

1 Introducción

Desde su identificación como contaminantes de preocupación emergente al principio de los años 2000, las sustancias per- y polifluoroalquiladas (PFAS) han sido el enfoque de numerosos estudios que han evaluado su potencial para causar efectos adversos en humanos, animales de laboratorio, y especies ecológicas. Los resultados de esos estudios, resumidos brevemente aquí, indican que ciertas PFAS están vinculadas con consecuencias para la salud en humanos y otras especies.

De las PFAS estudiadas hasta la fecha, se sabe que ciertos ácidos perfluoroalquílicos (PFAAs) y otras PFAS se acumulan en los humanos y otros mamíferos, peces, y plantas. Los ácidos sulfónicos de perfluoroalcanos (PFSA) con más de ocho carbonos fluorados (por ejemplo, PFOS y una cadena más larga para PFSA) y PFNA y de cadena más larga para los ácidos carboxílicos perfluoroalquílicos (PFCA) son considerablemente más bioacumulable que las PFAA de cadena más corta. Generalmente, las PFSAa son más bioacumulables que las PFCA con el mismo número de carbonos fluorados (Conder et al. 2008; Martin et al. 2003). En las plantas, las PFAAs de cadena corta tienden a ser más bioacumulables que las PFAAs de cadena larga. En especies que habitan o dependen de ecosistemas acuáticos, las PFAAs también se pueden bioacumular y biomagnificar (consulte la sección 5.5 y 5.6 del documento de orientación). Se incluye información sobre las concentraciones de las PFAS detectadas en la biota en la sección 6.5 del documento de orientación.

Esta ficha también resume algunos de los retos específicos que plantean las PFAS en el desarrollo de la evaluación de riesgos de los sitios humanos y ecológicos. Algunos de los retos incluyen las limitaciones de los estudios sobre los efectos adversos y también las posibles complicaciones con los factores de las rutas de exposición.

Para más información y referencias sobre estos temas, consulte el documento de orientación.

2 Efectos para la salud humana

Los efectos de las PFAS en la salud humana se analizan en las secciones 7.1 y 17.2 del documento de orientación. La tabla 1 resume información actual de la toxicología animal y epidemiología humana para PFOA y PFOS, las dos PFAS sobre las cuales tenemos más conocimiento sobre sus efectos en la salud.

Algunas PFAS se han vinculado con varios problemas de la salud en estudios desarrollados en la población general y en comunidades con agua potable contaminada. Estudios de toxicología en animales de laboratorio y estudios epidemiológicos en humanos sugieren que las consecuencias para la salud pueden ocurrir como resultado de la exposición a largo plazo a PFOA y PFOS en concentraciones ambientalmente pertinentes.

ITRC ha desarrollado una serie de fichas técnicas que resumen la ciencia reciente y tecnologías emergentes sobre PFAS. La información en esta y otras fichas sobre PFAS se describe en más detalle en el Documento de orientación técnica y regulatoria de ITRC (**Documento de Orientación** (<https://pfas-1.itrcweb.org/>)).

El propósito de esta ficha técnica es de resumir:

- Efectos para la salud humana
- Efectos ecológicos
- Desafío de evaluación de riesgos en sitios

Efectos para la salud humana y ecológica y evaluación de riesgos de sustancias per- y polifluoroalquiladas (PFAS) *continuación*

Tabla 1. Algunos efectos en la salud de las PFOA y/o PFOS identificados en estudios publicados (no exhaustivo)

Animal	Human (possible links)
Animal	Efectos hepáticos (enzimas séricas/bilirrubina, colesterol)
Efectos hepáticos	Efectos inmunológicos (disminución de la respuesta a la vacunación, asma)
Efectos inmunológicos	Efectos sobre el desarrollo (peso al nacer)
Efectos sobre el desarrollo	Efectos endocrinos (enfermedad tiroidea)
Efectos endocrinos (tiroides)	Efectos reproductivos (disminución de la fertilidad)
Efectos reproductivos	Efectos cardiovasculares (hipertensión inducida por el embarazo)
Efectos hematológicos (sangre)	
Efectos neuroconductuales	Cáncer* (testicular, renal)

