



TÉCNICAS PARA LA DISPOSICIÓN Y TRATAMIENTO DE RESIDUOS DE MEDICAMENTOS DOMICILIARIOS

Juana Angélica Felipe Fernandes (*), Danilo Carvajal, Adriana Mera, Alejandra Gallegos Alcaíno, Héctor Maureira Cortés

* Universidad de La Serena, juana.angelica@userena.cl

RESUMEN

La expansión del mercado farmacéutico, el aumento poblacional y la prevalencia de enfermedades crónicas ha generado cuestionamientos sobre el consumo de medicamentos y su tratamiento cuando se convierten en residuos en los hogares. El tratamiento de estos residuos sólidos (RS) toma relevancia debido a que la obligatoriedad de su recolección ha crecido a lo largo de años en la política de diversos países. Por eso, el objetivo de este estudio es identificar la diversidad de tratamientos de residuos de medicamentos domiciliarios (RMD), con enfoque tanto en técnicas tradicionales como innovadoras, con el propósito de destacar las alternativas de tratamientos de RMD más sustentables. Para esto, la metodología adoptada tiene finalidad descriptiva y enfoque cualitativo, basándose en informaciones secundarias. Entre los tratamientos convencionales se destacan los del tipo térmico (coprocesamiento o incineración), mientras opciones menos sostenibles como los procesos fisicoquímicos destinados a inmovilización (encapsulación o inertización) son generalmente adoptadas en casos donde no se dispone de tratamientos térmicos. Las técnicas sustentables con destaque en la literatura son el compostaje y el reciclaje de blísteres para producción de electrodos, sin embargo, siguen a nivel experimental. Así, es sustancial que los sistemas de recolección registren y clasifiquen correctamente los RMD recibidos para favorecer la elección del más adecuado sistema de tratamiento y disposición final, considerando la factibilidad técnico-económica, tiempo y espacio requerido para ejecución y aspectos de sostenibilidad.

PALABRAS CLAVE: Fármacos domiciliarios, Tratamiento de medicamentos, Residuos de medicamento.

ABSTRACT

The expansion of the pharmaceutical market, population growth and the prevalence of chronic diseases have raised questions about the consumption of medicines and their treatment when they become waste in households. The treatment of this waste has become relevant due to the fact that the obligation to collect it has grown over the years in the policies of several countries. Therefore, the objective of this study is to identify the diversity of household medicine waste (HMW) treatment, focusing on both traditional and innovative techniques, with the purpose of highlighting the most sustainable HMW treatment alternatives. For this purpose, the methodology adopted is descriptive and qualitative, based on secondary information. Among the conventional treatments, those of the thermal type (co-processing or incineration) stand out, while less sustainable options such as physicochemical processes aimed at immobilization (encapsulation or inertization) are generally adopted in cases where thermal treatments are not available. The sustainable techniques highlighted in the literature are composting and blister recycling for electrode production, however, they are still at an experimental level. Thus, it is essential that the collection systems correctly record and classify the RMD received to favor the choice of the most appropriate treatment and final disposal system, considering the technical and economic feasibility, time and space required for implementation and sustainability aspects.

KEYWORDS: Household pharmaceuticals, Drug treatment, Drug waste.

ATENÇÃO: A área que está sombreada (em amarelo) é a que poderá ser livremente editada pelo autor do trabalho. Isto é para proteger o cabeçalho e o rodapé de eventuais desformatações. Posteriormente, a Comissão Organizadora retirará este sombreado e transformará o texto em arquivo PDF.



INTRODUCCIÓN

El mercado farmacéutico ha experimentado crecimiento significativo durante décadas, donde la Organización para la Cooperación y Desarrollo Económico (OECD, 2019) destaca el notable aumento de 70 a 200% en el consumo de medicamentos en sus países miembros entre 2000 y 2017, como los antihipertensivos, agentes reductores del colesterol, antidiabéticos y antidepresivos. Esto puede relacionarse con el aumento poblacional, creciente prevalencia de diabetes y/u obesidad, mejor reconocimiento de enfermedades como la depresión, acceso/disponibilidad de terapias, evolución de pautas clínicas, motivo por el cual se espera un continuo aumento en el consumo de medicamentos, principalmente los de venta libre, antihipertensivos, reductores del colesterol, antidiabéticos y antidepresivos (OECD, 2019).

El mejor acceso a los medicamentos puede tener relación con el aumento de la cantidad de residuos de fármacos y su disposición inadecuada, puesto que los desechos de fármacos domésticos generalmente se desechan junto a la basura domiciliaria o a los inodoros. En Perú, Vargas y Rodríguez (2019) observaron que más de la mitad de los 672 encuestados de las localidades de San Borja y Puente Piedra botan los medicamentos a la basura. En Polonia, país europeo que cuenta con puntos de recolección de RMD en sus farmacias, Rogowska et al. (2019) registraron un 49% de los 1085 encuestados – entre estudiantes y clientes de farmacias – que normalmente depositan los RMD junto a la basura doméstica o inodoro. En Australia, donde han implementado el Proyecto Nacional de Devolución y Eliminación de Medicamentos no Deseados (RUM), Bettington et al. (2017) exponen que cerca de 65% de los 4.302 encuestados desechaban los medicamentos en la basura doméstica y 25% por el desagüe. La quema de los RMD no aparece en muchos estudios, pero Sanabria-Pérez et al. (2019) registraron este tipo de manejo de RMD durante entrevista a 336 hogares de Tuxpan, México.

Los medicamentos no utilizados o caducados desechados en la basura doméstica y/o inodoro puede generar impactos negativos en el suelo y cuerpos hídricos. Borrely et al. (2012) explican que la baja volatilidad de los compuestos farmacológicos indica que su distribución se produce a través del transporte en ambiente acuático y en la cadena alimentaria, lo que se detectó en cuerpos de agua y en estudios con animales con interferencia en la acción hormonal, además de aumento de vulnerabilidad a los cánceres sensibles a las hormonas, como tumores de mama, próstata, ovarios y útero. Estudios han evidenciado la contaminación de aguas dulces por medicamentos de uso humano como ansiolíticos, estrógenos y antibióticos, lo que puede generar impactos adversos al ecosistema, como la feminización de peces machos y la resistencia de organismos a antibióticos (KIRYLLOS, 2011; BORRELY et al., 2012).

