

IAEA

Organismo Internacional de Energía Atómica

Átomos para la paz y el desarrollo



TECnología NUClear para el Control de la Contaminación por Plásticos

TECnología NUClear para el Control de la Contaminación por Plásticos (NUTEC Plastics)

Índice

Resumen.....	1
1. Contexto estratégico	5
1.1. Un desafío para el desarrollo	5
1.2. Los resultados de las iniciativas internacionales hasta la fecha	7
2. La ventaja comparativa de las tecnologías nucleares	10
2.1. La tecnología nuclear en el contexto de la economía circular del plástico.....	10
2.2. La contaminación marina por plásticos	12
2.3. El papel y el enfoque del OIEA	14
3. El enfoque de NUTEC Plastics basado en los resultados	18
3.1. La contribución de NUTEC a la transición a una economía circular: una teoría del cambio	18
3.2. Objetivo y resultados prácticos	20
3.3. Elaboración del modelo económico	22
3.4. Sostenibilidad, riesgos y mitigación	24
3.5. Recursos necesarios y financiación	24
4. Alianzas	24
5. Ejecución	26
5.1. Enfoque para la ejecución.....	26
5.2. Monitorización y evaluación	28
ANEXO: Referencias	29

Resumen

Los plásticos son indispensables para la vida moderna. Si bien ofrecen múltiples beneficios y ventajas, las grandes cantidades de plásticos que se producen y finalmente se desechan están dañando los ecosistemas, lo que trae aparejado graves consecuencias para la biodiversidad, la inocuidad de los alimentos y, en último término, la salud de los seres humanos. Aproximadamente el 70 % de todos los plásticos producidos hasta ahora son residuos y únicamente el 9 % se ha reciclado.

En muchos lugares del mundo los residuos plásticos se manejan de forma inadecuada y terminan en vertederos no regulados o basureros al aire libre, desde donde penetran en el océano, ya sea por medio de ríos, vías fluviales o por acción del viento o las mareas. La contaminación por residuos plásticos no se limita únicamente a los océanos, sino que también puede afectar a medios terrestres como los suelos y las aguas subterráneas. El plástico es por naturaleza duradero y el hecho de que sea longevo implica que, incluso como residuo, no se descompone. Cuando llega a los océanos puede permanecer allí durante cientos de años, y con el tiempo se fragmenta y se convierte en microplástico y nanoplástico, que puede ingresar en la cadena alimentaria más fácilmente debido a su pequeño tamaño. En definitiva, el plástico no desaparece sino que con el tiempo se acumula en los océanos. Según las actuales tendencias, se prevé que para 2025 los océanos contendrán una tonelada de plástico por cada tres toneladas de peces, y para 2050 habrá más plástico que peces.

Son múltiples las razones que explican que solo se haya reciclado el 9 % de todo el plástico y una de las principales es el elevado costo del reciclaje. Además, algunos plásticos contienen varias capas de diferentes tipos de plástico, o están mezclados con otros materiales, lo que hace el reciclaje especialmente complejo y, por ende, costoso. Si bien el problema de la contaminación por plásticos recibe cada vez más atención a nivel mundial, la respuesta internacional hasta la fecha ha sido en gran medida fragmentada y *ad hoc*. Las lagunas en la respuesta a la contaminación por plásticos están relacionadas con la falta de concienciación, conocimientos, políticas, tecnología y financiación suficientes.

El modelo lineal de producción, uso y eliminación del plástico no es sostenible. Es necesario un enfoque global que establezca

una economía circular y se concentre en las cuatro R: reducir, reutilizar, reciclar y renovar. Hay análisis y pruebas que demuestran que las aplicaciones nucleares pueden complementar las tecnologías existentes y, de este modo, agilizar la transición a una **economía circular para el plástico**. No obstante, la posible contribución de la ciencia y la tecnología nucleares a una solución para el problema de los residuos

*¿Qué es NUTEC Plastics? El objetivo de NUTEC Plastics es prestar asistencia a los Estados Miembros del OIEA para que integren las técnicas nucleares en sus esfuerzos encaminados a abordar los desafíos asociados a la contaminación por plásticos. NUTEC Plastics se basa en una cartera de proyectos de investigación y de cooperación técnica del OIEA que giran en torno al reciclaje de plásticos con tecnologías de la radiación y la monitorización marina de los microplásticos con técnicas de rastreo isotópico. Con NUTEC Plastics el OIEA se posiciona respecto de un importante problema de dimensión mundial: la **contaminación por plásticos**. En el presente documento se resume lo que el OIEA puede ofrecer y dónde puede añadir valor utilizando técnicas nucleares, y se enuncian una serie de actividades que complementan las iniciativas nacionales e internacionales que ya se están llevando a cabo. NUTEC Plastics se basa en los conocimientos técnicos, científicos y económicos más recientes sobre la cadena de valor del plástico y la transición a una economía circular para el plástico. NUTEC Plastics procura promover y ampliar el diálogo con los Estados Miembros, los asociados, la industria y la sociedad civil. Presenta una visión sobre las soluciones que ofrece el OIEA para gestionar mejor los residuos plásticos. Las actividades específicas se llevarán a cabo a través de las modalidades de ejecución establecidas del OIEA, como proyectos de cooperación técnica, proyectos coordinados de investigación y otras actividades programáticas.*

plásticos no es muy conocida fuera de un grupo de especialistas, por lo que no suele incluirse en las propuestas de soluciones sostenibles y ampliables. Se necesita un cambio, no solo para dar a conocer más ampliamente las posibilidades que ofrecen las técnicas y las tecnologías nucleares, sino también, y lo que es aún más importante, para ponerlas en práctica de forma más generalizada a fin de aprovechar al máximo el potencial del papel de las técnicas nucleares en la reducción de la carga mundial de residuos plásticos. Para que esto ocurra, y sobre la base de su labor pasada y presente en este ámbito, el OIEA ha creado NUTEC Plastics con miras a ayudar a sus Estados Miembros a integrar las técnicas nucleares en sus esfuerzos encaminados a afrontar los desafíos asociados a la contaminación por plásticos, lo que hace más visible y patente la contribución del OIEA a la solución de este problema mundial.

El OIEA ha apoyado y sigue apoyando la investigación y la adopción de técnicas nucleares en dos esferas de actividad principales: la monitorización y la evaluación de los plásticos marinos, y el reciclaje y suprarreciclaje de los residuos plásticos/poliméricos.

La tecnología de la radiación, especialmente los rayos gamma y los haces de electrones, ofrecen características y ventajas únicas para reducir los residuos plásticos y poliméricos y, por consiguiente, suplen las carencias tecnológicas actuales en lo que respecta a la gestión de residuos. La irradiación puede solucionar los problemas que presentan los métodos convencionales de reciclaje mecánico respecto de la clasificación, ya que permite separar eficazmente los residuos plásticos para integrarlos en corrientes de reciclaje, y mejorar así la calidad y el valor de los plásticos reciclados. Las tecnologías de la radiación pueden utilizarse para reciclar los residuos plásticos o transformarlos en otros productos, como rellenos y aglomerantes para materiales de construcción. Pueden emplearse para descomponer los residuos de polímeros plásticos en componentes más pequeños para generar materias primas químicas con las que se fabrican productos de consumo, incorporando o no polímeros vírgenes (p. ej., no reciclados). También es posible reducir los residuos plásticos sustituyendo los plásticos derivados del petróleo por biopolímeros biodegradables producidos mediante polimerización por irradiación. Además, la tecnología de la radiación ofrece procesos de producción y reciclaje más limpios, con lo que se reduce el uso de aditivos y disolventes potencialmente nocivos y se ahorra energía.

Los océanos son el repositorio final de la mayoría de los plásticos terrestres no reciclados y se carece de conocimientos y comprensión suficientes acerca de la abundancia y los efectos de los **microplásticos en el océano**. Se necesitan datos más exactos para evaluar los efectos de los microplásticos y los contaminantes conexos en los organismos marinos que forman parte de la cadena alimentaria mundial, incluidos los que sirven de alimento para los seres humanos, y, por extensión, en las exportaciones de alimentos de origen marino, la inocuidad de los alimentos y la salud humana. Las **técnicas isotópicas** ofrecen una precisión inigualable y complementan a las técnicas convencionales en el rastreo de la abundancia y la distribución de los nanoplásticos y los microplásticos en el medio marino. Los trazadores isotópicos, las técnicas de imagenología y los contadores gamma y beta poseen una capacidad única para evaluar los efectos de los microplásticos y los nanoplásticos en la biota marina. Estas técnicas proporcionan importantes marcadores para estudiar la toxicidad de los plásticos en los organismos vivos y revelar en detalle los órganos y sistemas afectados, y permiten rastrear el estrés toxicológico real y su posible propagación en las cadenas alimentarias, que puede, en último término, perjudicar a los seres humanos mediante el consumo de alimentos de origen marino.

El OIEA posee y dirige **laboratorios para el medio ambiente** en Austria y Mónaco, que cuentan con una demostrada trayectoria en la realización de actividades aplicadas de investigación y desarrollo (I+D), la prestación de servicios de capacitación y analíticos, y la transferencia de técnicas nucleares probadas a los Estados Miembros en el ámbito de la monitorización del medio ambiente. El OIEA lleva a cabo estas actividades de I+D no solo en sus propios laboratorios —lo que hace del OIEA una organización única dentro del sistema de las Naciones Unidas—, sino también a través de sus amplias redes de investigación, integradas por instituciones de investigación, el mundo académico y laboratorios

de referencia de todo el mundo; y lo hace a través de su programa coordinado de investigación y su sistema de centros colaboradores.

Por conducto de su **programa de cooperación técnica**, el OIEA presta apoyo a los países para crear capacidad y transferir tecnologías y conocimientos en los ámbitos de la tecnología de la radiación y la monitorización del medio marino, entre otros. En la actualidad hay más de 40 proyectos de cooperación técnica (CT) nacionales y regionales en curso o planificados en el ámbito de las tecnologías de la radiación y la monitorización del medio ambiente en relación con los océanos.

La modelización económica y financiera sirve para estimar la contribución que podrían hacer las tecnologías, entre ellas las que se apoyan en soluciones de base nuclear, para agilizar la transición a una economía circular para el plástico. El enfoque metodológico se ha aplicado a dos niveles: en primer lugar, mediante un análisis comparativo de flujo de efectivo se estiman los aumentos de eficiencia derivados del uso de las tecnologías de irradiación como complemento a los procesos de reciclaje existentes (químicos y/o mecánicos); en segundo lugar, utilizando el modelo “Plastics to Ocean” (P2O)[1], concebido para analizar las existencias y los flujos de plásticos y residuos plásticos a escala mundial, se realiza un análisis por sectores para evaluar las posibles ventajas que ofrece la introducción de nuevas tecnologías. Este enfoque permite estimar el “valor añadido” que las tecnologías nucleares pueden aportar y proporciona los fundamentos para conectar los laboratorios que cuentan con iniciativas de ensayo y validación de la tecnología de reciclaje del plástico con programas de cooperación técnica, lo que reduce el tiempo necesario para la transferencia de tecnología y aumenta la eficiencia y la eficacia de los esfuerzos del OIEA.

NUTEC Plastics seguirá fortaleciendo y ampliando a escala el desarrollo de técnicas fiables y eficaces en relación con los costos para evaluar el carácter y la abundancia espacial y temporal de **los plásticos marinos** a fin de comprender mejor su origen, los mecanismos por los cuales se transportan, así como su destino y sus efectos. Esto comprende el establecimiento de protocolos armonizados y normalizados para detectar microplásticos en muestras ambientales, técnicas analíticas en consonancia con las mejores prácticas y los avances más recientes en la ciencia, así como capacitación de científicos y técnicos para su utilización.

NUTEC Plastics incorporará a las iniciativas nacionales, regionales y mundiales **las tecnologías de la radiación** para el reciclaje de residuos plásticos. Las actividades que actualmente se llevan a cabo en los laboratorios están preparando el terreno para que las plantas piloto de reciclaje de plásticos establezcan el volumen, la energía y los balances financieros asociados al uso de las tecnologías de la radiación para reciclar distintos residuos plásticos. Sobre la base de la prueba del concepto y de la experiencia adquirida de los proyectos piloto, la tecnología se ampliará a centrales de demostración del reciclaje de residuos plásticos a gran escala.

Para alcanzar una solución holística y sostenible a la carga mundial del plástico se requiere un enfoque integrado y global que solo es posible lograr en **colaboración** con organizaciones cuya función y conocimientos especializados sean complementarios. Es fundamental trabajar con las iniciativas nacionales, regionales e internacionales existentes, incluidas las alianzas público-privadas, tanto a nivel mundial como nacional. Esta labor incluye la colaboración con entidades de las Naciones Unidas, bancos multilaterales de desarrollo, organizaciones filantrópicas, alianzas a gran escala existentes, como plataformas de múltiples partes interesadas, el sector privado, y las instituciones científicas y de investigación. El sector privado será un asociado sumamente importante en la transición a una economía circular para el plástico, con el respaldo de medidas gubernamentales sólidas y una profunda implicación de los gobiernos mediante políticas propicias y un marco jurídico favorable. Por esta razón es fundamental que el OIEA colabore con **las alianzas público-privadas**, las fundaciones y las asociaciones del sector privado existentes más destacadas, así como con empresas que producen productos plásticos e industrias que reciclan plástico o

son principales usuarias de estos productos, a fin de ensayar y aplicar la viabilidad y la eficacia de la radiación para el reciclaje de plásticos y ampliar la escala de las soluciones propuestas.

Los dos componentes principales de NUTEC Plastics —la monitorización y evaluación, y el reciclaje de plásticos— están interrelacionados lógicamente, ya que ambos representan una contribución a la solución del problema mundial de la contaminación por plásticos. No obstante, estos dos componentes pueden **ejecutarse** de forma independiente. Teniendo en cuenta este vínculo de interrelación sin codependencia, NUTEC Plastics adopta un **enfoque modular** que ofrece la ventaja de facilitar la realización de determinadas actividades según la disponibilidad de recursos, brindando al mismo tiempo a los donantes y asociados la oportunidad de participar en actividades concretas relacionadas con su perfil, sus preferencias y sus prioridades. En la actualidad se están llevando a cabo varias actividades relacionadas con los plásticos.