**Sólo para PFOAy*

Los efectos toxicológicos de otras PFAS que se han estudiado son generalmente similares a los de PFOA y PFOS. Sin embargo, las PFAS de cadena larga son generalmente tóxicas en dosis más bajas que las PFAS de cadena corta. Esto se debe a que, como se explicó anteriormente, las PFAS de cadena larga son más bioacumulables que las PFAS de cadena corta y, por lo tanto, se acumulan a niveles más altos en el cuerpo que una misma dosis de PFAS de cadena corta. La bioacumulación humana de PFAS puede ocurrir independientemente de la ruta de exposición. De las cuatro PFAS cuya carcinogenicidad se ha examinado, PFOA, PFOS y el químico de GenX, HFPO-DA, causaron tumores mientras que PFHxA no. La mayoría de los miles de PFAS que se sabe que existen, incluyendo muchas que son de uso comercial y/o se encuentran en el agua potable u otros medios ambientales, tienen muy pocos datos o ninguno sobre la toxicidad. Esto es una brecha de datos crítica en la información sobre los efectos en la salud para PFAS.

Ciertas PFAS de cadenas largas tienen vidas medias de varios años en el cuerpo humano, y se han detectado en el suero sanguíneo de casi todos los residentes de los EE.UU. (CDC 2018, 2019; Olsen et al. 2017). Estos niveles de suero resultan de la exposición tanto a las PFAS de cadena larga y a otras PFAS que son sus precursores que parecen incluir la comida y envases de comida, productos de consumo, y en el polvo que se encuentra dentro de viviendas. Es probable que la disminución en los niveles de PFOS y PFOA en el suero de la población general de los EE.UU. resultó por la eliminación gradual de su producción y uso en varios productos. Un nivel más altos en el suero se ha detectado en las comunidades donde el agua potable o los peces pescados recreativamente están contaminados y en trabajadores con exposición ocupacional.

Debido a que los efectos adversos al desarrollo se consideran criterios de valoración sensibles para las PFAA de cadena larga, las exposiciones durante etapas de desarrollo de la vida (por ejemplo, feto, bebé) son importantes. Se sabe que las PFAAs atraviesan la placenta para llegar al feto y también se transfieren de la madre a su leche materna. Las exposiciones máximas en bebés que consumen la leche materna son varias veces más altas que en las personas mayores, y los bebés que consumen leche de fórmula preparada con agua contaminada también reciben mayores exposiciones. Consulte la sección 17.2.3.1 del documento de orientación para más información y referencias.

Aunque estudios han asociado los efectos a la salud humana con la exposición a las PFAS de cadena larga, los factores de toxicidad (dosis de referencia, factor de pendiente de cáncer) y otros lineamientos estatales y federales de las PFAS actuales en EE.UU. se basan en datos de toxicidad en animales, mientras que algunos niveles europeos se basan en datos humanos. Una de las razones de esto es que hay exposición simultánea a múltiples PFAAs en las poblaciones involucradas en los estudios, y esto dificulta determinar el impacto individual de cada una de las PFAS. Los niveles de PFAS en el suero sanguíneo son más altos en humanos que en animales que han recibido la misma dosis, debido a que la excreción humana es mucho más lenta, y esto debe tenerse en cuenta al desarrollar factores de toxicidad basados en datos de animales.

3 Efectos ecológicos

En la sección 7.2 del documento de orientación se analizan los efectos hacia la salud de ecosistemas. Los estudios de biomonitorio en varios organismos, hábitats y geografías muestran que ciertas especies químicas de PFAS pueden acumularse en animales y que estas exposiciones están ocurriendo a escala global (Reiner and Place 2015; Giesy and Kannan 2001). Sin embargo, el uso de estos datos se dificulta por la incertidumbre de efectos adversos desconocidos. Las tablas 7-1, 7-2 y 7-3, proveídas como un archivo de Excel separado disponible en el enlace de la sección 7.2 del documento de orientación, resumen los datos de ecotoxicidad de exposición de las PFAS a diversos organismos acuáticos y especies de fauna terrestre. La fauna puede acumular PFAS por el consumo de plantas o presas contaminadas; o a través de la ingestión o la absorción de las PFAS presentes en la tierra, los sedimentos, o el agua. Si alguna PFAS también se bioconcentra y/o biomagnifica depende de las propiedades químicas específicas de cada PFAS individual, el nivel trófico de las especies, y otros factores como el sexo del organismo, y si la exposición ocurre en aguas dulces o saladas (consulte las secciones 5.5 y 5.6 del documento de orientación). Debido a su tendencia a la bioacumulación, aún concentraciones extremadamente bajas o indetectables de PFAS en el medio ambiente pueden presentar riesgos posibles para la salud de los organismos a través de la exposición directa a medios abióticos contaminados, y/o indirectamente a través de la cadena alimenticia.