La Organización Mundial de Salud (WHO, por sus siglas en inglés) define los desechos farmacéuticos como medicamentos expirados o sin uso, que debido a su naturaleza química necesitan eliminación cuidadosa (CHARTIER et al, 2014), categoría que incluye artículos contaminados con productos farmacéuticos, como botellas, frascos y guantes. En ese sentido, la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés), en la Acta de Recuperación y Conservación de Recursos (RCRA, por sus siglas en inglés) indica las regulaciones referentes a la identificación de desechos y el proceso a seguir, en caso de que el residuo sea considerado peligroso (SMITH, 2002). Dicho organismo elaboró listas de clasificación de sustancias no utilizables designadas como P, F, K y U, además de las características de toxicidad, reactividad, corrosividad o inflamabilidad, factores que definen los compuestos potencialmente dañinos. Las listas P y U se refieren a los medicamentos, donde la P incluye sustancias que ocasionan toxicidad aguda, como la fisostigmina, warfarina (concentración mayor a 0,3%), nitroglicerina y epinefrina, codificadas como P204, P001, P081 y P042, respectivamente. Por otro lado, la lista U incluyen químicos tóxicos, pero que además presentan otras características de ignición o reactividad como la ciclofosfámid, mitomicina C y reserpina, identificados como U058, U010 y U200, respectivamente. Estos residuos deben contar con un procedimiento especial de disposición final. Éstas corresponden a formulaciones comerciales de químicos que no fueron administrados a un paciente y se consideran sustancias peligrosas (EPA, 2012). Los demás desechos medicamentosos que no aparezcan en tales listas y no exhiban tales características deben ser desechados de acuerdo a las regulaciones estatales y/o locales, según lo establece EPA.

Sumado al anterior, Álvarez y Martínez (2011) destacan que algunos residuos farmacéuticos tienen manejo especial, como los aerosoles, medicamentos antiinfecciosos, sustancias controladas (narcóticos, psicotrópicos y estupefacientes) y antineoplásicos (también conocidos como citotóxicos y anticancerígenos), los cuales deben ser incinerados, considerando el riesgo que ofrecen a la salud humana y al medio ambiente. Estos autores enfatizan que los citotóxicos pueden afectar a quien lo manipula, al enfermo y al ecosistema, debido a que han demostrado propiedades mutagénicas, carcinogénicas, teratogénicas y embriotóxicas; los antibióticos son tóxicos y pueden causar alergias, disbiosis (eliminación de bacterias de presencia deseable en el organismo), sobrecrecimientos (eliminar alguna bacteria pero permitir el crecimiento de otras o de hongos), resistencias (las bacterias pueden hacerse resistentes a los antibióticos), toxicidad (pueden provocar daños renales, hepáticos y al sistema nervioso), por eso deben considerar tratamientos de inactivación para reducir su toxicidad (HERNÁNDEZ et al., 1995).



A la luz del anterior, los sistemas de recolección para tratamiento de RMD han crecido a lo largo de años, resultado de su obligatoriedad en la política ambiental de diversos países. Ejemplo del anterior es la Responsabilidad Extendida al Productor (REP), que surgió a finales de 1980 como forma de trasladar la administración de ciertos residuos de municipios y contribuyentes a los productores. Actualmente, la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OECD, 2016) define la REP como “un enfoque de política ambiental en el que la responsabilidad del productor por un producto se extiende a la etapa pos consumo del ciclo de vida de un producto” que busca reducir la eliminación de desecho y aumentar las tasas de reciclaje de residuos. Así, la REP va más allá de las ventas y la distribución de productos, y en el caso de los RMD, ya tiene aplicación en parte de América (Canadá, Colombia) y países europeos (Austria, Bélgica, Eslovenia, España, Francia, Portugal y Suecia) (MCKERLIE et al., 2008; KAFFINE y O'REILLY, 2015).

Los sistemas de recolección generalmente atienden a un Plan de Manejo de Residuos que debiera tener como objetivo minimizar la generación y maximizar la valorización y aprovechamiento de residuos. Para esto, es importante reducir la cantidad, volumen y/o peligrosidad de residuos que van a disposición final. Sin embargo, medidas preventivas no siempre son eficientes para eliminación de RMD.

OBJETIVO

El objetivo de este estudio es identificar la diversidad tratamientos de residuos de medicamentos, con enfoque tanto en técnicas tradicionales como innovadoras, en el intuito de destacar alternativas de tratamientos de RMD asequibles y sostenibles.

METODOLOGÍA

Este estudio tiene enfoque descriptivo y se estructura en información secundaria obtenida en fuentes bibliográficas del área de ciencias ambientales y naturales disponibles principalmente en las bases de datos ScienceDirect y Web of Science. La elección bibliográfica mantuvo prioridad en trabajos publicados desde el 2015, con búsqueda a través de los siguientes descriptores: “residuos de medicamentos”, “*pharmaceuticals waste*”, “*medicine waste*”, “*pharmaceuticals waste treatment*”. El tratamiento de la información obtenida tiene enfoque cualitativo que combina datos de la bibliografía teórica y empírica, además de incorporar definiciones de conceptos, examen de teóricos y análisis de los problemas metodológicos de un tema determinado, lo que genera un panorama comparativo de las principales características de diferentes tratamientos aplicados a los RMD.