La puesta en práctica de NUTEC Plastics se realiza y se realizará utilizando una serie de modalidades de ejecución del OIEA bien establecidas **una serie de modalidades de ejecución del OIEA bien establecidas**, como proyectos de CT, proyectos coordinados de investigación (PCI) y otras actividades programáticas.

1. Contexto estratégico

1.1. Un desafío para el desarrollo

Descripción del desafío que plantean los plásticos

El plástico es un elemento indispensable en la vida moderna, de hecho, es probablemente el material más utilizado en el mundo. En los 150 años desde que se inventaron los polímeros sintéticos y en los 70 años desde que comenzó la producción a gran escala, los plásticos, de naturaleza duradera y producción asequible, han transformado nuestro mundo. Los plásticos tienen, sin duda, muchas ventajas: protegen los productos frágiles del daño que puedan sufrir durante el transporte y de la contaminación u otros perjuicios causados por la humedad, los microorganismos o la luz, por lo que también mejoran la inocuidad de los alimentos; los plásticos conservan los productos por períodos de tiempo más prolongados, lo que permite reducir los desechos; gracias a su peso liviano, los plásticos ayudan a ahorrar combustible en el transporte de larga distancia, lo que lo hace más eficiente. Sin embargo, es precisamente esa omnipresencia del plástico lo que ha planteado un desafío mundial de rápido crecimiento. Los datos científicos muestran que las grandes cantidades de plástico que se producen y desechan están dañando los ecosistemas y los recursos naturales, lo que trae aparejado posibles consecuencias graves para la biodiversidad, la inocuidad de los alimentos y la salud de los seres humanos [2].

Economía lineal y escala y repercusiones de la contaminación por plásticos

En 2017, en el primer análisis mundial de la producción, el uso y el destino de todos los plásticos se estimó que actualmente más del 70 % de todos los plásticos producidos son residuos —esto es, 6300 millones de toneladas métricas de un total de 8300 millones de toneladas métricas— y que solo el 9 % ha sido reciclado alguna vez [3]. Según las actuales tendencias, se prevé que para 2025 el océano contendrá una tonelada de plástico por cada tres toneladas de peces, y para 2050 habrá más plástico que peces en el medio marino [4]. En muchos lugares del mundo los residuos plásticos se gestionan de forma inadecuada y terminan en vertederos no controlados o basureros al aire libre, de donde gran parte penetra en el océano, ya sea por medio de ríos o de otras vías fluviales o por acción del viento. Sin embargo, los residuos plásticos también entrañan consecuencias para la tierra, como la contaminación de los suelos o las aguas subterráneas.

El plástico es por naturaleza duradero y su larga vida útil hace que una vez que ingresa en el océano pueda permanecer allí por siglos. Con el tiempo se fragmenta y se convierte en microplástico y nanoplástico y puede ingresar en organismos vivos y en la cadena alimentaria. En definitiva, el plástico no desaparece sino que se acumula, también en los océanos. Se estima que desde 1950 han llegado a los océanos más de 150 millones de toneladas métricas de plástico [5].

La contaminación por plásticos es conocida por afectar particularmente a los ecosistemas marinos y sus animales [6]. Los posibles efectos de los plásticos en la salud de los seres humanos son objeto de una amplia gama de estudios. Muchos de ellos abordan la ingesta de microplásticos por seres humanos a través de la cadena alimentaria y los posibles efectos nocivos del plástico debido a la acumulación de aditivos tóxicos. Hasta el momento ninguna prueba científica directa ha indicado que los microplásticos sean directamente perjudiciales para la salud humana. Sin embargo, la contaminación por plásticos no solo es un problema ambiental y de salud humana, sino que también plantea un gran desafío para el desarrollo socioeconómico, que puede afectar a la biodiversidad, la infraestructura, el turismo y los medios de vida en el sector pesquero.

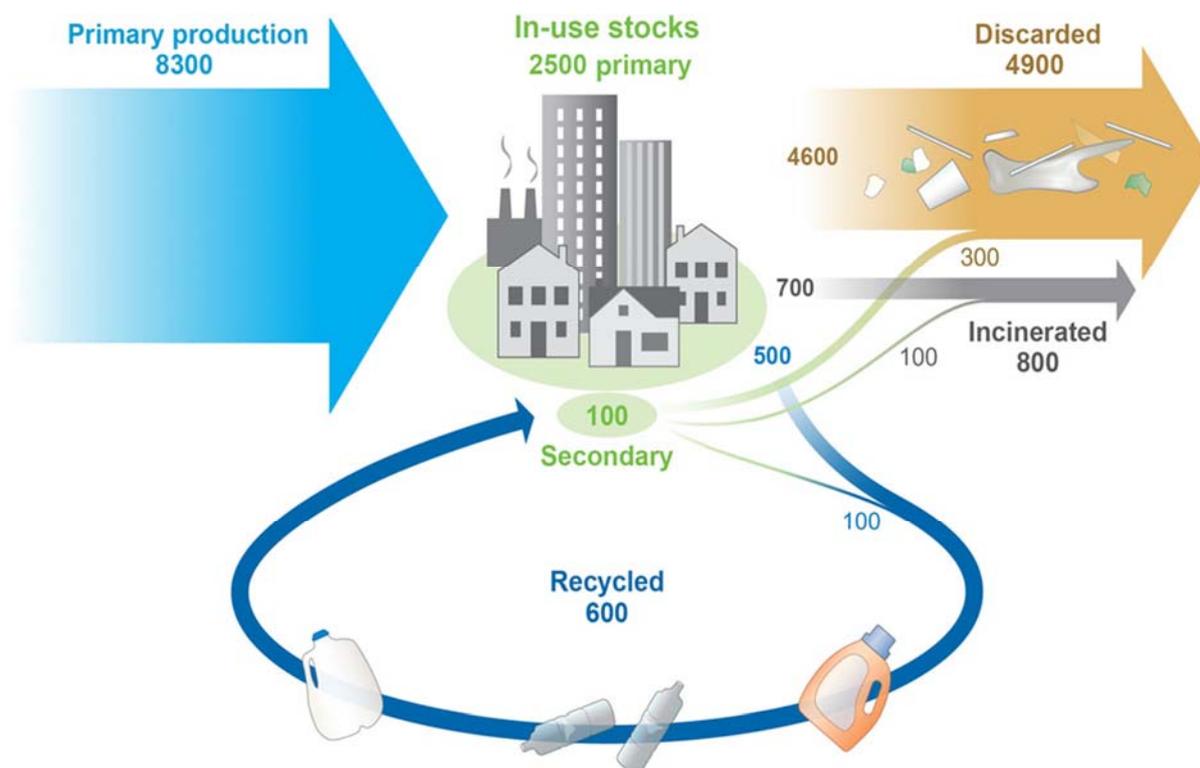


Fig. 1. La ecuación general de los residuos plásticos: ¿dónde va a parar el plástico?
(Fuente: GEYER, R., JAMBECK, J.R., LAW, K.L., Ref [3])

Hasta el momento, la economía del plástico ha seguido en gran medida un modelo lineal de “tomar, hacer y desechar”, según el cual los plásticos se desechan en el momento en que ya no cumplen la función para la que fueron producidos. A pesar de que los plásticos son sumamente importantes para la economía mundial, es evidente que sus múltiples ventajas están siendo eclipsadas por los efectos nocivos y los factores externos negativos que conlleva ese material cuando se convierte en residuo. Como consecuencia de ello, varios países han prohibido ciertos tipos de plástico de un solo uso. La pandemia de COVID-19 incrementará la carga mundial de residuos plásticos ya existente, debido al marcado aumento en la demanda de productos plásticos de un solo uso, como el equipo de protección individual y otros artículos plásticos de un solo uso empleados por motivos de higiene y salud.

Efectos diferenciales en hombres y mujeres

El grado en que la contaminación por plásticos —así como otras clases de contaminación ambiental— afecta a los distintos grupos de la sociedad difiere en función de características como la geografía, la riqueza, la edad y el género. Por ende, al abordar la economía del plástico, sus efectos y repercusiones, es importante efectuar un análisis de género para dar cuenta de una visión diferenciada de las distintas consecuencias de la contaminación por plásticos para los hombres y las mujeres. La transición hacia una economía circular del plástico es un proceso complejo que requiere la participación de todas las partes interesadas de la cadena de valor del plástico. Por lo tanto, es fundamental no solo atender las necesidades específicas de las mujeres, sino también las de otros grupos vulnerables o marginados de la sociedad que se ven afectados por la contaminación por residuos plásticos.

Gestión inadecuada del uso del plástico y de los residuos plásticos

El marcado aumento de la producción de plásticos está impulsado por múltiples factores, como el crecimiento de la población y los ingresos, y una razón principal: el aumento de los embalajes plásticos. El 42 % de todos los plásticos sin fibra se utiliza para materiales de embalaje, que se usan durante un año o menos, en promedio, antes de ser desechados. De todos los plásticos producidos entre 1950 y 2015,

solo el 9 % se ha reciclado, mientras que un 12 % se incineró y el 60 % se desechó en vertederos o en el medio ambiente; el resto está en reserva o en uso [3] (véase la figura 1).

Estas cifras presentan un panorama mundial general durante un período de 65 años. Sin embargo, también es evidente que la gestión de los residuos plásticos, y concretamente el reciclaje de ese material, muestra variaciones por región y por época. Por ejemplo, en muchos países de ingresos altos las tasas de reciclaje de plásticos han aumentado constantemente desde principios de la década de 2000 y, en algunos casos, han superado la marca del 30 %, mientras que muchos países más pobres apenas han alcanzado tasas de reciclaje de plásticos del 10 % [7]. En lo que respecta a los países de ingresos medianos y bajos, las tasas de reciclaje de plásticos no se conocen con certeza pero se puede prever que son significativas, al menos en los lugares en que existe un sistema informal eficiente de gestión de los residuos plásticos [8].

En cuanto a las fuentes terrestres de contaminación por plásticos, es fundamental contar con sistemas mejorados de gestión de los residuos sólidos en las etapas de eliminación, recolección y reciclaje de los ciclos de vida de los productos para solucionar el problema, en particular en países de ingresos medianos y bajos. Según el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), la cobertura promedio de recolección de residuos en países de ingresos bajos alcanza solo el 36 %, en países de ingresos medianos bajos el 64 %, en países de ingresos medianos altos el 82 % y en países de ingresos altos casi el 100 % [9]. La infraestructura y los sistemas de gestión de residuos fiables e integrales, acompañados de normas que promuevan el reciclaje, son factores clave para alcanzar altas tasas de reciclaje de plásticos.

Por consiguiente, lo que sucede con el plástico tras su utilización varía mucho de un país a otro en función del sistema de gestión de residuos existente. En consecuencia, si no se eliminan de forma adecuada ya sea por medio del reciclaje, la incineración o la eliminación ordenada en vertederos, tarde o temprano gran parte de los residuos plásticos acaban en el medio ambiente. Si no se toman medidas, la cantidad de residuos plásticos que penetran en los océanos podría prácticamente triplicarse para 2040. Incluso si el gobierno y la industria cumplieran plenamente los actuales compromisos vigentes para reducir el flujo de la contaminación por plásticos, solo se lograría reducir el vertido de plásticos al océano en alrededor de un 7 % anual [10].

Son múltiples las razones que explican que solo se haya reciclado el 9 % de todo el plástico producido hasta la fecha y una de las principales está vinculada a los costos de pasar de una economía lineal del plástico a una circular, en la que el plástico eliminado no se considere basura sino un recurso valioso y materia prima. Para lograr un cambio de esta índole se requieren altos costos de inversión iniciales y un entorno propicio más favorable [11]. Por ejemplo, el reciclaje de residuos plásticos es mucho más complejo que la gestión y el procesamiento tradicionales de los residuos, dado que requiere procesos separados de recolección y clasificación, lo que se traduce en costos generales más elevados que los de los sistemas de reciclaje de otros materiales, como el vidrio o el papel. Otros factores inhibidores que explican las bajas tasas de reciclaje de plásticos tienen que ver con las características materiales de ciertos tipos de plásticos que, por ejemplo, pueden ser particularmente delgados, como las bolsas o láminas, o tener múltiples capas de diferentes clases de polímeros, lo que hace que su reciclaje sea especialmente complejo u oneroso. Las bajas tasas de reciclaje de embalajes plásticos representan una gran pérdida económica: se estima una pérdida anual de entre 80 000 millones de dólares y 120 000 millones de dólares de valor material [12].

1.2. Los resultados de las iniciativas internacionales hasta la fecha

Es evidente que el modelo lineal de producción, uso y eliminación de plásticos no es sostenible. Se necesita más bien un enfoque diferente, como ponen de manifiesto las iniciativas de diversas organizaciones, y en tal sentido NUTEC Plastics se esfuerza por crear una economía circular para el plástico y se concentra en las cuatro R: reducir, reutilizar, reciclar y renovar. Entre los elementos que

conforman el concepto de las cuatro R se encuentran incentivos económicos para reutilizar y reciclar plásticos, reducir el vertido de plásticos gestionados de forma inadecuada al medio ambiente y separar la producción de plásticos a partir de materias primas fósiles utilizando materias primas alternativas y renovables. Ello requiere una ambiciosa labor por parte de muchos intervinientes que aprovechan al máximo todas las tecnologías disponibles.

