

# Los Pesticidas y El Cambio Climático: Un Círculo Vicioso

Invierno 2022–2023



## Resumen ejecutivo



**El cambio climático es uno de los mayores desafíos a los que se enfrenta la humanidad en la actualidad. La evidencia científica indica que los pesticidas contribuyen de una manera significativa a las emisiones de gases de efecto invernadero y, al mismo tiempo, hacen que nuestros sistemas agrícolas sean más vulnerables a los efectos del cambio climático. Sin embargo, la reducción del uso de pesticidas sintéticos se ha omitido de las soluciones al cambio climático, tanto que los intereses de la agricultura industrial presentan el uso de pesticidas sintéticos como una estrategia de mitigación del cambio climático.**

Los pesticidas contribuyen al cambio climático a lo largo de su ciclo de vida a través de la fabricación, el envasado, el transporte, la aplicación e incluso mediante la degradación ambiental y la eliminación. Cabe destacar que el 99% de todos los productos químicos sintéticos, incluidos los pesticidas, se derivan de combustibles fósiles, y varias compañías de petróleo y de gas desempeñan un papel importante en el desarrollo de ingredientes de pesticidas.<sup>1</sup> Otros insumos químicos en la agricultura,

como los fertilizantes nitrogenados, han recibido una atención particular — y con razón — debido a sus contribuciones a las emisiones de gases de efecto invernadero. Sin embargo, las investigaciones han demostrado que la fabricación de un kilogramo de pesticida requiere, en promedio, unas 10 veces más energía que un kilogramo de fertilizante nitrogenado.<sup>2,3</sup> Al igual que los fertilizantes nitrogenados, los pesticidas también pueden despidir emisiones de gases de efecto invernadero después de su

aplicación. Con pesticidas fumigantes, se ha demostrado que aumenta la producción de óxido nitroso\* entre siete y ocho veces en los suelos.<sup>4,5</sup> Muchos pesticidas también conducen a la producción de ozono troposférico, un gas de efecto invernadero dañino tanto para los humanos como para las plantas.<sup>6,7,8</sup> Algunos pesticidas, como fluoruro de sulfuro, son en sí mismos potentes gases de efecto invernadero, con casi 5000 veces la potencia del dióxido de carbono.<sup>9</sup>

Mientras tanto, se espera que los impactos del cambio climático conduzcan a un aumento en el uso de pesticidas, creando un círculo vicioso entre la dependencia química y la intensificación del cambio climático. Las investigaciones muestran que la disminución de la eficacia de los pesticidas, junto con el aumento de las presiones de plagas asociadas con un clima cambiante, probablemente aumentará el uso de pesticidas sintéticos en la agricultura convencional.<sup>10</sup> Un aumento en el uso de pesticidas conducirá a una mayor resistencia a los herbicidas e insecticidas en las malezas y las plagas de insectos, mientras que también daña la salud pública y el medio ambiente. Los efectos de un mayor uso de pesticidas sintéticos afectarán de manera desproporcionada a las poblaciones que ya están bajo estrés por una amplia gama de efectos del cambio climático, como el calor extremo y el humo de los incendios forestales. Los efectos combinados del cambio climático y el uso de pesticidas recaen principalmente

sobre los hombros de las personas y los niños de color, que es una injusticia climática y racial.<sup>11, 12, 13, 14, 15</sup>

La adopción de sistemas agrícolas alternativos, como la agricultura agroecológica, minimiza o elimina el uso de pesticidas sintéticos al tiempo que aumenta la resiliencia de nuestros sistemas agrícolas para resistir mejor los impactos del cambio climático.<sup>16, 17, 18</sup> La agroecología es una forma de agricultura arraigada en la justicia social que se centra en trabajar con la naturaleza y no contra ella. Se basa en principios ecológicos para el manejo de plagas, reduciendo el uso de pesticidas sintéticos, mientras que da prioridad al poder de decisión de los agricultores y los trabajadores agrícolas. Se ha demostrado que la agroecología y la agricultura orgánica diversificada, cuando se combinan con principios de justicia social, tienen beneficios climáticos importantes, al tiempo que apoyan la salud y los derechos de los trabajadores agrícolas, los pueblos indígenas y las comunidades rurales.