RESULTADOS

Cuando los medicamentos están caducados, contaminados o no utilizables, se requiere un tratamiento y disposición acorde con las características de cada medicamento. Así, caracterizar su **generación** [unidades, volumen y peso, considerando la densidad aproximada de 0.2 toneladas/m³, según OMS (1999)], **clase terapéutica** (antibióticos, antineoplásicos, hormonas, etc.) y **forma farmacéutica** (sólido, semisólido, polvo, líquido, ampollita y aerosol) es un paso fundamental para elegir una alternativa de tratamiento segura, simples, de costo accesible y adecuada a cada situación específica para contribuir a la salud pública y protección del medio ambiente.

Los tratamientos aplicados a residuos de medicamento están orientados a su reutilización, reciclaje, aprovechamiento, recuperación de energía o confinamiento (HERNÁNDEZ et al., 1995). Por eso, es importante recordar que para todos los medicamentos residuales es necesario separar los empaques primarios (envase en contacto con el medicamento) de los secundarios (embalaje exterior que no tiene contacto directo con los fármacos), debiendo este último seguir para destino de RS no peligroso: pueden ser reciclados o, en último caso, dispuestos como un residuo común en relleno sanitario, teniendo la precaución de fragmentarlos antes de disponerlos.

Además, productos farmacéuticos clasificados como materiales orgánicos altamente biodegradables pueden disponerse en rellenos sanitarios (si son sólidos o semisólidos) o desecharse en el alcantarillado (para formulaciones líquidas) (CHARTIER et al., 2014). Ejemplo del anterior son ciertas sales, aminoácidos, lípidos, sueros, lubricantes oculares, vitaminas y glucosa, que **no requieren tratamiento** y pueden desecharse por el sistema de aguas servidas pues sirve como sustrato para la acción microbiana y sufren rápida degradación bajo condiciones ambientales normales (HERNÁNDEZ et al., 1995; FERNÁNDEZ y TORRES, 2001). Sin embargo, se destaca que la dilución del residuo de medicamento no es un tipo de tratamiento, y según Chartier et al. (2014), cuando aplicada a grandes cantidades de medicamentos, este tipo de manejo puede requerir autorización de entidades competentes.



Otro componente que merece atención son los medicamentos desinfectantes, que según Chartier et al. (2014) y Fernández y Torres (2001), no tienen una fecha de caducidad, pueden ser almacenados y usados gradualmente. Estos autores explican que, en general, no hay una verdadera necesidad de deshacerse de ellos, y aunque esto sea necesario, pueden ser utilizados como limpiadores de superficies en sanitarios y así darles algún uso antes que disponerlos.

Los demás medicamentos residuales deben ser separados de dos formas: **a) primeramente, según el principio activo** - aquellos caracterizados como antiinfecciosos (antibióticos, antifúngicos, antirretrovirales y antiparasitarios), antineoplásicos (citotóxicos, también llamados anticancerígenos), hormonas, antisépticos/ desinfectantes y sustancias controladas (incluyendo narcóticos, psicotrópicos y estupefacientes); **y b) luego, según su forma farmacéutica** - los demás medicamentos de bajo riesgo (aquellos con principios activos diferentes de los grupos anteriores), divididos en cuatro categorías (1. Sólidos, semisólidos y polvos: tabletas, cápsulas, grageas, polvos para inyección o para preparar suspensiones, cremas, geles, óvulos, supositorios etc.; 2. Líquidos: Soluciones suspensiones jarabes, gotas, etc.; 3. Ampolletas; 4. Aerosoles) (Figura 1) (FERNÁNDEZ y TORRES, 2001; CHARTIER et al., 2014; CARVAJAL y MORA, 2016).