La contaminación por plásticos se ha convertido en una cuestión de preocupación ambiental mundial y ha suscitado el interés no solo de la comunidad científica sino también de los gobiernos [13]. De hecho, países de todo el mundo ya han comenzado a tomar medidas mediante la aprobación de políticas y programas nacionales encaminados a reducir los residuos plásticos e incrementar el reciclaje de ese material. Esa esta labor ha ido acompañada de múltiples iniciativas regionales y mundiales sobre los residuos plásticos. Al igual que sucede con otros problemas ambientales en el mundo, para tratar la contaminación por residuos plásticos se necesita la colaboración de una gran variedad de partes interesadas en los planos internacional, regional, nacional y local. Sin embargo los gobiernos son, en definitiva, los principales impulsores del tratamiento de este problema, dadas sus funciones de reglamentación en materia política, social y económica tanto a nivel nacional como con relación a otros Estados.

El entorno normativo y reglamentario es un factor decisivo a la hora de determinar el éxito de las iniciativas encaminadas a reducir la contaminación por residuos plásticos, ya que puede incentivar un menor uso del plástico virgen, incrementar los cupos de reciclaje y aumentar la demanda de plástico reciclado. Incluso si los gobiernos y la industria cumplieran plenamente sus actuales compromisos, para 2040 la probable reducción del vertido anual de plásticos en el océano sería solamente del 7 % (± 1 %), en comparación con la hipótesis de *statu quo* [10]. Es preciso que el sistema cambie hacia una economía circular para el plástico, en la que la cantidad de plásticos eliminados o gestionados de forma inadecuada se reduzca significativamente al contener la demanda de plásticos mediante su sustitución por materiales alternativos y el aumento de las tasas de reciclaje. Para que esto suceda tienen que existir incentivos adecuados, una mayor innovación e inversiones de capital.

Logros y deficiencias en materia de políticas y marcos reguladores

Según el *Plastics Policy Inventory*¹, entre el año 2000 y mediados de 2019 se han aprobado unos 322 instrumentos de política con el objetivo explícito de abordar la cuestión de la contaminación por plásticos; 29 de ellos son internacionales, 43 regionales, 151 nacionales y 99 subnacionales [14]. Esos instrumentos de política son de carácter reglamentario, económico o informativo y hacen referencia a las diferentes modalidades utilizadas para abordar la cuestión de la contaminación por plásticos, por ejemplo, la elaboración de planes de reducción del plástico, la creación de nuevos procesos de producción o la mejora de los ya existentes, la limitación del uso del plástico, la prohibición de productos, el establecimiento de cupos de reciclaje, subsidios, mecanismos de pago en efectivo por devolución, impuestos, etc.

Instrumentos e iniciativas internacionales

Los instrumentos aprobados a nivel internacional son en su mayoría no vinculantes desde el punto de vista jurídico. Con el tiempo el ámbito de aplicación de estos instrumentos se ha hecho más complejo y específico, abordando concretamente la cuestión de la contaminación por plásticos. Los instrumentos se han centrado más bien en la vigilancia voluntaria y el llamamiento a los Estados para que elaboren y pongan en práctica planes de acción nacionales. Entre las recomendaciones establecidas a nivel internacional se encuentran principalmente medidas reglamentarias de acción afirmativa relacionadas con la gestión y la limpieza de

¹ Véase DUKE UNIVERSITY, *Plastics Policy Inventory* (2020), <https://nicholasinstitute.duke.edu/plastics-policy-inventory>.

residuos plásticos; campañas de enseñanza y divulgación; incentivos económicos para mejorar la gestión de los residuos plásticos y desincentivos económicos para el plástico de un solo uso.

Las medidas para luchar contra la contaminación por plásticos en el plano internacional van más allá de la aprobación de determinados instrumentos. Son ejemplos de estas iniciativas la Alliance to End Plastic Waste, el compromiso mundial para una Nueva Economía del Plástico de la Fundación Ellen MacArthur, en colaboración con el PNUMA, la Global Plastic Action Partnership (GPAP), acogida por el Foro Económico Mundial, la carta del G-7 sobre plásticos oceánicos o el marco de aplicación de medidas relativas a la basura plástica marina, formulado por el G-20. Las Naciones Unidas han proclamado el Decenio de las Naciones Unidas de las Ciencias Oceánicas para el Desarrollo Sostenible (2021-2030) con miras a apoyar las iniciativas encaminadas a invertir el ciclo de deterioro de la salud de los océanos y alinear a las partes interesadas en el océano de todo el mundo detrás de un marco común [15].

La mayoría de estas iniciativas trabajan en varios países y están dirigidas por organizaciones internacionales, como los órganos de las Naciones Unidas, secretarías de convenios, centros regionales y de coordinación (por ejemplo, el PNUMA, el Banco Mundial o la OCDE), seguidas de organizaciones no gubernamentales, empresas y la industria. Casi la mitad de las iniciativas están conformadas por múltiples partes interesadas, a menudo con empresas y organizaciones sin fines de lucro que trabajan conjuntamente para lograr la transición hacia una economía circular para el plástico.²

Instrumentos e iniciativas regionales

Se están aprobando cada vez más políticas e instrumentos en el plano regional. Al igual que ocurre en el plano internacional, las políticas regionales sobre la contaminación por plásticos se han hecho más específicas con el tiempo, concentrándose en tipos concretos de contaminación por plásticos [14].

En 2018, la Unión Europea aprobó la Estrategia Europea para el Plástico en una Economía Circular, que tiene por objeto transformar la manera en que los productos plásticos se diseñan, se utilizan, se producen y se reciclan [16]. Según esta Estrategia, para 2030 todos los embalajes plásticos comercializados en el mercado de la Unión Europea deben ser reutilizables o reciclables; más de la mitad de los residuos plásticos generados en la Unión Europea deben reciclarse; y la capacidad de clasificación y reciclaje deberá haberse cuadruplicado con respecto a los niveles de 2015. En Asia, la Asociación de Naciones de Asia Sudoriental (ASEAN) aprobó en 2019 la *Bangkok Declaration on Combating Marine Debris in the ASEAN Region* (declaración de Bangkok sobre la lucha contra los detritos marinos en la región de la ASAN), en la cual los miembros declararon su intención de redoblar esfuerzos para prevenir y reducir la contaminación marina por plásticos en un enfoque integrado tierra-mar, reforzar las leyes y los reglamentos, promover soluciones innovadoras encaminadas a una economía circular del plástico y mejorar la cooperación y el intercambio de información a nivel regional e internacional [17]. Otra iniciativa es el proyecto “Closing the loop”, de la Comisión Económica y Social para Asia y el Pacífico (CESPAP), que está orientada a detectar y vigilar las fuentes y las vías de entrada de residuos plásticos a los ríos [18]. En África, el proyecto “African marine waste network” es una iniciativa que trabaja en la creación de conocimientos sobre la contaminación por plásticos, la sensibilización y la enseñanza en esa esfera [19]. En América Latina y el Caribe la Iniciativa Regional para el Reciclaje Inclusivo, de carácter multisectorial, está dirigida por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) y se concentra en los sectores de reciclaje formales e informales [20].

² La Fundación Ellen MacArthur, en colaboración con el PNUMA, puso en marcha en 2018 el compromiso mundial para una Nueva Economía del Plástico, en el que más de 500 organizaciones establecen metas para tratar de raíz la cuestión de los residuos plásticos y la contaminación por plásticos de aquí a 2025. Véase el documento <https://www.newplasticseconomy.org/assets/doc/npec-vision.pdf> (en inglés).

Instrumentos e iniciativas nacionales y subnacionales

Hasta el momento la mayoría de los instrumentos se han aprobado a nivel nacional y subnacional y, en gran medida, en países de ingresos altos y de ingresos medianos altos [14]. Entre las medidas reglamentarias afirmativas se encuentran la elaboración de planes, mejoras a los procesos y productos existentes o incentivos para el manejo responsable de los plásticos. Son ejemplos de medidas reglamentarias prohibitivas las limitaciones o prohibiciones relacionadas con el plástico, o la prohibición del manejo irresponsable de ese material. También se utilizan como modalidades económicas adicionales los subsidios, la desgravación fiscal, los mecanismos de pago de efectivo por devolución y los desincentivos, como recargos, impuestos, gravámenes o pago de derechos. Por último, los Estados recurren a campañas de información mediante actividades de enseñanza y divulgación, el etiquetado de plásticos y labores de investigación, recopilación de datos y presentación de informes.

2. La ventaja comparativa de las tecnologías nucleares

2.1. La tecnología nuclear en el contexto de la economía circular del plástico

Se reconoce a nivel mundial que la contaminación por plásticos exige una solución a largo plazo, sostenible y económicamente viable, alejada del modelo lineal de “tomar, hacer, desechar”.³ La respuesta a este desafío depende de la rápida transición a una economía circular del plástico, que tenga en cuenta la viabilidad técnica y económica, cimentada sobre los principios de las cuatro R: reducir, reutilizar, reciclar y renovar.

Si bien el problema de la contaminación por plásticos ha alcanzado una notable visibilidad internacional, la respuesta mundial hasta la fecha ha sido en gran medida *ad hoc*. Las lagunas en el tratamiento de la contaminación por plásticos constituyen un gran obstáculo, y abarcan la falta de concienciación, conocimientos, tecnologías, financiación y políticas suficientes [21]. La aplicación de técnicas nucleares adaptadas a las necesidades brinda soluciones científicas únicas para vigilar la contaminación marina debida a los microplásticos y sus efectos sobre los ecosistemas, así como para mejorar el reciclaje de los residuos plásticos.

³ Algunas de las resoluciones pertinentes del cuarto período de sesiones de la Asamblea de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente son: la resolución 4/6 sobre el tratamiento de la basura plástica y de los microplásticos marinos (UNEP/EA.4/RES.6), la resolución 4/9 sobre la lucha contra la contaminación causada por productos de plástico desechables (UNEP/EA.4/RES.9), la resolución 4/11 sobre la protección del medio marino frente a las actividades realizadas en tierra (UNEP/EA.4/RES.11) y la resolución 4/1 sobre vías innovadoras para lograr el consumo y la producción sostenible, que se pueden consultar en: <https://www.unep.org/environmentassembly/proceedings-report-ministerial-declaration-resolutions-and-decisions-unea-4>.

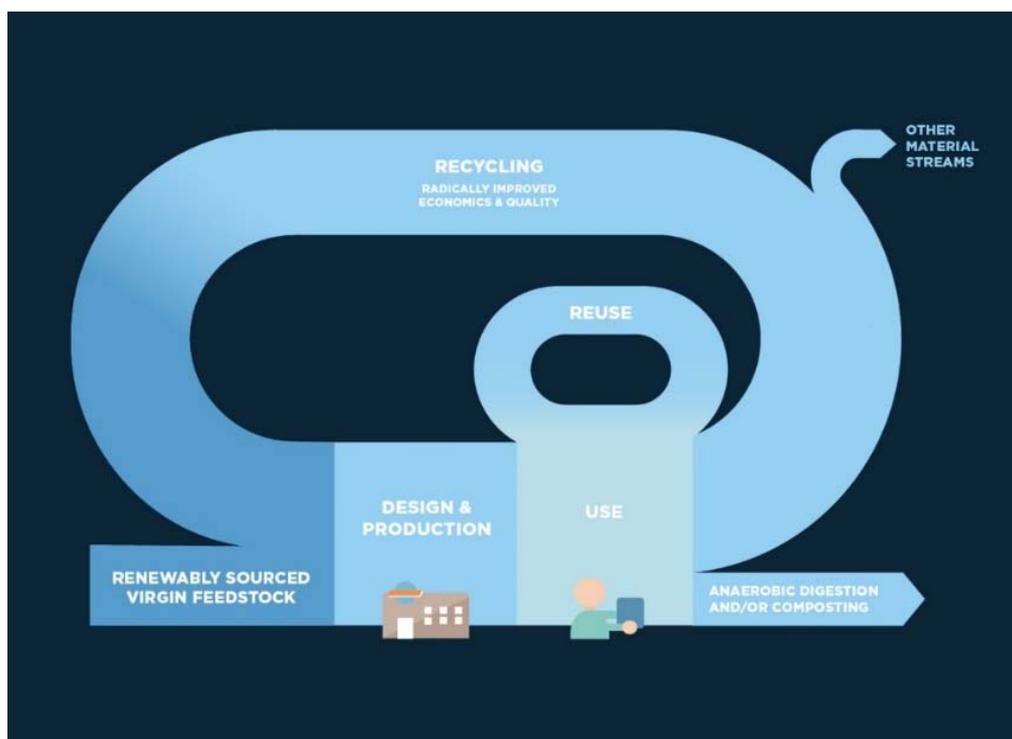


Fig. 2. La economía circular del plástico. (Fuente: FUNDACIÓN ELLEN MacARTHUR⁴)

Tecnologías de reciclaje convencionales actuales

La única opción para gestionar los plásticos de manera sostenible al final de su ciclo de vida es mediante un reciclaje amplio: el proceso de convertir los residuos plásticos en nuevos productos de plástico. Actualmente se utilizan sobre todo dos técnicas: el reciclaje mecánico y el reciclaje químico. Los residuos plásticos incompatibles con las actuales tecnologías convencionales de reciclaje pueden incinerarse para ser utilizados como fuente de combustible (un proceso conocido como recuperación de energía), reelaborarse o suprarreciclarse para ser transformados en productos con un valor nuevo.

El reciclaje mecánico es, hasta la fecha, el método más común para reciclar residuos plásticos [22]. Con él se recuperan los plásticos de los residuos y se produce una materia prima que puede reincorporarse a la producción de plástico y sustituir así los plásticos vírgenes. Este proceso suele consistir en una recolección, clasificación, lavado y triturado del material a fin de crear gránulos de plástico que luego se funden y se vuelven a procesar para producir nuevos productos de plástico [23]. Solo se pueden recuperar de esta manera los termoplásticos (es decir, materiales que se pueden refundir y volver a procesar hasta crear nuevos productos). Estos representan en torno al 12 % de la producción mundial de plástico [24].

Pese a tratarse de un proceso industrial relativamente económico, el reciclaje mecánico de plásticos plantea ciertas limitaciones. Exige la clasificación de distintos polímeros, lo cual plantea un desafío especial en el caso de los plásticos con múltiples capas. Además, la calidad del material reciclado se deteriora con cada ciclo y, por ello, no se puede someter a más de una o dos rondas de reciclaje mecánico.