Se requieren medidas decisivas para reducir la contribución de los agroquímicos a las emisiones de gases de efecto invernadero y para mejorar la resiliencia climática de los sistemas alimentarios y agrícolas. Para lograr esto, los responsables de formular políticas deben:

- Establecer metas mensurables en las políticas climáticas para reducir el uso de pesticidas sintéticos en la agricultura;
- Promover la transición a sistemas alimentarios y agrícolas biodiversos y agroecológicos, por ejemplo, al establecer y financiar programas que brinden mayor asistencia técnica e incentivos a los agricultores para que adopten estas prácticas agrícolas; y
- De acuerdo con el derecho internacional, adoptar regulaciones que defiendan y promuevan los derechos de los grupos más afectados por el uso de pesticidas sintéticos.

La transición de nuestros sistemas agrícolas a aquellos que eleven los principios de la justicia social y ecológica no solo ayudará a mitigar el cambio climático, sino que también reducirá los efectos negativos en la salud de la agricultura industrial. Mientras continúa el trabajo hacia los futuros cambios de políticas y prácticas, ahora mismo podemos apoyar colectivamente el trabajo de defensa de las comunidades y organizaciones afectadas que luchan por sistemas alimentarios y agrícolas más equitativos y sostenibles.



Figura 1.



# Introducción

## Los pesticidas: la base de la agricultura industrial

En la agricultura industrial moderna, las operaciones agrícolas se consideran sistemas ecológicamente simplificados con insumos (pesticidas, fertilizantes y semillas) y productos (cultivos) altamente controlados y monetizados. En ausencia de ecosistemas de plantas y suelos muy diversos y vigorosos que proporcionen los nutrientes necesarios para los cultivos y los controles naturales de plagas y enfermedades, estos sistemas agrícolas “convencionales” dependen de los insumos frecuentes de pesticidas y fertilizantes sintéticos.<sup>19, 20</sup> El objetivo principal de la agricultura convencional es maximizar las ganancias a corto plazo a través de mayores rendimientos y ventas, minimizando los costos internos (por ejemplo, la mano de obra) y dejando de lado los costos externos.<sup>21, 22</sup> Los costos externos más obvios ignorados por la agricultura industrial están relacionados con los impactos en la salud humana<sup>15, 16</sup> y el deterioro de los servicios ecosistémicos, como el aire limpio, el agua y los suelos saludables.<sup>23</sup>

Las políticas agrícolas y la agricultura centrada en la exportación continúan promoviendo agresivamente la producción de cultivos de productos básicos con un uso intensivo de productos químicos. Los cultivos básicos son aquellos producidos principalmente para el comercio en mercados internacionales a gran escala, como maíz, arroz, soja, trigo y algodón. Estos cultivos se encuentran entre los que más utilizan pesticidas y fertilizantes en los Estados Unidos y en todo el mundo.<sup>24, 25</sup> La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación informó el uso global de pesticidas en el año 2020 en aproximadamente 2,7 millones de toneladas (5,9 mil millones de libras) de ingredientes activos de pesticidas, con un uso de herbicidas de aproximadamente 1,4 millones de toneladas (3,1 mil millones de libras), fungicidas y bactericidas en 0,6 millones de toneladas (1,3 mil millones de libras), e insecticidas en 0,5 millones de toneladas (1 mil millones de libras) (ver Tabla 1). Los ingredientes activos de pesticidas son los químicos en una formulación de pesticidas destinados a controlar la plaga objetivo, mientras que los ingredientes inertes de pesticidas

Zona Geográfica	Pesticida	Toneladas en 2005	Toneladas en 2020	Porcentaje de Aumento %
Estados Unidos	Pesticidas (total)	388 275	407 779	5,0
Estados Unidos	Herbicidas	190 509	255 826	34,3
Estados Unidos	Insecticidas	61 689	65 771	6,6
Estados Unidos	Fungicidas y bactericidas	22 680	24 040	6,0
El mundo	Pesticidas (total)	2 280 626	2 661 124	16,7
El mundo	Herbicidas	1 043 223	1 397 465	34,0
El mundo	Insecticidas	470 360	471 238	0,2
El mundo	Fungicidas y bactericidas	529 860	605 986	14,4

**Tabla 1.** Uso de pesticidas en 2005 y 2020. Fuente: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Base de datos en línea de FAOSTAT. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/RP> Consultado el 7 de septiembre de 2022.