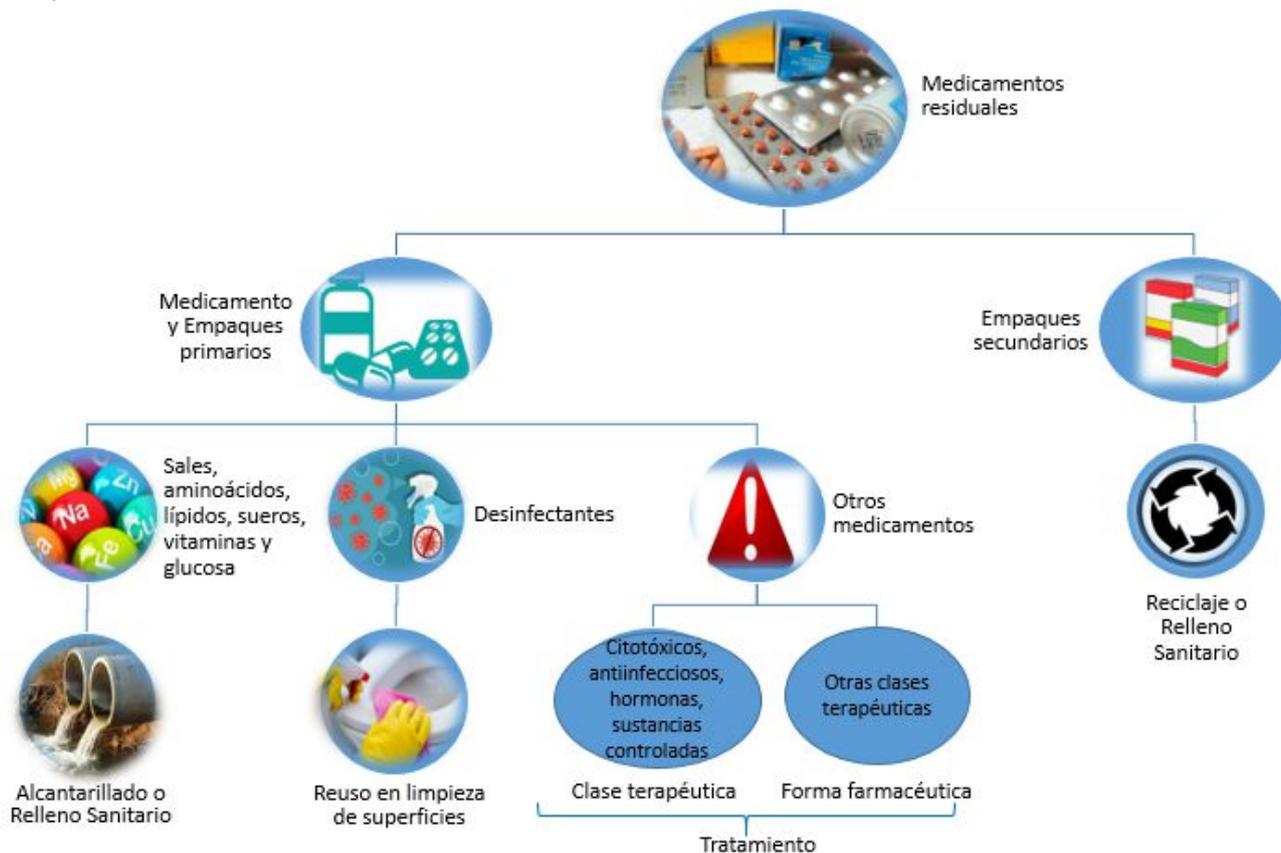


Figura 1. Proceso de clasificación de residuos de medicamentos según el tipo de manejo. Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente, las categorías que no pueden ser recicladas, reutilizadas o destinadas directamente a relleno sanitario y sistema de alcantarillado deben ser encaminadas al tratamiento más adecuado, siendo las técnicas tradicionales más comunes el: a) procedimiento térmico – que objetiva la oxidación térmica del compuesto por medio de autoclavado, coprocesamiento o incineración; y b) proceso fisicoquímico – para estabilizar o inactivar el compuesto a través de descomposición química, encapsulación o inertización (Tabla 1).



Tabla 1. Posibles tratamientos de RMD según principio activo o forma farmacéutica. Fuente: Elaborado a partir de Fernández y Torres (2001), Álvarez y Martínez (2011), Chartier et al., (2014), Carvajal y Mora (2016).

Tratamiento	Característica del residuo de medicamento
Descomposición química	Antineoplásicos y antiinfectantes.
Autoclavado	Medicamentos de origen biológico y compuestos químicos que se pueden desactivar mediante calor.
Encapsulación	Desechos sólidos, semisólidos, polvos, líquidos, antineoplásicos, aerosoles, ampollas de vidrio, productos inflamables, antiinfecciosos, sustancias controladas (incluyendo narcóticos, psicotrópicos y estupefacientes)
Inertización	Desechos sólidos, semisólidos, polvos, antineoplásicos, sustancias controladas y antiinfecciosos.
Coprocesamiento	Desechos sólidos, semisólidos, polvos, sustancias controladas, antiinfecciosos y desinfectantes.
Incineración a altas temperaturas	Desechos sólidos, semisólidos, polvos, líquidos, antineoplásicos, sustancias controladas, antibióticos, desinfectantes. Excepto ampollas de vidrio y aerosoles.

Hernández et al. (1995) explican que, para las formas farmacéuticas líquidas o sólidos en solución, se adiciona algún material adsorbente, se filtra o se decanta para reducir el contenido de humedad y así poder transportarlo y disponerlo en relleno sanitario, confinamiento controlado o sistemas de tratamientos térmicos.

Aplicabilidad, ventajas, desventajas de las técnicas de tratamiento de RMD

Autoclavado

Se emplea principalmente para desechos biológicos y compuestos químicos que se pueden desactivar mediante calor, por lo que se recomienda someter a desnaturalización en autoclave (ÁLVAREZ y MARTÍNEZ, 2011). Este proceso utiliza el vapor saturado de forma controlada, a presión y temperaturas suficientes, durante un lapso de tiempo determinado. Una vez desactivados, los líquidos se deberán diluir y verter al drenaje con abundante agua previa obtención de autorizaciones, licencias o permisos, caso necesario.

El costo y complejidad operacional es considerablemente menor que el de otros métodos como la incineración, ya que utiliza solamente agua y electricidad. Su principal ventaja es que no produce contaminación ambiental, y que no es necesario llegar a la esterilización de los desechos. Sin embargo, es más utilizado para residuos infectantes. Álvarez y Martínez (2011) explican que, como paso previo, los residuos pueden triturarse para mejorar el contacto con el vapor, pero este proceso eleva los costos. Al finalizar el tratamiento, al igual para la descomposición química, se debe combinar con otros métodos de tratamiento.

Encapsulación

La encapsulación es un tipo de inmovilización, que normalmente emplea aditivos para reducir la movilidad de los contaminantes y hacer con que el residuo sea aceptable a los requerimientos actuales de disposición en el suelo, pues minimizan el riesgo de que los contaminantes migren hacia las aguas superficiales o subterráneas (FERNÁNDEZ y TORRES, 2001; CHARTIER et al., 2014). Este puede o no presentar enlaces químicos entre el contaminante y el aditivo.

La encapsulación es un proceso que comprende el recubrimiento total o cercamiento de una partícula contaminante o un aglomerado de residuos con una cierta sustancia (el aditivo o el aglutinante). Los desechos son transformados en un bloque sólido dentro de un tambor de polietileno de alta densidad o acero, previamente limpiado antes de su uso, y que no contenía materiales explosivos o peligrosos (FERNÁNDEZ y TORRES, 2001; CHARTIER et al., 2014). Los autores anteriores explican que estos tambores se llenan hasta 75% de su capacidad con fármacos sólidos y semisólidos junto a sus empaques primarios. Si existen grandes cantidades de tabletas sueltas, deben mezclarse con las demás formas sólidas en varios tambores diferentes, para evitar concentraciones altas de cualquier sustancia en un tambor particular.

A continuación, se rellena el resto con cemento o una mezcla de cal/ cemento/agua en proporción 15:15:5 (por peso), en ocasiones se puede requerir una proporción mayor de agua para alcanzar una consistencia líquida satisfactoria. Otra opción es llenar con arena bituminosa o espuma plástica o arena de alquitrán. Luego del anterior, sellar la tapa de preferencia con costura soldada (HERNÁNDEZ et al., 1995; FERNÁNDEZ y TORRES, 2001; ÁLVAREZ y MARTÍNEZ, 2011). Los tambores sellados se deben llevar a una celda de seguridad de relleno sanitario.