Hay más experimentos controlados de laboratorio en taxones acuáticos que en taxones terrestres. Estos datos representan sólo una ventana hacia la toxicidad de las PFAS basada en criterios de valoración principales disponibles actualmente. No se deben considerar exhaustivos ya que sigue siendo un área de investigación activa. En general, hay comparativamente más datos sobre los efectos ecológicos de PFOS que de cualquier otra PFAS en todos los organismos evaluados. Además, hay más escenarios de exposición aguda hacia las PFAS en pruebas de laboratorio que de exposiciones crónicas.

La tabla 7-1 resume los datos de ecotoxicidad para la exposición a las PFAS en la flora y la fauna acuática. En general, la mayoría de los datos de toxicidad acuática se enfocan en PFOS y hay más datos de exposición en agua dulce que salada. Hay pocos datos de toxicidad directa sobre la exposición de sedimentos contaminados con PFAS en organismos invertebrados bentónicos y otras especies que habitan en estas zonas. Para PFOS, los efectos en invertebrados y peces ocurren en concentraciones más bajas después de exposiciones crónicas en comparación con exposiciones agudas. Los pocos datos disponibles sugieren que los efectos de las PFAS en anfibios se encuentran dentro del rango reportado para peces después de exposiciones agudas y crónicas.

En el entorno terrestre, hay más estudios publicados con criterios de valoración principales para mamíferos que otras clases de organismos. Las pruebas de toxicidad en mamíferos de laboratorio (por ejemplo, ratones) han demostrado que la exposición a PFAS puede provocar efectos adversos en los sistemas hepático, endocrino e inmune; en el desarrollo; y ciertos tipos de cáncer. Se han realizado pruebas de toxicidad con plantas terrestres, invertebrados y especies de aves, pero los datos son escasos para todas las PFAS salvo PFOS y PFOA. La tabla 7-2 resume algunos de los datos de ecotoxicidad disponibles para PFAS en especies terrestres.

A pesar del crecimiento en la cantidad de literatura sobre la ecotoxicidad de las PFAS, aún existen lagunas significativas en los datos. Aunque hay muchas PFAS conocidas, las pruebas de laboratorio estándar se han limitado principalmente a PFOS y PFOA. Además, no se han explorado los efectos de las mezclas de las PFAS. Finalmente, existe la necesidad de expandir las pruebas toxicológicas de las PFAS especialmente en taxones terrestres, por ejemplo, hay pocos datos disponibles para las especies de herpetofauna.

(Continúa en la siguiente página)

Efectos para la salud humana y ecológica y evaluación de riesgos de sustancias per- y polifluoroalquiladas (PFAS) *continuación*

4 Evaluación de riesgos en sitios

Los desafíos de la evaluación de riesgos en sitios específicos a las PFAS se incluyen en las secciones 9 y 17.3 del documento de orientación.

Evaluación de riesgos para la salud humana

En la población general, las vías predominantes de exposición humana a PFAS se ilustran en la Figura 1.



Contacto en el lugar de trabajo



Consumo de comidas contaminadas con PFAS (se cree que es la fuente principal para el público en general)



Ingestión de agua potable (áreas con suministros de agua contaminados con PFAS)



Exposición a PFAS por bienes de consumo (como alfombras y tapicerías tratadas químicamente) o polvo interior

Figura 1. Vías predominantes de exposición humana a PFAS.

Las exposiciones a PFAS más altas pueden ocurrir durante las primeras etapas de la vida (de 0 a 18 años) (Winkens et al. 2017). La exposición en bebés (a través de la leche materna de madres expuestas o de leche de fórmula preparada con agua contaminada) es más alta en comparación a edades mayores. En sitios contaminados con PFAS, las rutas y escenarios de exposición dependerá de la fuente de PFAS (por ejemplo, derrame de AFFF o de sitios industriales) y en los usos del sitio y propiedades adyacentes, particularmente si las PFAS han migrado a las aguas subterráneas dentro y fuera el sitio.