A diferencia de este, el reciclaje químico sí puede procesar corrientes mixtas de residuos plásticos. El reciclaje químico comprende diversas tecnologías (como la gasificación, la pirólisis, el craqueo o el hidrocrqueo catalítico fluidizado) que descomponen el plástico hasta un nivel molecular y transforman los residuos plásticos en materia prima secundaria.

⁴ Véase: FUNDACIÓN ELLEN MacARTHUR, A Circular Economy for Plastic (2016), https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/images/Deep-Dives/m4_circular_economy_for_plastics_big_image_2000px.jpg.

El reciclaje químico presenta una ventaja con respecto al mecánico: se puede utilizar para procesar corrientes más amplias de plásticos, incluidas las mixtas, contaminadas o de baja calidad. Una cuestión crítica, sin embargo, es que el reciclaje químico da pie a la emisión de contaminantes y aditivos tóxicos y, algunos de los cuales ya están prohibidos con arreglo a los reglamentos nacionales de diversas jurisdicciones. Como resultado de estos problemas y de los gastos conexos, las operaciones comerciales de reciclaje químico son escasas.

Tecnologías nucleares en la cadena de valor circular de los plásticos

La tecnología de la radiación, y concretamente los rayos gamma y los haces de electrones, ofrecen ventajas únicas para subsanar las deficiencias tecnológicas existentes en el reciclaje de plásticos. Estas tecnologías pueden complementar y, en algunos casos, reemplazar las tecnologías convencionales y solventar sus inconvenientes. Las investigaciones más recientes muestran que el reciclaje basado en la radiación presenta aspectos favorables, como un mejor control de los procesos, una mayor calidad de los plásticos reciclados y la capacidad de ajustar las propiedades de los productos, así como un notable ahorro en energía y costos. Las ventajas de dicha técnica radican en la capacidad de controlar cómo se forman o se rompen los enlaces químicos en los polímeros plásticos, lo que permite la alteración de las propiedades especiales de los polímeros, creando nuevas composiciones químicas, o su descomposición.

Las tecnologías de la radiación pueden descomponer los polímeros plásticos en fragmentos más pequeños de las moléculas de cadena que pueden servir como materias primas para crear nuevos productos de consumo, incorporando o no polímeros vírgenes. Según la radiorresistencia del polímero utilizado en el plástico que vaya a reciclarse, podrá lograrse con o sin cotratamiento térmico. La radiación también se puede utilizar para modificar las propiedades de los polímeros de los residuos, por ejemplo, para obtener materiales innovadores que luego se puedan emplear para fabricar nuevos productos. La irradiación puede separar los residuos plásticos de manera más eficaz, lo que permite integrarlos en corrientes de reciclaje empleadas en el reciclaje mecánico, y mejorar así la calidad y el valor de los plásticos reciclados.

Las tecnologías de la radiación pueden emplearse para irradiar incluso grandes cantidades de desechos poliméricos. Esto influye en la aplicación y la utilidad comercial de dicha tecnología. Asimismo, las tecnologías de la radiación se pueden emplear para reciclar los plásticos de los residuos y convertirlos en nuevos productos cuando otros métodos ya no resultan viables. Esto puede llegar a reducir el volumen de plásticos vírgenes a base de combustibles fósiles que entran en la cadena de valor de los plásticos, lo que redundaría en un mayor beneficio para el medio ambiente.

La irradiación para mejorar los procesos de reciclaje químico

Al combinar la irradiación con pirólisis (alteración de la composición química de los materiales mediante el uso de calor) a fin de generar nuevas materias primas químicas para plásticos, la irradiación ofrece unos procesos de producción más limpios para el reciclaje químico, ya que se evita el uso de disolventes y aditivos catalizadores. Además, tiene el potencial de mejorar la eficiencia energética del proceso y reforzar la calidad y el rendimiento del producto final.

Los haces de electrones pueden utilizarse también para aumentar y mejorar el reciclaje al optimizar la clasificación de los plásticos mixtos como resultado de una separación electrostática. El tratamiento por irradiación también permite ajustar las propiedades de los desechos poliméricos, creando nuevos compuestos y permitiendo una reconversión innovadora de los materiales de desecho. Esto contribuye a la reutilización periódica de los plásticos, lo que permite reducir aún más los residuos plásticos.

2.2. La contaminación marina por plásticos

El océano es el repositorio final de gran parte de la contaminación por plásticos de origen terrestre [25]. Cada año llegan al medio marino millones de toneladas de basura plástica, y se prevé que dichas

cantidades aumenten en los próximos años [26]. Debido a su tamaño, las partículas de plástico pueden ser ingeridas activa y pasivamente por numerosas especies marinas, algunas de las ellas importantes para la industria pesquera mundial. Todavía no se ha contabilizado de forma sistemática ni íntegra la magnitud total de la basura plástica [27].

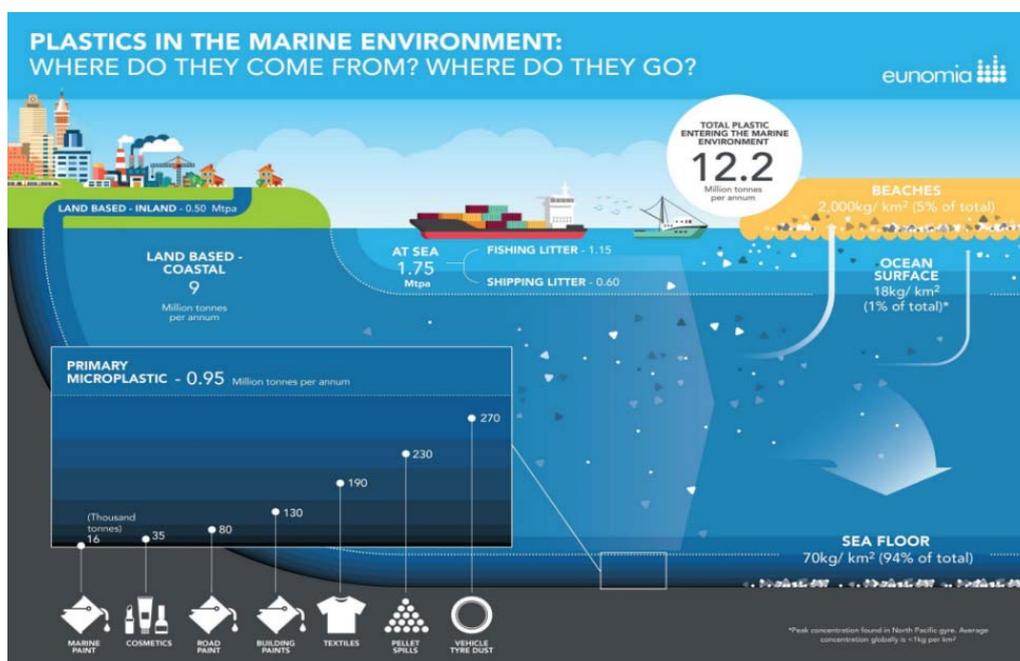


Fig. 3. Plásticos en el medio marino: ¿De dónde vienen? ¿Adónde van? (Fuente: ECOWATCH⁵)

Las repercusiones de la contaminación por plásticos sobre la flora y fauna marinas y, en sentido más amplio, sobre los ecosistemas costeros y de alta mar siguen siendo inciertas y han de vigilarse y evaluarse atentamente [28, 29]. Es más, las valoraciones recientes muestran unos primeros hallazgos preocupantes, que sugieren la acumulación de microplásticos incluso en el tracto gastrointestinal humano, lo cual podría tener efectos nocivos [30, 31].

Dadas las numerosas incertidumbres en torno a los residuos plásticos marinos, es esencial comprender mejor la magnitud y las repercusiones de la contaminación marina por plásticos en los ecosistemas y organismos costeros y marinos [3]. En el último decenio, la comunidad científica global ha puesto gran empeño en potenciar los conocimientos sobre la abundancia de determinadas partículas de plástico en los organismos acuáticos y sus efectos sobre estos [27]. Asimismo, se ha observado que las corrientes y mareas dispersan eficazmente en el agua los plásticos que se encuentran en el océano, y que estos experimentan una continua degradación física y química que los va reduciendo en partículas de plástico cada vez más pequeñas. Este proceso de degradación también puede liberar co-contaminantes, que son inherentes a la composición de la partícula plástica o están adheridos a las superficies de partículas reactivas [29]. Hacen falta muchos más datos para comprender cabalmente los efectos de estos co-contaminantes sobre los organismos marinos y para reforzar la inocuidad de los alimentos y la seguridad alimentaria, también por lo que respecta a las exportaciones de alimentos de origen marino, de las que dependen los medios de vida de poblaciones costeras de numerosos países.

⁵ Véase: ECOWATCH, 80% of Ocean Plastic Comes From Land-Based Sources, New Report Finds (2016), www.ecowatch.com/80-of-ocean-plastic-comes-from-land-based-sources-new-report-finds-1891173457.html.

Ventajas de las técnicas nucleares

Las técnicas isotópicas especializadas ofrecen una precisión y una utilidad inigualables y pueden complementar otras técnicas en el rastreo de la abundancia espacial y temporal, así como del carácter de las partículas de plástico en el medio marino y sus efectos. Por ello, contribuyen a vigilar y evaluar exhaustivamente la basura marina, a formular estrategias de mitigación a nivel de políticas y a valorar la eficacia de dichas medidas.

Los trazadores isotópicos y las técnicas de imagenología nuclear presentan diversas ventajas para la evaluación de los efectos y el estrés causados por el plástico en el medio marino: i) tienen sensibilidad analítica, lo que permite realizar proyecciones más precisas y, por ende, fiables; ii) la contaminación cruzada de las muestras suele ser mucho menos problemática que el trabajo con contaminantes orgánicos o inorgánicos, lo cual facilita un amplio intercambio entre laboratorios; iii) permiten análisis no destructivos, gracias a los cuales se pueden realizar labores experimentales en organismos vivos, y iv) ofrecen una visión general del movimiento de los contaminantes sobre el organismo entero y en su interior, así como de sus efectos. Esto proporciona un importante indicador de la posible toxicidad de los plásticos en los organismos vivos y revela, de manera muy pormenorizada, los órganos y sistemas afectados, lo que a su vez permite rastrear el estrés toxicológico real y la posible propagación en cadenas alimentarias que puede, en último término, afectar a los seres humanos mediante el consumo de alimentos de origen marino.

Asimismo, las técnicas nucleares también pueden ayudar a determinar el impacto ambiental añadido de los plásticos a medida que se degradan y emiten y absorben co-contaminantes, como PCB (bifenilos policlorados) y pirorretardantes halogenados, así como oligoelementos tales como el mercurio y el plomo. Es cada vez más importante calcular las vías y las repercusiones de dichos procesos conforme aumenta la cantidad de plásticos en el océano y los océanos experimentan un creciente calentamiento por motivo del cambio climático.

2.3. El papel y el enfoque del OIEA

Conforme a su Estatuto,⁶ el OIEA tiene el mandato de acelerar y aumentar la contribución de la ciencia y la tecnología nucleares con fines pacíficos. Así pues, actúa como un centro para el desarrollo y la transferencia de tecnologías y aplicaciones nucleares. Mediante las actividades de investigación del OIEA se someten las tecnologías nucleares a rigurosos procesos de investigación y validación. Cuando las tecnologías nucleares en cuestión están lo suficientemente estudiadas, pueden entonces transferirse a todos los países, en especial a los Estados Miembros en desarrollo, a través del programa de cooperación técnica del OIEA.

El OIEA cuenta con una dilatada y exitosa trayectoria de apoyo a la investigación y el desarrollo de las aplicaciones de las tecnologías nucleares. Mediante su Departamento de Ciencias y Aplicaciones Nucleares (NA), el OIEA mantiene y dirige laboratorios para el medio ambiente situados en Austria y en Mónaco.⁷ Dichos laboratorios apoyan y llevan a cabo actividades que responden a las necesidades de desarrollo de los Estados Miembros respecto de diversas esferas temáticas. Cuentan con un sólido

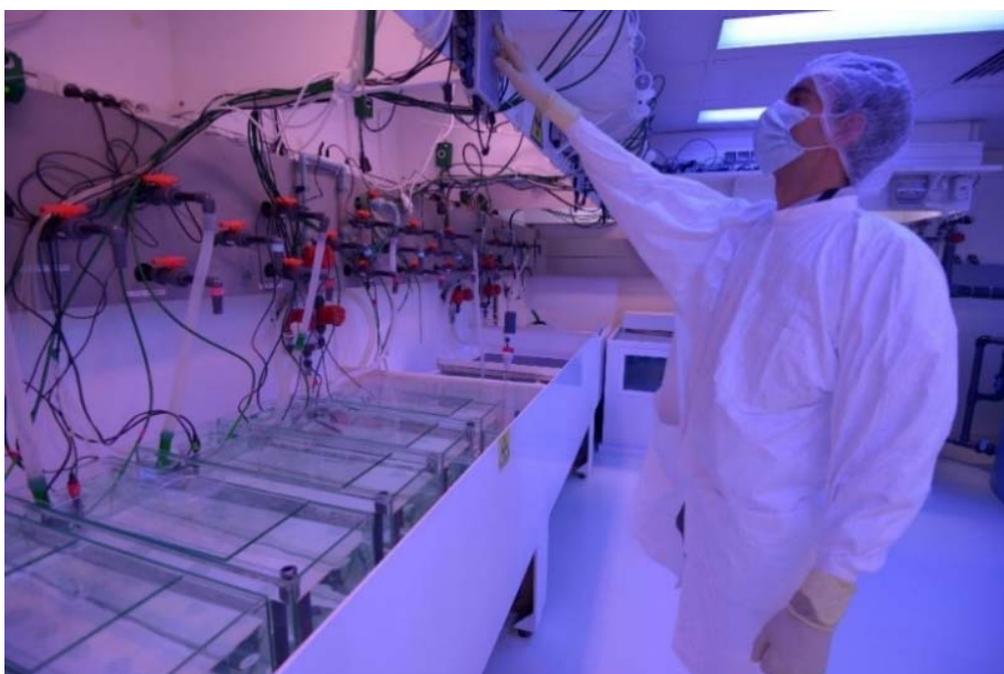
⁶ Según el artículo III del [Estatuto](#), el OIEA está autorizado “a fomentar y facilitar en el mundo entero la investigación, el desarrollo y la aplicación práctica de la energía atómica con fines pacíficos; y, cuando se le solicite, a actuar como intermediario para obtener que un miembro del Organismo preste servicios o suministre materiales, equipo o instalaciones a otro; y a realizar cualquier operación o servicio que sea de utilidad para la investigación, el desarrollo o la aplicación práctica de la energía atómica con fines pacíficos”.