En el caso de medicamentos residuales antineoplásicos, los tambores deben llenarse al 50% de su capacidad y completar el volumen hasta un 90% con una mezcla de cemento/cal /agua en proporciones 15:15:5 en peso, los tambores se deben sellar con costura soldada y guardarlos por 7 a 28 días, esto formará un firme bloque sólido e inmóvil, en el cual los desechos se aíslan con relativa seguridad, después los tambores se envían a un relleno sanitario (FERNÁNDEZ y TORRES, 2001). Materiales puzolánicos (polvo volcánico, cenizas y arcillas quemadas) también pueden ser utilizados para solidificación, pues a pesar de que no producen cementación por sí mismos, contienen constituyentes que en combinación con cal y agua a temperatura normal forman compuestos insolubles estables (FERNÁNDEZ y TORRES, 2001).

Chartier et al. (2014) explican que la encapsulación no debe ser la primera alternativa de tratamiento recomendada para residuos de medicamentos, pero puede utilizarse en combinación con otros tratamientos. Sumado a anterior, esta técnica no es recomendada para grandes cantidades de desinfectantes químicos pues son corrosivos para el hormigón y a veces producen gases inflamables.

Inertización

La inertización es una variante del encapsulamiento que no utiliza tambores e implica retirar los materiales de empaque primario y secundario (papel, cartón y plástico) de los medicamentos. El empaque secundario, generalmente no contaminado con el medicamento, debe disponerse como un residuo común, independiente de los desechos farmacéuticos. La remoción de envases reduce considerablemente el volumen de residuos y facilita el proceso de inmovilización (FERNÁNDEZ y TORRES, 2001). Así, la estabilización se refiere a un proceso por el que un residuo se convierte a una forma química más estable a través de la solidificación, obtenida por una reacción química.

Luego de separar los productos farmacéuticos de sus envases, los medicamentos se trituran (con trituradora o rodillo) y se les agrega una mezcla de cal, cemento Portland y agua en proporciones en peso de 65:15:15:5, respectivamente - similar al encapsulamiento - para formar una pasta homogénea. La mezcla homogénea genera, *in loco*, cubos de 1 m³ o pellets que posteriormente son transportados para disposición final en rellenos sanitarios (CHARTIER et al., 2014). De forma alternativa, el producto, aún en estado líquido, puede ser trasladado en un camión mezclador de hormigón y dispuesto en relleno sanitario, donde la pasta se convierte en una masa sólida dispersada dentro de los desechos municipales (ÁLVAREZ y MARTÍNEZ, 2011).

Descomposición química

La descomposición química consiste en la reacción del contaminante con un agente oxidante, como oxígeno, peróxido, ozono o hipoclorito que descomponen en otras sustancias más inocuas (CHARTIER et al., 2014). La oxidación de cianuro mediante el uso de hipoclorito o peróxido de hidrógeno es un ejemplo de este tipo de tratamiento, donde el cianuro se convierte en dióxido de carbono y amoníaco.

En este rubro de tratamiento, regulaciones de algunos países orientan la inactivación de residuos de medicamentos líquidos con solución de ácido clorhídrico al 10%, y posterior desecho al sistema de drenaje, con abundante agua (ÁLVAREZ y MARTÍNEZ, 2011). Sin embargo, es necesario la previa consulta a entidades reguladoras sobre la necesidad de obtención de autorizaciones, licencias o permisos para este tipo de manejo.

Aun así, la descomposición química es recomendada solamente bajo supervisión de expertos y para cantidades de residuos menores a 50 kg (FERNÁNDEZ y TORRES, 2001). Chartier et al. (2014) explican que este no es un método ampliamente utilizado.

Incineración

La incineración utiliza la oxidación térmica para convertir un residuo en un material menor peso, volumen y peligrosidad mediante combustión controlada. El proceso se aplica a residuos sólidos, semisólidos, polvos, antineoplásicos y sustancias controladas, generando como *outputs* principales el dióxido de carbono, vapor de agua y cenizas (FERNÁNDEZ y TORRES, 2001). Algunos productos peligrosos pueden ser generados en el proceso (sulfuros, nitrógeno, halógenos y metales pesados como mercurio, arsénico, selenio y plomo), motivo por el cual este tipo de tratamiento requiera un equipo para el control de los contaminantes atmosféricos. Por este motivo, en la mayoría de los incineradores a temperaturas más bajas, incineradores de una sola cámara o por combustión al aire libre, la incineración es inapropiada para la eliminación de residuos farmacéuticos citotóxicos debido a que puede liberar a la atmósfera peligrosos vapores citotóxicos (CHARTIER et al., 2014).



La incineración a temperaturas por encima de los 1200°C hace con que este método sea costoso más eficaz en la eliminación de sustancias peligrosas (FERNÁNDEZ y TORRES, 2001). Otro factor importante es que los envases de cartón y plástico no susceptibles al reciclaje pueden ser destinados a incineración, excepto los que estén hechos de cloruro de polivinilo (PVC por sus siglas en inglés) debido a la formación de compuestos clorados (FERNÁNDEZ y TORRES, 2001). Además, ampollitas de vidrio y aerosoles envasados no deben ser incineradas porque explotan y pueden causar heridas a los operadores y daño al equipo incinerador, ya que la temperatura de operación es por arriba de la requerida para la fundición del vidrio y el vidrio fundido se puede atascar en el horno (FERNÁNDEZ y TORRES, 2001).