Varias agencias reguladoras y asesoras estatales, nacionales e internacionales han desarrollado valores de toxicidad humana para varias PFAS que podrían usarse para realizar evaluaciones de riesgos o para apoyar el establecimiento de reglas para la minimización de riesgos en un sitio. La movilidad, la persistencia, y las propiedades bioacumulables de las PFAS se analizan en el documento de orientación, y esto puede llevar a cabo complicaciones en el cálculo de los valores de toxicidad, y también desafíos en la evaluación de los posibles efectos acumulativos.

Evaluación de riesgos ecológicos

La evaluación de riesgos ecológicos (ERA por sus siglas en inglés) para las PFAS es retador debido a los datos limitados y la complejidad técnica. Un desafío para varias PFAS es la identificación de los umbrales de toxicidad basados en el riesgo ecológico. Actualmente, no hay directrices o umbrales de evaluación en matrices ambientales a nivel federal para receptores ecológicos. Sin embargo, varios estados han establecido algunos criterios con la intención de proteger a los organismos acuáticos en sus respectivas aguas superficiales. Se han adoptado umbrales de evaluación y directrices en algunas jurisdicciones utilizando datos de los efectos publicados para especies pertinentes a la geografía y hábitats dentro de estas jurisdicciones. La mayoría de las directrices disponibles protegen a la vida acuática de agua dulce expuesta a PFOS o PFOA. Un segundo reto importante con la evaluación de la toxicidad para ERA es tomar en cuenta la gran cantidad de receptores y la sensibilidad variable desconocida a las PFAS. La falta de conocimiento de esta familia de compuestos es un gran desafío para las PFAS, aunque se entiende que la sensibilidad a los contaminantes puede variar ampliamente entre reinos de animales o entre clases de animales. La toxicidad de las mezclas es un tercer desafío en la evaluación de los efectos de las PFAS. En este momento sólo hay datos limitados disponibles para comprender

Efectos para la salud humana y ecológica y evaluación de riesgos de sustancias per- y polifluoroalquiladas (PFAS) *continuación*

suficientemente la toxicidad de unas pocas sustancias químicas con respecto a la exposición directa en organismos de bajo o alto nivel trófico. La detección de PFAS en los tejidos de los principales depredadores dentro de los ecosistemas acuáticos y terrestres apuntan a la exposición continua a través la bioacumulación y posiblemente la biomagnificación de las PFAS.

La falta de datos ecotoxicológicos sólidos de varias especies con sensibilidad variable a las PFAS limita los umbrales para otras PFAS. Los receptores ecológicos siempre están expuestos a mezclas de PFAS, en lugar de químicos individuales, pero no hay consenso sobre cómo evaluar la toxicidad de las mezclas de PFAS.

La detección de PFAS en los tejidos de los depredadores principales dentro de los ecosistemas acuáticos y terrestres (consulte la sección 6.5 del documento de orientación) apuntan a la exposición continua a través la bioacumulación y posiblemente la biomagnificación de las PFAS (consulte la sección 5.5.3 del documento de orientación). Hay algunos estudios publicados sobre la absorción y eliminación de PFAS entre los organismos acuáticos, incluyendo peces y ranas. Se proveen los factores de bioconcentración y de bioacumulación para ayudar a realizar modelos cuantitativos de la cadena alimenticia para los organismos de nivel trófico más alto.

5 Referencias y acrónimos

Las referencias en esta ficha y otras referencias se pueden encontrar en <https://pfas-1.itrcweb.org/references/> (en inglés)

Los acrónimos utilizados en esta ficha y en el documento de orientación se pueden encontrar en <https://pfas-1.itrcweb.org/acronyms/> (en inglés)

Traducción a español:

Ivy Torres, MA (irtorres@uci.edu) Program in Public Health, University of California, Irvine (UCI)

y Christopher Olivares, PhD (chris.olivares@uci.edu) Civil & Environmental Engineering, UCI



Contactos del equipo de sustancias per- y polifluoroalquiladas (PFAS)

Sandra Goodrow • New Jersey Department of Environmental Protection
609-490-4164 • Sandra.Goodrow@dep.nj.gov

Kate Emma Schlosser • New Hampshire Department of Environmental Services
603-271-2910 • KateEmma.Schlosser@des.nh.gov

April 2022



ITRC
1250 H St. NW, Suite 850
Washington, DC 20005
itrcweb.org