⁷ El Laboratorio de Ciencias e Instrumentación Nucleares desarrolla, adapta y transfiere instrumentación nuclear y aplicaciones de aceleradores a los Estados Miembros para un amplio abanico de operaciones, que abarcan desde la monitorización radiológica del medio ambiente hasta la ciencia de los materiales. Los tres Laboratorios del OIEA para el Medio Ambiente Marino en Mónaco se dedican a comprender y preservar la salud del medio marino y a desarrollar de forma sostenible los recursos ambientales.

historial en la realización de actividades aplicadas de investigación y desarrollo, la prestación de servicios analíticos y de capacitación, y la transferencia de tecnologías y técnicas nucleares probadas a los Estados Miembros.

El OIEA realiza actividades de investigación y desarrollo no solo en sus propios laboratorios, sino también mediante sus amplias redes de investigación, integradas por instituciones de investigación, el mundo académico y laboratorios de referencia; y lo hace a través de su programa de investigación coordinada y su sistema de centros colaboradores⁸.

Varios centros colaboradores guardan relación directa con NUTEC Plastics. Si bien algunas instituciones asociadas disponen de conocimientos técnicos específicos sobre el tratamiento por irradiación de polímeros, de polímeros de residuos y de biocompuestos, otras centran su investigación en los estudios marinos y oceanográficos, como la contaminación del medio marino. Los posibles beneficios de NUTEC Plastics son mayores para las regiones y los países que cuentan con estas designaciones de centro colaborador del OIEA.



En los Laboratorios del OIEA para el Medio Ambiente se realizan experimentos a diario.

Más allá de su sistema de centros colaboradores y la labor realizada en sus laboratorios, el OIEA también alienta la investigación, el desarrollo y el uso práctico de las tecnologías y las aplicaciones nucleares en los Estados Miembros de todo el mundo y presta asistencia al respecto. Reúne a las instituciones de investigación de sus Estados Miembros en desarrollo y desarrollados para que colaboren en proyectos de investigación de interés común, en los conocidos como proyectos coordinados de investigación (PCI). A través de estos PCI, el OIEA, en calidad de órgano de coordinación, adjudica contratos de investigación, técnicos y de doctorado, así como acuerdos de investigación, a institutos de los Estados Miembros.

El OIEA cuenta con una demostrada trayectoria en la prestación de apoyo a la investigación, el desarrollo y la asimilación de técnicas nucleares concretas en el contexto de la cadena de valor de los plásticos.

⁸ Para obtener más información básica sobre los centros colaboradores, visite:

https://www.iaea.org/sites/default/files/16/07/iaea_collaborating_centres_scheme_external_guide_v1.1_april_2016.pdf
(en inglés).

Aplica la ciencia y la tecnología nucleares para complementar las técnicas convencionales existentes y aportar nuevas soluciones que ayuden a sus Estados Miembros.

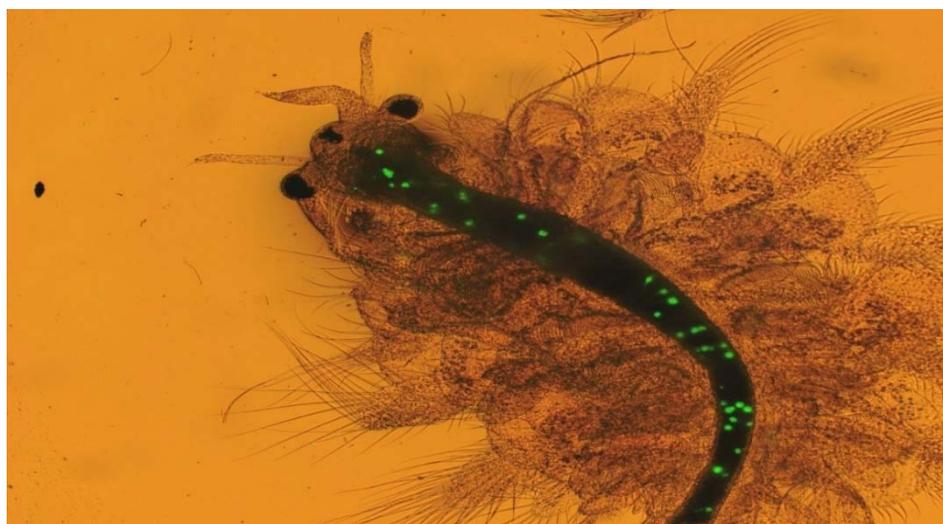
En el marco de NUTEC Plastics, los Laboratorios del OIEA para el Medio Ambiente seguirán reforzando y ampliando el desarrollo de técnicas fiables y eficaces en relación con los costos para evaluar el carácter y la abundancia espacial y temporal de los plásticos marinos a fin de comprender mejor su origen, los mecanismos por los cuales se transportan, su destino y sus efectos. Esto comprende el establecimiento de protocolos armonizados y normalizados para detectar microplásticos en muestras ambientales, la capacitación de científicos y técnicos, y el establecimiento de técnicas en consonancia con las mejores prácticas y los avances más recientes en la ciencia. En paralelo, una vigilancia comparativa de los microplásticos puede ayudar a cuantificar y determinar el impacto ambiental de la planta de demostración.

Monitorización del medio marino

Mediante el uso de técnicas nucleares, el OIEA apoya a los Estados Miembros que trabajan para lograr, a nivel nacional, los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas y sus correspondientes metas, así como en el marco del Decenio de las Naciones Unidas de las Ciencias Oceánicas para el Desarrollo Sostenible. Esta labor abarca los efectos antropógenos y del cambio climático sobre los océanos, como la contaminación marina o de origen terrestre y el calentamiento, la acidificación y la desoxigenación de los océanos. Desde 2016 los Laboratorios del OIEA para el Medio Ambiente vienen estudiando el impacto de los plásticos en los organismos marinos. Los Gobiernos utilizan los hallazgos de estos estudios como información científica en la que se basan para adoptar decisiones sobre políticas.

El OIEA emplea técnicas de radiotrazadores para estudiar el destino de los contaminantes o las biotoxinas en entornos costeros, así como la influencia que los factores de estrés globales, como el cambio climático, ejercen sobre los organismos marinos. Estos instrumentos están siendo importantes para examinar cómo repercute el plástico en la vida acuática.

Mediante el programa de cooperación técnica del OIEA, muchos países están reforzando sus conocimientos sobre la vigilancia y la mitigación de distintos contaminantes, como la evaluación de los radionucleidos y contaminantes no radiactivos y sus efectos sobre el medio ambiente y los ecosistemas. El OIEA es el mayor proveedor mundial de materiales de referencia relativos a radionucleidos en distintas matrices, como peces, plantas, tierra, agua u otras materias, algunos de los cuales funcionan como patrones internacionales de medida, y se los proporcionan a laboratorios de todo el mundo para ayudarlos a velar por que se apliquen técnicas analíticas nucleares y no nucleares adecuadas para obtener resultados precisos, verosímiles y fiables.



Primer plano de una artemia después de haber consumido partículas de microplásticos en los Laboratorios del OIEA para el Medio Ambiente. (Fotografía: F. Oberhaensli/OIEA)

Las capacidades ya creadas por el programa de CT con respecto al muestreo de la contaminación marina, el control de la floración de algas, el análisis de contaminantes (incluidos metales pesados, compuestos orgánicos, radiactividad y toxinas), la inocuidad de los alimentos marinos, así como los experimentos de laboratorio que utilizan radiotrazadores, sientan una sólida base para la realización de actividades de vigilancia y evaluación de microplásticos. Las capacidades existentes en dichas esferas se podrían ampliar para dar cabida a la caracterización y la evaluación de la contaminación por plásticos mediante tecnología puntera adicional (como la microespectroscopía de infrarrojos con transformadas de Fourier, Raman y GC-MS, entre otras), así como a actividades de capacitación especializada.

Radiación de polímeros

En las décadas de 1980 y 1990, ya había investigaciones básicas en curso sobre la radiación de polímeros en el marco de los PCI, especialmente centradas en los polímeros para aplicaciones biomédicas y bioquímicas, los polímeros para uso industrial y médico, o el tratamiento por irradiación de polímeros naturales autóctonos.⁹ En la década de 2000 se siguió investigando y desarrollando la tecnología de la radiación con respecto a los polímeros,¹⁰ que también incluía los injertos por radiación para desarrollar adsorbentes y membranas novedosos.¹¹ Otro PCI se centró en elaborar productos tratados con irradiación utilizando para ello polímeros naturales a fin de generar productos con valor agregado y comercializables para su uso en la agricultura, la asistencia sanitaria, la industria y el medio ambiente.¹² Otros PCI sobre tecnología de la radiación abarcaban la generación de nanocompuestos; nuevas formulaciones de revestimientos resistentes a la abrasión y a rasguños mediante el uso de radiación; la polimerización iniciada por radiación para revestimientos con un acabado superficial reforzado,¹³ y el desarrollo de nuevos materiales de envasado con polímeros naturales y sintéticos utilizando técnicas de la radiación y evaluando los efectos de esta sobre los materiales de envasado para alimentos.¹⁴ Se han dedicado numerosos PCI a otras aplicaciones industriales de las tecnologías de la radiación,¹⁵ muchos de los cuales han cosechado éxitos en la transferencia de tecnología y han propiciado la aparición de industrias sostenibles, lo cual pone de manifiesto el historial de participación del Organismo y de sus asociados en dichas iniciativas.

Un nuevo PCI (aprobado en 2020) titulado “Reciclaje de desechos poliméricos para materiales estructurales y no estructurales mediante radiación ionizante” está en condiciones de vertebrar la investigación y el desarrollo del componente de NUTEC Plastics dedicado al reciclaje. En una reunión de consulta celebrada a finales de 2020, en la que participaron expertos en la materia y contrapartes de todo el mundo, se ofreció una visión general clara de las tecnologías que se estaban sometiendo a ensayos y se formularon recomendaciones sobre la mejor manera de avanzar. Muchas tecnologías se encuentran en diversas fases de investigación y ensayo.

⁹ Se trata de: PCI385 “Polímeros modificados por irradiación para aplicaciones biomédicas y bioquímicas” (1980-1983), PCI927 “Modificación por irradiación de polímeros para uso industrial y médico” (1984-1989), PCI1018 “Estabilidad y estabilización de polímeros sometidos a irradiación” (1993-1997) y PCI931 “Tratamiento por irradiación de polímeros naturales autóctonos” (1997-2000).

¹⁰ PCI565 “Control de los efectos de la degradación en el tratamiento por irradiación de polímeros” (2003-2006).

¹¹ PCI1434 “[Desarrollo de adsorbentes y membranas novedosos mediante injerto por radiación con fines de separación selectiva](#)” (2007-2011) (en inglés).

¹² PCI1467 “[Desarrollo de productos a base de polímeros naturales tratados con irradiación para su aplicación en la agricultura, la asistencia sanitaria, la industria y el medio ambiente](#)” (2007-2013) (en inglés).

¹³ PCI1783 “[Curado de compuestos por radiación para mejorar sus características y su utilidad en la asistencia sanitaria y la industria](#)” (2011-2015) (en inglés).

¹⁴ PCI1947 “[Aplicación de la tecnología de la radiación en la elaboración de materiales de envasado avanzados para alimentos](#)” (2013-2017) (en inglés).

¹⁵ PCI1539 “[Tratamiento radiológico de aguas residuales para su reutilización, en particular las que contienen contaminantes orgánicos](#)” (2010-2016) (en inglés); PCI2220 “[Inactivación de riesgos biológicos mediante radiación utilizando aceleradores de haces de electrones de alta potencia](#)” (2018-2022) (en inglés); PCI2220 “[Inactivación de riesgos biológicos mediante radiación utilizando aceleradores de haces de electrones de alta potencia](#)” (2018-2022) (en inglés); PCI2216 “[Tecnologías basadas en la radiación para el tratamiento de contaminantes orgánicos emergentes](#)” (2019-2023) (en inglés).

Las recomendaciones formuladas al OIEA en la reunión de consulta ponen de relieve la importancia del componente de NUTEC Plastics dedicado al reciclaje. El potencial de la tecnología de la radiación para convertir los desechos poliméricos en materias primas y nuevos materiales para aplicaciones estructurales y no estructurales de alto rendimiento está consolidado, de ahí que el OIEA haya recibido solicitudes de los Estados Miembros para una mayor adopción, promoción y transferencia de tecnología. En concreto, se recomienda al OIEA que analice y fomente el uso de tecnologías en línea y modulares de tratamiento por irradiación que complementen los procesos mecánicos y químicos existentes, como ejemplo de métodos de fabricación ampliables para lograr soluciones sostenibles ecológicas y eficaces en relación con los costos para la producción y el reciclaje de plásticos. Con este fin, el OIEA está trabajando para ayudar a establecer iniciativas de cooperación internacional en el plano gubernamental, industrial y científico, así como para incrementar la visibilidad, la presencia y la concienciación mundial sobre la utilidad de las aplicaciones tecnológica y físicamente seguras de las tecnologías de la radiación para reciclar los desechos poliméricos.