Coprocesamiento

Los hornos de cemento son particularmente recomendables para la disposición de desechos químicos, aceites usados, medicamentos caducos, etc. (FERNÁNDEZ y TORRES, 2001). Eso porque durante el proceso, las materias primas del cemento alcanzan temperaturas hasta de 1500°C, mientras que los gases de combustión alcanzan hasta 2000 °C. En este sistema, los productos farmacéuticos se pueden introducir en el horno en proporción del 5%, en cada tiempo, con respecto a la cantidad total de combustible, proporción que es razonablemente pequeña y se sugiere como una regla empírica sensata (FERNÁNDEZ y TORRES, 2001).

El tiempo de residencia de los gases a altas temperaturas es de varios segundos, condición en que la totalidad de los componentes orgánicos se desintegran. Además, debido a la alta productividad de industrias cementeras, se pueden procesar grandes cantidades de desechos en poco tiempo, resultando a la vez un proceso económico tanto para la producción de cemento como para el tratamiento de medicamentos residuales (FERNÁNDEZ y TORRES, 2001; MAMPASO, 2018). Puede ser necesario separar el material de envase y/o triturar los medicamentos para evitar daños al sistema de alimentación del combustible.

Compostaje

Muchos estudios (YOUNGQUIST et al., 2014; MITCHELL et al., 2015; ZHANG et al., 2015; CHAI et al., 2016; JONIDI-JAFARI et al., 2020) han evaluado el uso del compostaje para descomposición de antibióticos (ciprofloxacina, penicilina, metronidazol y tetraciclina) presentes en estiércol y biosólidos debido a la persistencia de estos medicamentos en residuos sólidos generados por la industria pecuaria intensiva y sistemas de tratamiento de aguas residuales domésticas. Además, el compostaje también ha sido aplicado para biorremediación de suelos, lodos y sedimentos contaminados con sustancias peligrosas derivadas de petróleo, agroquímicos u otros, como la estabilización de Cr(VI), metal pesado tóxico y carcinógeno presente en lodo de aguas residuales (LOUBNA et al., 2015); producción de sustancias húmicas capaces de remover/lavar Cd y Ni de sedimentos (ZHANG et al., 2019); y degradación de hidrocarburos aromáticos policíclicos en suelos (ŠAŠEK et al., 2003).

El reciente estudio realizado en Irán por Jonidi-Jafari (2020) destaca el compostaje como alternativa de biodegradación aerobia para medicamentos de uso humano de difícil degradación, con alta eficacia de reducción de antibióticos al final de la fase termofílica (99,9, 96,7 y 93,5%) para 20, 50 y 100 mg / kg de metronidazol y 89,4, 88,8 y 86,5% para ciprofloxacina, respectivamente. Al final del proceso, la eficiencia de eliminación de metronidazol y ciprofloxacina para todos los reactores utilizados fue del 99,99%, y las propiedades físico-químicas del compost final estaban en el rango estándar de calidad.

En otro estudio, Youngquist et al. (2014) constataron que la presencia del antibiótico ciprofloxacina no afecta las comunidades microbianas del compost, sin embargo, enuncian la adsorción como el mecanismo dominante para neutralizar el contaminante debido a las partículas o sustancias húmicas del compost que tienen suficiente capacidad de adsorción para evitar que las concentraciones típicas de residuos de ciprofloxacina enriquezcan selectivamente poblaciones de bacterias resistentes. Es importante señalar que no todos los antibióticos serán completamente neutralizados por adsorción (SUBBIAH et al., 2011).

Las ventajas del uso del compostaje aerobio son sus *outputs* no peligrosos (CO₂, calor, agua y biomasa), eliminación de patógenos, reducido costo, fácil manejo y versatilidad de aplicabilidad tanto en grandes ciudades como en pequeñas comunidades, presentándose como una alternativa de tratamiento de residuos de menor costo ambiental y económico y, por ende, más sustentable (LIU et al., 2020).



Reciclaje de embalaje primario

En India, Noori et al. (2018) comprobó que los blísteres de pastillas de medicamentos pueden ser reciclados para su uso como material de electrodo en pilas de combustible microbianas (MFC), funcionando como un electrodo rentable, estable y duradero, factor crucial al costo total de fabricación de este tipo de tecnología. Los autores destacan que este residuo como un excelente material de ánodo en lugar de cátodo.

Frente a gran cantidad de métodos de tratamiento, la elección del método adecuado debe considerar los equipos y personal necesarios, tiempos cortos y proceso sencillo, preferencialmente *in loco* (HERNÁNDEZ et al. 1995). Asimismo, cuando no se dispone de métodos de incineración a alta temperatura ni de degradación química, y cuando el traslado de medicamentos residuales para tratamiento adecuado en otro sitio con las instalaciones y la experiencia necesarias no es posible, la encapsulación o inertización puede considerarse como último recurso (CHARTIER et al., 2014). Además, algunas de las tecnologías emergentes pueden tener aplicaciones útiles para el tratamiento de los desechos de medicamentos. Sin embargo, hay que considerar las ventajas y desventajas de cada proceso frente a las señaladas en los procesos de tratamiento tradicionales (Tabla 2).

Tabla 2. Ventajas y desventajas de tratamiento convencionales de medicamentos residuales. Fuente: Elaborados a partir de Hernández et al. (1995), Fernández y Torres (2001), Chartier et al. (2014).

