estas consideraciones de forma esquemática.

La técnica de muestreo de superficies se puede usar de forma similar a las mediciones estáticas (instrumentos instalados en un determinado lugar) en la planificación de la estrategia de muestreo ambiental dada por la norma UNE-EN 689:1996, es decir, para determinar niveles aproximados y tendencias, para confirmar hipótesis mediante datos aproximados o midiendo en condiciones extremas.

Las mediciones pueden hacerse seleccionando el peor caso razonable, midiendo la exposición de todas las tareas de forma individual, combinando todos los resultados ponderados con la duración de cada tarea, o bien de for-

ma aleatoria recogiendo la información necesaria de las tareas, procesos, actitud o comportamiento de los trabajadores y tratando los datos obtenidos estadísticamente.

Con respecto al número de muestras, la guía de la OCDE recomienda un número mínimo de 10 muestras tomadas sobre diferentes trabajadores. Los trabajadores seleccionados para la realización del estudio deberán ser aquellos que habitualmente realicen las tareas que se pretenden estudiar y se les informará del objetivo del estudio y de la necesidad de que desarrollen su trabajo de manera habitual. Asimismo se ha sugerido por diversos autores que los trabajadores se seleccionen de entre grupos de trabajadores con exposición similar mediante muestreo aleatorio estratificado, de manera similar a como se realiza en la norma UNE-EN 689:1996 para la evaluación de la exposición por inhalación. La duración del muestreo debe ser representativa de una jornada laboral, evitando saturación y teniendo en cuenta propiedades físico-químicas del producto.

Tasa de eliminación, descontaminación y resuspensión o evaporación	Tasa de absorción	
	Alta	Baja
Alta	Control biológico	Control biológico
Baja	Técnicas sustitutivas de la piel o de recuperación in situ	Técnicas de retirada del contaminante o de recuperación in situ

Tabla 3. Selección de la técnica de muestreo en función de los procesos de transporte de materia.

BIBLIOGRAFÍA

- (1) CEN/TR 15278:2005
Workplace exposure-Strategy for the evaluation of dermal exposure.
- (2) CEN/TS 15279:2005
Workplace exposure- Measurement of dermal exposure- Principles and methods.
- (3) LUNDGREN, L., SKARE, L. AND LIDE'N, C.
Measuring Dust on Skin with a Small Vacuuming Sampler—A Comparison with Other Sampling Techniques.
Annals of Occupational Hygiene, 50(1):95-103, 2006.
- (4) OCDE
Guidance Document for the Conduct of Studies of Occupational Exposure to Pesticides During Agricultural Application.
OECD Series on Testing and Assessment, No 9 OECD/GD(97)/ 148, Paris, 1997.
- (5) SCHNEIDER, T., VERMEULEN, R., BROUWER, D., CHERRIE, J.W., KROMHOUT, H. AND FOUGH, C.L. (1999)
Conceptual model for the assessment of dermal exposure.
Occupational and Environmental Medicine, 56,765-73.
- (6) UNE-EN 689:1996
Directrices para la evaluación de la exposición por inhalación a agentes químicos para la comparación con los valores límite y estrategia de muestreo.
- (7) US EPA (1987)
Pesticide Assessment Guidelines; Subdivision U. Applicator exposure monitoring.
US Environmental Protection Agency, Washington DC, USA.
- (8) Van-Wendel-De-Joode, B.; Brouwer D.H.; Vermeulen R.
DREAM: A method for Semi-quantitative Dermal Exposure Assessment
Annals of Occupational Hygiene, 47:71-87, 2003.
- (9) WORD HEALTH ORGANIZATION (1982)
Field surveys of exposure to pesticidas; Standard protocol.
VBC/82.1. WHO. Geneva, Switzerland.