Los resultados de las actividades de investigación y desarrollo realizadas por el OIEA se transfieren a sus Estados Miembros en forma de conocimientos sólidos y tecnología demostrada. El programa de cooperación técnica del OIEA ya ha creado capacidades nacionales y ha mejorado las capacidades técnicas de los Estados Miembros en cuanto al uso de la tecnología de la radiación para el reciclaje de polímeros. Muchos Estados Miembros ya se han beneficiado de la transferencia de tecnologías como los haces de electrones y los irradiadores gamma para el tratamiento de materiales y la creación de materiales avanzados.

3. El enfoque de NUTEC Plastics basado en los resultados

3.1. La contribución de NUTEC a la transición a una economía circular: una teoría del cambio

El paso de un modelo lineal a otro circular

La Agenda 2030 incluye el compromiso de erradicar la pobreza multidimensional y alcanzar un desarrollo sostenible y equitativo para todos. El uso de las tecnologías nucleares para promover el cambio de una economía de los plásticos lineal a una circular es una contribución inherente a la Agenda 2030, cuyo objetivo 12 recoge el compromiso de la comunidad internacional con unas modalidades de consumo y producción sostenibles, mientras que en el ODS 12.5 se hace específicamente un llamamiento a los países para "...reducir considerablemente la generación de desechos mediante actividades de prevención, reducción, reciclado y reutilización" de aquí a 2030.

Para abordar las causas profundas de la contaminación por plásticos es preciso adoptar soluciones sistémicas que reduzcan tanto la demanda de materiales fabricados a partir de combustibles fósiles finitos como las externalidades negativas asociadas a la cadena de valor actual de los plásticos. En pocas palabras: la comunidad global debe disminuir la cantidad de plástico que entra en la economía a partir de materias primas vírgenes y que la abandona sin que su valor añadido haya aumentado. Dicho de otro modo, el mundo tiene que pasar de un enfoque de gestión de los residuos a uno basado en la gestión de los recursos, lo que se puede lograr abandonando un modelo lineal que consista en "tomar, hacer, desechar" para apostar por una economía circular. Este enfoque permite adoptar medidas en numerosas etapas de la cadena de valor, como se muestra a continuación.

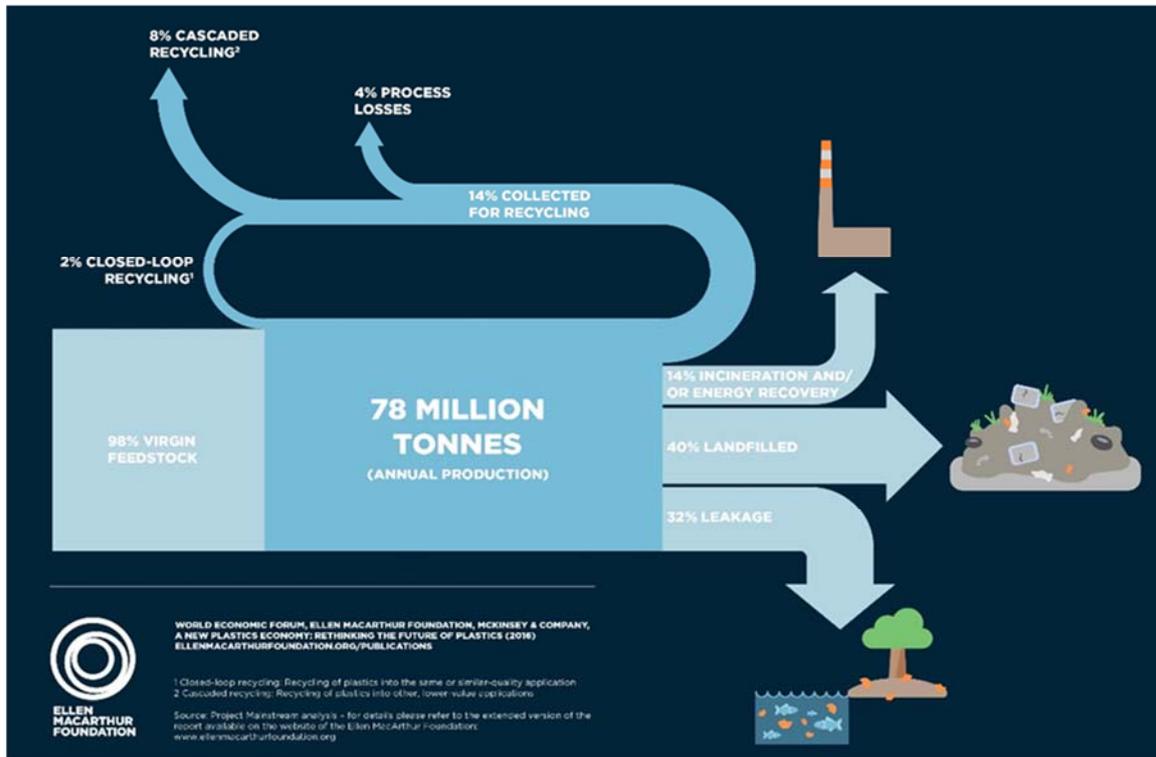
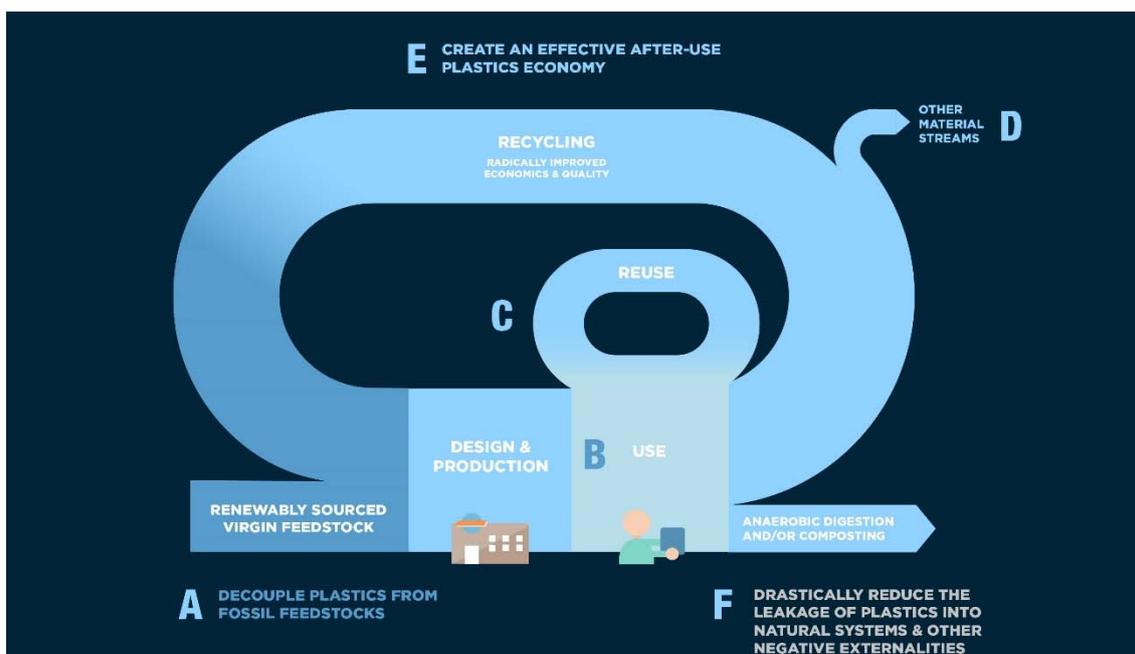


Fig. 4. Flujos mundiales de los embalajes de plástico (2013). (Fuente: FUNDACIÓN ELLEN MacARTHUR)

El modelo "Plastics to Ocean" (P2O) [1] es un "modelo único en su categoría" que se ha desarrollado para analizar, a escala mundial, las existencias y los flujos de plásticos y de residuos plásticos en la sociedad. Este modelo permite realizar proyecciones y análisis mundiales respecto de todos los componentes del sistema de gestión de los residuos plásticos, y NUTEC Plastics lo emplea para evaluar el impacto económico de las tecnologías nucleares en la economía de los residuos plásticos. Actualmente, los parámetros de entrada del modelo se basan en predicciones y estimaciones. La fiabilidad de las proyecciones P2O debería aumentar en cuanto las plantas piloto entren en funcionamiento y permitan obtener datos de rendimiento claves.



- A. Reducir la producción de plástico
- B. Reducir el uso de plástico
- C. Aumentar la reutilización de productos plásticos (para evitar los plásticos de un solo uso/los plásticos usados y el incremento exponencial de los residuos plásticos)
- D. Aumento del reciclaje de residuos plásticos para transformarlos en otros productos
- E. Aumento de la calidad de los residuos reciclados para su utilización como insumos en la producción de plástico/en sustitución de insumos derivados del petróleo
- F. Eliminación de los residuos plásticos de los océanos y la tierra

Fig. 5. Objetivos de la nueva economía de los plásticos. (Fuente: FORO ECONÓMICO MUNDIAL, FUNDACIÓN ELLEN MACARTHUR, MCKINSEY CENTER FOR BUSINESS AND ENVIRONMENT, Ref. [4])

3.2. Objetivo y resultados prácticos

El objetivo general de NUTEC Plastics es *prestar asistencia a los Estados Miembros del OIEA para que integren las técnicas nucleares en sus esfuerzos encaminados a afrontar los desafíos asociados a la contaminación por plásticos.*

Los dos resultados prácticos principales son:

1. Una mayor comprensión a escala mundial del alcance de la contaminación marina por plásticos y de sus efectos.
2. Una mejora de los métodos de reciclaje y producción gracias a la utilización de técnicas de irradiación como complemento a las prácticas convencionales.

Mayor comprensión a escala mundial del alcance de la contaminación marina por plásticos y de sus efectos

Este componente se propone ayudar a los Estados Miembros a que mejoren la gestión de los plásticos en el medio marino evaluando la situación inicial y las hipótesis previstas respecto de la contaminación por plásticos en sus aguas territoriales y en las inmediaciones de estas. NUTEC Plastics fomentará la capacidad de laboratorios de todo el mundo para emplear técnicas isotópicas y de otro tipo a fin de observar y evaluar las consecuencias de la contaminación marina por plásticos, así como para permitir el intercambio de datos, conocimientos y prácticas óptimas en esta esfera. Varios Estados Miembros de todas las regiones geográficas ya han establecido, con la ayuda del OIEA, unas robustas capacidades de monitorización del medio marino y NUTEC Plastics podría reportar beneficios adicionales en este sentido.

Producto 1.1: Sensibilización a escala global sobre el uso de técnicas isotópicas para la monitorización de los plásticos en el medio marino y la evaluación de sus efectos.

Este producto tiene por fin sensibilizar a escala global sobre las ventajas de las técnicas isotópicas en términos de exactitud y precisión a fin de colmar las lagunas en términos de conocimientos a nivel mundial en materia de monitorización y evaluación de los efectos de los microplásticos y los nanoplásticos presentes en el medio marino.

Producto 1.2: Selección de asociados públicos y privados para que presten apoyo a las capacidades de monitorización mejoradas de los laboratorios marinos.

Con este producto se pretende aprovechar las alianzas necesarias con asociados múltiples con el objetivo de facilitar una utilización más amplia de las técnicas isotópicas para una monitorización y evaluación más exactas de los efectos de los microplásticos y los nanoplásticos presentes en el medio marino.

Producto 1.3: Laboratorios operacionales, dotados de equipos adecuados, personal capacitado y protocolos apropiados.

Este producto se centra en la transferencia de equipo, servicios de asesoramiento técnico y actividades de capacitación, así como en la prestación de apoyo a los países en la elaboración de protocolos para la recolección, la cartografía y el rastreo de los microplásticos presentes en los océanos y la evaluación de sus efectos en los ecosistemas marinos.

Producto 1.4: Red de Monitorización NUTEC Plastics.

Este producto establecerá una red mundial de laboratorios con capacidad para monitorizar y evaluar los efectos de los plásticos presentes en el medio marino a fin de propiciar el intercambio de datos, conocimientos y prácticas óptimas. Estos laboratorios servirán de centros de recursos regionales para ofrecer servicios y actividades de aprendizaje de manera continuada.

Producto 1.5: Conocimientos sobre fuentes, distribución, transporte, efectos y destino de los nanoplásticos y los microplásticos.

Este producto promoverá la investigación y el conocimiento en relación con los nanoplásticos y los microplásticos.

Mejora de los métodos de reciclaje y producción mediante el uso de técnicas de irradiación

El tratamiento por irradiación es una técnica probada en laboratorios científicos que puede complementar el reciclaje mecánico y químico. No obstante, no es una solución que la comunidad mundial del plástico conozca suficientemente o considere como una alternativa. Este componente tiene como objetivo ofrecer a las partes interesadas pruebas de la eficacia y la eficiencia de las técnicas de irradiación para mejorar los métodos de reciclaje existentes. También acelerará el proceso de transferencia de tecnología del laboratorio a su uso comercial al implicar a actores privados en el proceso de validación y establecer alianzas con miras a promover la aceptación temprana de esas técnicas.

La tecnología de la radiación es una técnica que complementa los actuales procesos de reciclaje químico y mecánico. Los países interesados en llevar a cabo actividades en el marco de este componente deben asegurarse de que se dan una serie de requisitos previos en la cadena de valor de los plásticos y de que dispone de unos marcos reguladores propicios.

Producto 2.1: Aumento de la sensibilización a escala mundial sobre la ventaja comparativa que ofrece la tecnología de la radiación en el procesamiento y el reciclaje del plástico.

Con este producto se pretende aumentar la visibilidad de las técnicas de irradiación como parte de la solución al problema de la contaminación por plásticos sensibilizando a la comunidad mundial de los plásticos.

Producto 2.2: Selección de asociados públicos y privados para promover la transferencia de tecnologías de la radiación de los laboratorios a las plantas de reciclaje.