Tratamiento	Ventajas	Desventajas
Autoclavado	<ul style="list-style-type: none"> Bajo costo y complejidad operacional; Aplica a residuos líquidos; No genera contaminantes atmosféricos. 	<ul style="list-style-type: none"> Mayor costo de instalación; No recomendado para grandes volúmenes; No reduce el volumen de los residuos.
Encapsulación	<ul style="list-style-type: none"> Evita la recolección, venta y reúso clandestino de residuos de medicamentos por personal que recoge residuos; Alternativa de disposición para locales donde no hay incineración; Mínimiza el riesgo de lixiviación de contaminantes a las aguas superficiales o subterráneas; También se aplica a residuos químicos y punzocortantes. 	<ul style="list-style-type: none"> Incrementan el volumen de los desechos a disponer; No siempre es posible para grandes cantidades; No recomendado para grandes cantidades de desinfectantes; No es recomendado como único método de tratamiento.
Inertización	<ul style="list-style-type: none"> Relativamente económico; No requiere equipo complejo; Tiene fácil ejecución; El volumen incrementado es menor que en la encapsulación; Posibilita reciclaje de empaques. 	<ul style="list-style-type: none"> Incrementan el volumen de los desechos a disponer
Descomposición química	<ul style="list-style-type: none"> Adecuado para pequeñas cantidades. 	<ul style="list-style-type: none"> No es práctico para cantidades superiores a 50 Kg; Requiere personal capacitado y reactivos para llevar a cabo el proceso; Proceso lento
Incineración	<ul style="list-style-type: none"> Se puede aprovechar la energía que se desprende 	<ul style="list-style-type: none"> Mayor costo y complejidad; Generan emisiones atmosféricas; Aplicación principalmente en grandes centros urbanos
Coprocesamiento	<ul style="list-style-type: none"> Menor costo que la incineración; Desintegra todos los componentes orgánicos; Reduce costos energéticos en cementeras; La industria cemento casi siempre está dispuesta a emplear otros combustibles, pues ahorran costos sin afectar la calidad del cemento. 	<ul style="list-style-type: none"> Generan emisiones atmosféricas



Los tratamientos discutidos anteriormente pueden ser aplicados conjuntamente, sin embargo, las alternativas más comunes, aplicadas tanto a envoltorios primarios como secundarios, son la incineración y el coprocesamiento, opciones de mayor costo que generan emisiones atmosféricas y tienen aplicación principalmente en grandes centros urbanos (MAMPASO, 2018), es decir, no son técnicas ambientalmente amigables y fácilmente accesibles a pequeñas comunidades.

CONCLUSIONES

Frente al anterior, no solo es necesario proveer puntos de recolección de RMD a la población, sino que es sustancial que los sistemas de recolección sean apropiados (de fácil acceso y adecuada estructura) para permitir el registro y clasificación correcta del máximo posible de RMD generado, evitando su disposición inadecuada y favoreciendo la elección del más adecuado sistema de tratamiento y disposición final.

Ante la interrogante sobre cuál es el mejor tratamiento para el medicamento caducado o no utilizable, lo cierto es que no hay una respuesta única. La elección de cada tecnología depende de las características del residuo de medicamento, eficacia esperada, factibilidad técnico-económica, además del tiempo y espacio requerido para ejecución. Sin embargo, en la elección es importante considerar aspectos de sostenibilidad, como la técnica menos impactante al medio ambiente, socialmente justa y accesible.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio fue financiado por ANID-Subdirección de Capital Humano/Doctorado Nacional/2021-21210126.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Álvarez, J. M., Martínez, T. M. (2011). **Gestión posconsumo de residuos peligrosos: medicamentos vencidos**. Pereira: Publiprint Ltda. Disponible en: <http://produccionmaslimpia.org/documentos/otros/cartilla%20posconsumo%20de%20residuos%20medicamentos.pdf>
2. Bettington, E., Spinks, J., Kelly, F., Gallardo-Godoy, A., Nghiem, S., Wheeler, A. J. (2017). When is a medicine unwanted, how is it disposed, and how might safe disposal be promoted? Insights from the Australian population. **Australian Health Review**, 42 (6), 709-717. <https://doi.org/10.1071/AH16296>
3. Borrelly, S. I.; Caminada, S. M. L.; Ponezi, A. N.; Santos, D. R. dos; Silva, V. H. O. (2012). Contaminação das águas por resíduos de medicamentos: ênfase ao cloridrato de fluoxetine. **O mundo da saúde**, 36 (4), 556-563. Disponible en: http://bvsmms.saude.gov.br/bvs/artigos/mundo_saude/contaminacao_aguas_residuos_medicamentos_enfase.pdf
4. Carvajal, R. F., Mora, R. J. J. (2016). Medicamentos no utilizables: problemática y medidas pertinentes para su disposición final. **Revista Médica de la Universidad de Costa Rica**, 10 (1), Art. 3. DOI 10.15517/RMU.V10I1.24829
5. Chai, R., Huang, L., Li, L., Gielen, G., Wang, H., Zhang, Y. (2016). Degradation of Tetracyclines in Pig Manure by Composting with Rice Straw. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, 13 (3), 254. <https://doi.org/10.3390/ijerph13030254>
6. Chartier, Y., Emmanuel, J., Pieper, U., Prüss, A., Rushbrook, P., Stringer, R., Townend, W., Wilburn, S., Zghondi, R. (2014). **Safe management of waste from health care activities**. 2nd. ed. Ginebra: World Health Organization (WHO). Disponible en: https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/85349/9789241548564_eng.pdf;jsessionid=B65D76CF2A54CA05ED77D9D7D208EAC2?sequence=1
7. Environmental Protection Agency - EPA (2012). **Title 40 - Protection of Environment: Part 261 Identification and Listing of Hazardous Waste**. US Government Publishing Office, 7-1-14 edition. Disponible en: <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/medica/article/view/24829/25043>
8. Fernández, G., Torres, P. (2001). **Guía para la disposición segura de medicamentos caducos en situaciones de emergencia**. Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). Disponible en: <http://www.cenapred.gob.mx/es/Publicaciones/archivos/238-GUAPARALADISPOSICINSEGURADEMEDICAMENTOSCADUCOSACUMULADOSENSITUACIONESDEEMERGENCIA.PDF>
9. Hernández, P. C., Fernández, G., Sánchez, J. (1995). **Manual para el tratamiento y disposición final de medicamentos y fármacos caducos**. 93p. México D. F.: Instituto Nacional de Ecología.



10. Jonidi-Jafari, A., Farzadkia, M., Gholami, M., Mohagheghi, M. (2020). The efficiency of removing metronidazole and ciprofloxacin antibiotics as pharmaceutical wastes during the process of composting. **International Journal of Environmental Analytical Chemistry**, 100. DOI: 10.1080 / 03067319.2020.1781838
11. Kaffine, D.; O'Reilly, P. (2015). **What Have We Learned about EPR in the Past Decade? a Survey of the Recent EPR Economic Literature**. Organization for Economic Cooperation and Development (OECD). Disponível em: https://www.colorado.edu/faculty/kaffine/sites/default/files/attached-files/oecd_epr_ko.pdf
12. Kiryllos, G. (2011). Medications collected for disposal by outreach pharmacists in Australia. **Pharmacy World and Science**, 32 (1), 52-58. doi: 10.1007 / s11096-009-9340-x
13. Liu, Z., Wang, X., Wang, F., Bai, Z., Chadwick, D., Misselbrook, T., Ma, L. (2020). The progress of composting technologies from static heap to intelligent reactor: Benefits and limitations. **Journal of Cleaner Production**, 270, 122328. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122328>
14. Loubna, E. F., Hafidi, M., Silvestre, J., Kallerhoff, J., Merlina, G., Pinelli, E. (2015). Efficiency of co-composting process to remove genotoxicity from sewage sludge contaminated with hexavalent chromium. **Ecological Engineering**, 82, 355-360. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.05.022>
15. Mampaso, J. C. (2018). Tratamiento de residuos de medicamentos y sus envases en Iberoamérica. **XII Encuentro de la Rede de Autoridades en Medicamentos de Iberoamérica (Red EAMI)**. Disponível em: https://www.redeami.net/docs/docs/encuentros/encuentro_XII/Juan_Carlos_Mampaso_PROGRAMAS_POSCONS_UMO_MEDICAMENTOS.pdf
16. McKerlie, K., Knight, N., Thorpe, B. (2006). Advancing Extended Producer Responsibility in Canada. **Journal of Cleaner Production**, 14 (6-7), 2006, 616-628. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2005.08.001>
17. Mitchell, S. M., Ullman, J. L., Bary, A., Cogger, C. G., Teel, A. L., Watts, R. J. (2015). Antibiotic Degradation During Thermophilic Composting. **Water Air Soil Pollut**, 226, 13. <https://doi.org/10.1007/s11270-014-2288-z>
18. Noori, M. T., Bhowmick, G. D., Tiwari, B. R., Das, I., Ghangrekar, M. M., Mukherjee, C. K. (2018): Utilization of waste medicine wrappers as an efficient low-cost electrode material for microbial fuel cell. **Environmental Technology**, 41 (10), 1209 -1218. DOI: 10.1080/09593330.2018.1526216
19. Organization for Economic Cooperation and Development - OECD (2016). **Extended Producer Responsibility. Updated Guidance for Efficient Waste Management**. Paris: OECD Publishing. Disponível em: <https://www.oecd.org/development/extended-producer-responsibility-9789264256385-en.htm>
20. Organization for Economic Cooperation and Development - OECD (2019). **Health at a Glance 2019: OECD Indicators**. OECD Publishing, Paris. <https://doi.org/10.1787/4dd50c09-en>.
21. Rogowska, J., Zimmermann, A., Muszyńska, A., Ratajczyk, W., Wolska, L. (2019). Pharmaceutical Household Waste Practices: Preliminary Findings from a Case Study in Poland. **Environmental Management**, 64, 97-106. <https://doi.org/10.1007/s00267-019-01174-7>
22. Sanabria-Peréz, F. J., Alanís, J. L., Pech-Canché, J. M., Solís, C. M. (2019). Principales residuos de medicamentos generados en los hogares y su potencial ecotóxico en Tuxpan, Veracruz. **Acta universitaria**, 29, e2398. <https://doi.org/10.15174/au.2019.2398>
23. Šašek, V., Bhatt, M., Cajthaml, T., Malachova, K., Lednicka, D. (2003). Compost-mediated removal of polycyclic aromatic hydrocarbons from contaminated soil. **Archives of environmental contamination and toxicology**, 44(3), 0336-0342. <https://doi.org/10.1007/s00244-002-2037-y>
24. Smith, C.A. (2002). Managing Pharmaceutical Waste. **Journal of the Pharmacy Society of Wisconsin**, 17-22. Disponível em: https://gecap.org/pdf/managing_pharmaceutical_waste.pdf
25. Subbiah, M., Mitchell, S., Ullman, J., Call, D. (2011). Beta-lactams and florfenicol antibiotics remain bioactive in soils while ciprofloxacin, neomycin and tetracycline are neutralized. **Appl. Environ. Microbiol.** 77, 7255-7260. doi:10.1128/AEM.05352-1
26. Youngquist, C. P., Liu, J., Orfe, L. H., Jones, S. S., Call, D. R. (2014). Ciprofloxacin Residues in Municipal Biosolid Compost Do Not Selectively Enrich Populations of Resistant Bacteria. **Applied and Environmental Microbiology**, 80 (24), 7521-7526. doi.10.1128/AEM.02899-14
27. Youngquist, C. P., Liu, J., Orfe, L. H., Jones, S. S., Call, D. R. (2014). Ciprofloxacin residues in municipal biosolid compost do not selectively enrich populations of resistant bacteria. **Applied and Environmental Microbiology**, 80 (24), 7521-7526. DOI: 10.1128 / AEM.02899-14
28. Zhang, S., Wen, J., Hu, Y., Fang, Y., Zhang, H., Xing, L., Wang, Y., Zeng, G. (2019). Humic substances from green waste compost: an effective washing agent for heavy metal (Cd, Ni) removal from contaminated sediments. **Journal of hazardous materials**, 366, 210-218. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.11.103>
29. Zhang, Z., Zhao, J., Yu, C., Dong, S., Zhang, D., Yu, R., Wang, C., Liu, Y. (2015). Evaluation of aerobic co-composting of penicillin fermentation fungi residue with pig manure on penicillin degradation, microbial population dynamics and composting maturity. **Bioresource Technology**, 198, 403-409. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2015.09.005>