Este producto tiene como objetivo aprovechar las alianzas necesarias con asociados múltiples para facilitar una utilización más amplia de las técnicas de irradiación como complemento de los procesos existentes de producción y reciclaje de plásticos.

Producto 2.3: Fase 1: Instalación de aparatos de irradiación experimentales en las plantas de reciclaje.

Este producto se centra en garantizar que las capacidades institucionales existentes sean adecuadas para desarrollar programas piloto sobre tecnologías de la radiación para la gestión de los residuos plásticos. Promueve la transferencia de equipo, actividades de capacitación y asesoramiento a cargo de expertos a propósito del establecimiento de los protocolos necesarios y de los planes de acción para el desarrollo de la planta experimental. Asimismo, el producto contempla el proceso de evaluación y validación de la tecnología transferida por medio de análisis costo-beneficio y el desarrollo de modelos de viabilidad para candidatos/países.

Producto 2.4: Fase 2: Puesta en funcionamiento de la planta de demostración con la colaboración de asociados públicos/privados, dando así una dimensión comercial a esta tecnología.

Este producto se centra en el apoyo al proceso de establecimiento de una planta de demostración, así como en la prestación de asesoramiento de expertos y la supervisión por estos del aparato de irradiación instalado y en funcionamiento en la planta.

3.3. Elaboración del modelo económico

La basura marina está asociada a costos anuales de 13 000 millones de dólares de los Estados Unidos, que obedecen principalmente a los efectos adversos que tiene en el sector pesquero, el turismo y la biodiversidad [32]. El costo social y ambiental global de la contaminación por plásticos se estima en unos 139 000 millones de dólares de los Estados Unidos anuales [33]. La mitad de esta cifra procede de los efectos en el clima de las emisiones de gases de efecto invernadero vinculadas a la producción y el transporte de plásticos. Un tercio se debe a los efectos de la contaminación atmosférica, del agua y terrestre conexas en la salud, las cosechas y el medio ambiente, y otra parte obedece a los costos asociados a la eliminación de estos residuos. Cualquier iniciativa encaminada a reducir esta carga social constituiría un resultado positivo al que ha contribuido el OIEA.

Valor añadido de las tecnologías nucleares en la cadena general de valor del plástico

En esta sección se presenta el enfoque metodológico empleado para estimar de qué manera las tecnologías de base nuclear podrían contribuir a acelerar la transición a una economía circular del plástico. Este enfoque ayudará a estimar mejor el “valor añadido” que pueden aportar las tecnologías nucleares a la cadena de valor de los plásticos. Explicitar el valor añadido esperado de estas tecnologías experimentales ayuda a poner en contacto a laboratorios y plantas de reciclaje comerciales, otras entidades del sector privado e iniciativas de validación técnica que cuentan con el apoyo de programas de cooperación técnica, lo que reduce el tiempo necesario para la transferencia de tecnología y aumenta la eficacia de los esfuerzos del OIEA.

El enfoque metodológico opera a dos niveles, y emplea sistemas avanzados de modelización económica y financiera.

En primer lugar, se llevó a cabo un análisis costo-beneficio preliminar de plantas de distintos tamaños a fin de evaluar la posible ventaja de estas instalaciones con respecto a las ya existentes. El análisis se basó en la hipótesis de que la tecnología de la radiación puede mejorar los procesos actuales de reciclaje

y producir gránulos de mayor calidad por medio de un proceso de ahorro de energía cuyos costos generales de producción son más bajos.¹⁶ Este enfoque metodológico se aplicará durante la realización del análisis para garantizar que la tecnología es objeto de un proceso riguroso de validación, y permitirá actualizar los datos más importantes relacionados con el mercado y la industria en cuanto estén disponibles, así como contextualizar cada propuesta según sea necesario.

En segundo lugar, se han enumerado los beneficios que se espera obtener de las medidas coordinadas en el marco de NUTEC Plastics, comparando la situación actual con las posibles consecuencias de adoptar estas nuevas tecnologías. Esto se ha llevado a cabo mediante un análisis de sensibilidad del modelo P2O anteriormente mencionado. Se determinaron y modificaron parámetros concretos de este modelo para tener en cuenta las mejoras tecnológicas supuestas en los niveles micro. Se llevarán a cabo actividades adicionales para incluir los beneficios esperados del aumento de las capacidades de monitorización de los microplásticos presentes en el medio marino y de las decisiones conexas que se adopten basadas en criterios científicos una vez se disponga de información detallada.

Por medio del modelo P2O, se probó la posible reducción que la tecnología de la radiación puede ofrecer en términos de disminución del vertido de plásticos al océano. Del ejercicio de modelización se desprende que la combinación de la tecnología de la radiación con el proceso de clasificación o los procesos de reciclaje mecánico o químico reduciría la basura marina. Como se muestra en la figura 6, cuando se combina la radiación con un proceso de clasificación selectiva, se reduce la basura en 1,83 kg/t, mientras que, cuando se utiliza junto con procesos mecánicos de reciclaje, esta reducción es de 2,3 kg/t. La mayor reducción en la cantidad de basura marina se obtendría combinando la tecnología de la radiación con la conversión química a monómeros y a hidrocarburos (4,41 kg/t). La conclusión del análisis es que, si se combina la conversión química con la radiación, **la reducción estimada en la cantidad de basura en los océanos es más de dos veces superior** a la que se obtiene al utilizar la tecnología de la radiación en el proceso de clasificación o en combinación con procesos de reciclaje mecánico.

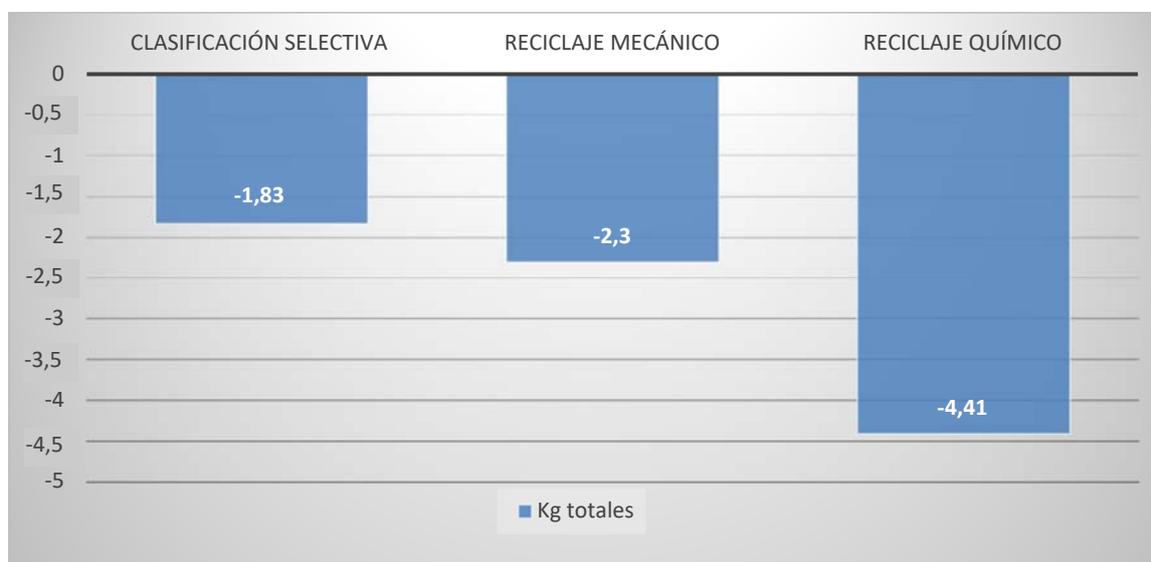


Fig. 6. Reducción potencial en las cantidades vertidas al océano al utilizar la tecnología de la radiación junto con tecnologías convencionales, en t. Elaboración propia, a partir de instrumentos del modelo P2O.

¹⁶ Hipótesis basadas en las conclusiones de la reunión virtual que el OIEA celebró del 27 al 30 de octubre de 2020 para mantener consultas con los expertos, durante la que se confirmó que la radiólisis puede reducir las temperaturas de la pirólisis en 150 grados, lo que equivale a un ahorro de energía de hasta 700Kj/Kg, ratificando así las conclusiones de Ponomarev, A. V. (2020). Radiolysis as a Powerful Tool for Polymer Waste Recycling. *High Energy Chemistry*, 54, 194-204.

Estos resultados preliminares se basan en las hipótesis relativas a las tecnologías de reciclaje mejoradas. Son conservadores, ya que los plásticos reciclados solo representan el 9 % del total de los residuos plásticos gestionados; no obstante, se está trabajando en un modelo dinámico, en el que se tienen en cuenta los aumentos previstos en los volúmenes de reciclaje (de hasta el 60 %), que permitirá examinar el posible efecto de las nuevas tecnologías introducidas en el marco de NUTEC Plastics en la transición general a una economía circular [34].

3.4. Sostenibilidad, riesgos y mitigación

Lograr una transición global a una economía circular del plástico depende de la mayor eficiencia y eficacia en relación con el costo del plástico reutilizado y reciclado respecto del plástico nuevo fabricado a partir de combustibles fósiles. La ventaja competitiva que ofrecen las tecnologías de la radiación es un elemento clave para el éxito de esta operación.

Un instrumento integral de vigilancia que presente los resultados de la gestión hará un seguimiento de los avances en la ejecución de las actividades de NUTEC Plastics y de los gastos relacionados con estas, y el modelo P2O anteriormente mencionado se utilizará para evaluar los resultados obtenidos y hacer proyecciones a partir de ellos. El modelo permitirá asimismo señalar los principales obstáculos a las intervenciones específicas previstas, lo que posibilitará llevar a cabo actuaciones concretas para solucionar las deficiencias en el carácter sostenible de la transición hacia una economía circular del plástico. Estos argumentos allanarán el terreno para que el plástico deje de considerarse como un residuo y se vea como una materia prima valiosa.

Son muchas las incertidumbres alrededor de los distintos escenarios posibles para lograr los objetivos de NUTEC Plastics, y están supeditadas a una serie de factores y de actores ajenos a esta iniciativa. Durante la elaboración de esta teoría del cambio se determinó un conjunto de condiciones previas clave, y se formularon distintas hipótesis en relación con medidas conexas que deben adoptarse para que NUTEC Plastics alcance los resultados deseados. Que alguna de estas no se materialice podría constituir un riesgo para NUTEC Plastics.

3.5. Recursos necesarios y financiación

Fortalecer la capacidad de un laboratorio marino costaría aproximadamente 1,1 millones de euros (incluida la evaluación de las necesidades, actividades de creación de capacidad y el equipo), y el costo de una planta piloto de irradiación ascendería aproximadamente a 2,1 millones de euros (incluidas las actividades de creación de capacidad, los estudios de viabilidad y el equipo y la construcción). Estas cifras son orientativas. Los proyectos y los presupuestos específicos de NUTEC Plastics se elaborarán en consulta con los Estados Miembros que los soliciten. Los requisitos financieros de proyectos concretos se fijarán en consecuencia.

4. Alianzas

El problema mundial de los plásticos es transfronterizo por naturaleza y afecta a todos los países del mundo, siendo las economías en desarrollo las que soportan la mayor carga. Persisten los problemas en la cadena de valor del plástico y un grupo variado de agentes se ocupa de resolverlos. El mandato del OIEA abarca solo una parte de la cadena de valor del plástico mediante la aplicación de la ciencia y la tecnología nucleares como complemento a los métodos existentes. Una solución holística y sostenible a la carga mundial del plástico requiere un enfoque integrado y global que solo es posible lograr en colaboración con agentes complementarios. Será fundamental colaborar con las iniciativas nacionales, regionales e internacionales existentes, tanto a nivel mundial como nacional. Ello incluye la colaboración con entidades de las Naciones Unidas, bancos multilaterales de desarrollo, organizaciones filantrópicas,

alianzas a gran escala existentes, como plataformas de múltiples partes interesadas, el sector privado e iniciativas consolidadas de alianzas público-privadas, así como instituciones científicas y de investigación.

El OIEA tiene la intención de proporcionar valor añadido a las alianzas existentes que luchan contra el problema mundial de los plásticos de las siguientes formas:

- ofreciendo a los asociados una evaluación precisa de la caracterización de los plásticos, su abundancia, su distribución y sus efectos, a fin de orientar las decisiones en materia de formulación de políticas y gestión, o
- ofreciendo opciones novedosas para el reciclaje de plásticos que utilizan tecnologías de la radiación para complementar los métodos convencionales con el objetivo de llenar las lagunas no abordadas hasta ahora por ninguna iniciativa de tratamiento de los residuos plásticos.

Con ese fin, el OIEA intensificará su colaboración con los asociados pertinentes para fomentar la conciencia sobre las ventajas únicas que presentan las tecnologías nucleares como complemento de las existentes y para tratar de establecer alianzas que permitan agilizar la transición a una economía circular del plástico.

El OIEA tiene la intención de fortalecer su colaboración con organizaciones homólogas dentro del sistema de las Naciones Unidas que están trabajando en aspectos complementarios relacionados con el desafío mundial de los plásticos. Entre ellas, la COI-UNESCO, la FAO, el PNUD, el PNUMA y la ONUDI, que participan en el Decenio de las Ciencias Oceánicas para el Desarrollo Sostenible, del que el OIEA también es asociado oficial. El OIEA ya está colaborando con muchas de estas organizaciones que trabajan de forma directa o indirecta en el ámbito de los residuos plásticos en todo el mundo y sus diversos efectos en la tierra, los océanos y la atmósfera.

El sector privado será un asociado sumamente importante en la transición a una economía circular del plástico, con el respaldo de medidas gubernamentales sólidas y una profunda implicación de los gobiernos mediante políticas propicias y un marco jurídico favorable. Por consiguiente, el OIEA colaborará con las alianzas público-privadas (p. ej., la GPAP), las fundaciones y las asociaciones del sector privado existentes más destacadas, así como empresas del sector privado que fabrican productos plásticos, a fin de ensayar y aplicar la viabilidad y la eficacia de la radiación para el reciclaje de plásticos. Si se aprovechan al máximo las alianzas con la comunidad empresarial, las alianzas público-privadas consolidadas, las fundaciones, las asociaciones en el ámbito de los plásticos y otras partes interesadas pertinentes, se aumentará la concienciación sobre los beneficios de la ciencia y la tecnología nucleares para gestionar los residuos plásticos cuando se ponen en práctica innovaciones tecnológicas y soluciones innovadoras y se hará llegar la labor de divulgación a otros posibles asociados.

Consciente de que hacen falta inversiones a gran escala para lograr la transición necesaria a unas prácticas de gestión de los plásticos más sostenibles, el OIEA trabajará estrechamente con instituciones financieras e instituciones financieras de desarrollo internacionales como pilares de inversión en las iniciativas nacionales y del sector privado para cerrar el ciclo de la economía circular del plástico.

Se procurará colaborar con otras instituciones técnicas y científicas para intercambiar información y aprovechar las contribuciones, por ejemplo:

- instituciones de investigación centradas en la contaminación por plásticos en la nieve o los testigos de hielo del Ártico, como el Instituto Alfred Wegener Centro Helmholtz para la Investigación Polar y Marina, en Alemania; el Instituto de Investigación sobre la Nieve y las Avalanchas, en Suiza; el Consejo de Investigación de Noruega; el Centro Danés de Investigación Marina; el Estudio Británico de la Antártida; el Instituto Polar Noruego y ArcticNet, entre otras, o
- partes interesadas con capacidades complejas de modelización de sistemas, como la Organización Meteorológica Mundial (OMM), el Servicio Geológico de los Estados Unidos y el Centro Internacional de Física Teórica.

5. Ejecución

5.1. Enfoque para la ejecución

Las actividades descritas en el presente documento sobre NUTEC Plastics se llevarán a cabo utilizando una serie de mecanismos de ejecución del OIEA bien establecidos, como proyectos de CT, PCI y otras actividades programáticas. Los dos componentes principales de NUTEC Plastics —la monitorización del medio marino y el reciclaje/la reutilización— están interrelacionados lógicamente, ya que ambos representan una contribución a la solución del problema mundial de la contaminación por plásticos. No obstante, son independientes desde el punto de vista operacional, ya que la ejecución de las actividades en un componente no depende de la ejecución en el otro. NUTEC Plastics tiene en cuenta este vínculo de interrelación sin codependencia de los dos componentes adoptando un **enfoque modular para la ejecución**. Este enfoque presenta dos ventajas:

En primer lugar, un enfoque modular es la opción más apropiada para adaptarse a las diferentes necesidades, preferencias y capacidades de los países a la hora de encarar su problema específico en relación con los plásticos. En algunos casos pueden ser necesarias una monitorización y una evaluación más exactas de la contaminación marina por plásticos, en otros habrá que mejorar las instalaciones de reciclaje de plásticos con tecnología de la radiación, y en otras circunstancias los países podrían querer optar por ambos componentes. Un enfoque modular garantiza el máximo grado de flexibilidad en la ejecución, basada firmemente en las necesidades y las prioridades de los Estados Miembros.

En segundo lugar, un enfoque modular ofrece flexibilidad para movilizar y obtener los recursos financieros (y no financieros) necesarios, lo que permite un comienzo anticipado de la ejecución. Las actividades específicas de NUTEC Plastics pueden empezar a ejecutarse tan pronto como se disponga de los recursos iniciales, mientras se obtienen los recursos restantes. Este enfoque tiene la ventaja adicional de que permite a los donantes y asociados participar en actividades concretas en función de sus preferencias y prioridades.

Hay más de 40 proyectos de CT, PCI y otras actividades programáticas, en curso o programados, que guardan relación con las tecnologías de la radiación y la monitorización del medio ambiente. De estos, más de 25 proyectos están directamente relacionados con los plásticos. Estos proyectos podrían ampliar su alcance para incluir las actividades de NUTEC Plastics según sea necesario.

Se pedirá a los países que deseen participar en las actividades de NUTEC Plastics, ya sea en el componente de reciclaje o en el de monitorización (o en ambos), que consideren los criterios siguientes:

- alcance del problema nacional/regional de los residuos plásticos;
- compromiso político firme para luchar contra la contaminación por residuos plásticos, que se vea reflejado en los correspondientes planes, políticas y objetivos, además de vínculos sólidos y estratégicos entre sus respectivas instituciones nacionales, redes regionales pertinentes y plataformas de cooperación;
- recolección y clasificación de los residuos plásticos mediante una gestión formal o informal de esa clase de residuos;
- participación en curso en las iniciativas sobre residuos plásticos; esto garantizará que se incluya toda la cadena de valor del plástico y que la contribución y el impacto del OIEA sean mayores que a través de una intervención independiente;
- compromiso de mejorar la comprensión acerca de los efectos de la contaminación por microplásticos en el medio marino;
- capacidad existente en las tecnologías de la radiación y/o los análisis de muestras del medio marino;

- experiencia de colaboración con el OIEA en el ámbito de las técnicas y aplicaciones nucleares, por ejemplo a través de los centros colaboradores del OIEA;
- existencia del entorno normativo necesario para utilizar técnicas de la radiación o la voluntad de elaborarlo, y
- un sector privado (relacionado con el plástico) que participa en alianzas público-privadas (APP), tiene experiencia en la materia y/o está dispuesto a colaborar.

ACTIVIDADES	PERÍODOS				
	2021	2022	2023	2024	2025
RECICLAJE					
Sensibilización					
Campaña de divulgación					
Planta piloto					
Viabilidad					
Construcción					
Funcionamiento					
Planta de demostración					
Viabilidad					
Construcción					
Funcionamiento					
Alianzas					
Alianzas					
MONITORIZACIÓN					
Sensibilización					
Campaña de divulgación					
Alianzas Públicas y Privadas					
Alianzas					
Capacidad de los laboratorios					
Adquisición de equipo					
Capacitación					
Red					
Red de monitorización					
Conocimientos					
Conocimientos					

Fig. 7. Calendario de ejecución de NUTEC Plastics.

5.2. Monitorización y evaluación

Cada una de las modalidades de ejecución (proyectos de CT, PCI, otras actividades programáticas) utilizará sus respectivos procedimientos y mecanismos habituales de monitorización, evaluación y notificación. El sistema de monitorización y evaluación del OIEA se fundamenta en el enfoque basado en los resultados que utiliza el marco lógico, indicadores, medios de verificación e hipótesis. NUTEC Plastics incluye indicadores de los resultados para cada componente. Se ha desarrollado un instrumento preciso de monitorización y gestión. Los indicadores se supervisarán durante la ejecución y se elaborarán informes bianuales para documentar los progresos. Habida cuenta de que NUTEC Plastics opera en un contexto cambiante en el que otras partes interesadas desempeñan papeles clave, algunas de las hipótesis adoptadas en la teoría del cambio son factores clave para lograr resultados. Durante la ejecución se supervisarán de cerca estas hipótesis como parte del marco de gestión del riesgo y se aplicarán medidas correctivas en caso de que las hipótesis no se concreten y pasen a ser un riesgo para la consecución de alguno de los componentes de NUTEC Plastics.

ANEXO: Referencias

- [1] BAILEY, R.M. richardmbailey/P2O: P2O v1.0.0. Zenodo (2020)
<https://dx.doi.org/10.5281/zenodo.3929470>
- [2] BARRA, R., LEONARD, S.A., Plastics and the Circular Economy, Scientific and Technical Advisory Panel to the Global Environment Facility, Washington, DC (2018).
- [3] GEYER, R., JAMBECK, J.R., LAW, K.L., Production, use, and fate of all plastics ever made, *Sci. Adv.*, **3** 7 (2017).
- [4] WORLD ECONOMIC FORUM, ELLEN MacARTHUR FOUNDATION, MCKINSEY CENTER FOR BUSINESS AND ENVIRONMENT, The New Plastics Economy – Rethinking the Future of Plastics, WEF, Cologny (2016).
- [5] OCEAN CONSERVANCY, MCKINSEY CENTER FOR BUSINESS AND ENVIRONMENT, Stemming the Tide: Land-based strategies for a plastic free ocean (2015).
<https://oceanconservancy.org/wp-content/uploads/2017/04/full-report-stemming-the.pdf>
- [6] INTERGOVERNMENTAL SCIENCE-POLICY PLATFORM ON BIODIVERSITY AND ECOSYSTEM SERVICES, Summary for Policymakers of the Global Assessment Report on Biodiversity and Ecosystem Services, IPBES, Bonn (2019).
- [7] PLASTICSEUROPE, Plastics: The Facts (2019),
www.plasticseurope.org/application/files/9715/7129/9584/FINAL_web_version_Plastics_the_facts2019_14102019.pdf
- [8] ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT, Improving Plastics Management: Trends, Policy Responses, and the Role of International Co-operation and Trade Background Report, OECD Environment Policy Paper No. 12, OECD, Paris (2018).
- [9] UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME, Global Waste Management Outlook, UNEP, Nairobi (2015).
- [10] LAU, W.W., et al., Evaluating scenarios toward zero plastic pollution, *Sci.* **369** 6510 (2020), 1455–1461.
- [11] BOURGUIGNON, D., Plastics in a Circular Economy: Opportunities and Challenges, PE 603.940, European Parliament, Brussels (2017).
- [12] ELLEN MacARTHUR FOUNDATION, The New Plastics Economy: Rethinking the Future & Catalysing Action, Ellen MacArthur Foundation, Cowes (2017).
- [13] NIELSEN, T.D., HASSELBALCH, J., HOLMBERG, K., STRIPPLE, J., Politics and the plastic crisis: A review throughout the plastic life cycle, *Wiley Interdiscip. Rev. Energy Environ.* **9** 1 (2020) e360.
- [14] KARASIK, R., 20 Years of Government Responses to the Global Plastic Pollution Problem: The Plastics Policy Inventory, Publication NI X 20-05, Duke University, Durham, NC (2020).
- [15] ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA EDUCACIÓN, LA CIENCIA Y LA CULTURA; COMISIÓN OCEANOGRÁFICA INTERGUBERNAMENTAL: *La ciencia que necesitamos para el océano que queremos: El Decenio de las Naciones Unidas de las Ciencias Oceánicas para el Desarrollo Sostenible (2021-2030)*, IOC/BRO/2018/7 Rev, UNESCO, París (2019).
- [16] EUROPEAN COMMISSION, A Circular Economy for Plastics, EC, Brussels (2019).
- [17] ASSOCIATION OF SOUTHEAST ASIAN NATIONS, Bangkok Declaration on Combating Marine Debris in ASEAN Region (2019), <https://asean.org/storage/2019/06/2.-Bangkok-Declaration-on-Combating-Marine-Debris-in-ASEAN-Region-FINAL.pdf>

- [18] UNITED NATIONS ECONOMIC AND SOCIAL COMMISSION FOR ASIA AND THE PACIFIC, Closing the Loop (2020), www.unescap.org/projects/closing-the-loop
- [19] SUSTAINABLE SEAS TRUST, African Marine Waste Network (2020), <https://sst.org.za/projects/african-marine-waste-network/>
- [20] RECICLAJE INCLUSIVO HACIA UNA ECONOMIA CIRCULAR, Latitud (2020), <https://latitudr.org/>
- [21] UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME, Addressing Marine Plastics: A Systematic Approach — Recommendations for Action, UNEP, Nairobi (2019)
- [22] AL-SALEM, S., LETTIERI, P., BAEYENS, J., Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review, *Waste Manage.* **29** 10 (2009) 2625–2643.
- [23] RAGAERT, K. DELVAA, L., VAN GEEMB, K., Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste, *Waste Manage.* **69** (2017) 24–58.
- [24] VOLLMER, I., et al., Beyond mechanical recycling: Giving new life to plastic waste, *Angew. Chem. Int. Ed.* **59** 36 (2015) 15402–15423.
- [25] COLE, M., LINDEQUE, P., HALSBAND, C., GALLOWAY, T.S., Microplastics as contaminants in the marine environment: A review, *Mar. Pollut. Bull.* **62** 12 (2011) 2588–2597.
- [26] KANE, I.A., et al. Seafloor microplastic hotspots controlled by deep-sea circulation, *Sci.* **368** 6495 (2020) 1140–1145.
- [27] BANK, M.S., HANSSON, S.V. The plastic cycle: A novel and holistic paradigm for the Anthropocene, *Environ. Sci. Technol.* **53** 13 (2019) 7177–7179.
- [28] ROCHMAN, C.M., HOH, E., KUROBE, T., TEH, S.J. Ingested plastic transfers hazardous chemicals to fish and induces hepatic stress, *Sci. Rep.* **3** (2013) 3263.
- [29] ROCHMAN, C.M., et al. Rethinking microplastics as a diverse contaminant suite, *Environ. Toxicol. Chem.* **38** 4 (2019) 703–711.
- [30] LIEBMANN, B., et al., Assessment of Microplastic Concentrations in Human Stool: Final Results of a Prospective Study, Environment Agency Austria, Vienna (2018).
- [31] INTERNATIONAL MOLDED FIBER ASSOCIATION, Study Finds Microplastics Harm Immune Cells (2019), www.imfa.org/study-finds-microplastics-harm-immune-cells/
- [32] RAYNAUD, J.: *EL VALOR DEL PLÁSTICO: Estudio de viabilidad para medir, gestionar el plástico usado en la industria de bienes de consumo y divulgar información sobre él*, Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, Nairobi (2014).
- [33] ECONOMIST, The known unknowns of plastic pollution (2018), www.economist.com/international/2018/03/03/the-known-unknowns-of-plastic-pollution
- [34] THE PEW CHARITABLE TRUSTS, SYSTEMIQ, Breaking the Plastic Wave: A Comprehensive Assessment of Pathways Towards Stopping Ocean Plastic Pollution, The Pew Charitable Trusts, London (2020).



IAEA

Preparado por el OIEA
www.iaea.org
nutecplastics@iaea.org

Mayo de 2021