Nota: Los totales también incluyen grupos de pesticidas que no figuran en la lista, como aceites minerales y rodenticidas. No todos los países proporcionan datos para todos los grupos de pesticidas en la base de datos de la FAO.

ayudan al desempeño general del pesticida. Solamente los ingredientes activos de los pesticidas deben por ley divulgarse al público en las etiquetas de los pesticidas. Los ingredientes inertes se consideran información de propiedad de la empresa, aunque muchos son productos químicos tóxicos.<sup>26</sup> Como muestra la Tabla 1, mientras que el uso de pesticidas en general aumentó un 17% entre 2005 y 2020, el uso de herbicidas aumentó un 34%<sup>27</sup> con China, Estados Unidos, Argentina, Tailandia y Brasil como los principales consumidores de pesticidas.<sup>25</sup> Es probable que estas estimaciones del uso de pesticidas se subestimen significativamente porque los pesticidas aplicados como tratamientos de semillas se usan comúnmente en los Estados Unidos pero no están regulados ni incluidos en la base de datos de La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.<sup>28, 29, 30, 31</sup>

California usa más de 200 millones de libras (casi 91 mil toneladas) por año de ingredientes activos de pesticidas, o el 18% de los pesticidas que se usan en los Estados Unidos.<sup>32</sup> Si bien el estado produce relativamente pocos cultivos básicos, produce más de un tercio de las verduras y dos tercios de las frutas y nueces del país.<sup>33</sup> Los principales cultivos para el uso de pesticidas incluyen almendras, uvas, jitomates, fresas y naranjas.<sup>32</sup> La tasa de aplicación de pesticidas en las tierras de cultivo de California es aproximadamente 4.5 veces mayor que el promedio nacional.<sup>12</sup> Las tasas de aplicación más altas se deben principalmente al mayor valor de las frutas y verduras (en comparación a los principales cultivos de productos básicos de los Estados Unidos), lo que podría resultar en pérdidas significativas de ganancias si ocurrieran daños a los cultivos por plagas.<sup>34</sup> Los pesticidas sintéticos usados en mayor volumen en California son los fumigantes y el herbicida glifosato.<sup>32</sup> Los pesticidas fumigantes son pesticidas gaseosos aplicados al suelo para controlar plagas y enfermedades transmitidas por el suelo. A pesar de las altas tasas de producción agrícola (y el uso de pesticidas sintéticos), muchos condados agrícolas de California reportan las tasas más altas de inseguridad alimentaria y pobreza en el estado, lo que afecta particularmente a los niños latinos.<sup>35</sup>

Si bien el uso de cultivos genéticamente modificados (GE, como son sus siglas en inglés) a menudo se promociona como una herramienta para la reducción de pesticidas,<sup>36</sup> la investigación científica muestra lo contrario.<sup>37</sup> Los cultivos transgénicos a menudo son cultivos que han sido modificados genéticamente para que sean resistentes



Las investigaciones demuestran que la diversidad intencional en los sistemas de cultivo puede brindar el control natural de plagas, mejorar la salud del suelo, disminuir la biomasa de malezas, atraer organismos benéficos y mejorar la producción en general.

a un pesticida específico, de modo que los agricultores puedan aplicar el pesticida y matar o controlar las plagas circundantes sin dañar su cultivo. Sin embargo, la adopción generalizada de cultivos transgénicos ha llevado a la aparición de malezas resistentes a los herbicidas, lo que ha provocado que los agricultores apliquen más herbicidas.<sup>37</sup> Por ejemplo, en los Estados Unidos, la introducción y la siembra generalizada de cultivos resistentes a los herbicidas condujo a un aumento de 239 000 toneladas (527 millones de libras) en el uso de herbicidas entre 1996 y 2011, y provocó un aumento general del 7% en el uso de herbicidas e insecticidas.<sup>37</sup> El uso de glifosato (el ingrediente activo del Roundup, que a menudo se aplica a cultivos genéticamente modificados tolerantes al Roundup) en los Estados Unidos aumentó 300 veces entre 1974 y 2014 a 250 millones de libras (113 400 toneladas), lo que representa aproximadamente el 19% de las ventas mundiales.<sup>38</sup> A pesar del uso durante décadas de algodón transgénico diseñado explícitamente para reducir el uso de insecticidas, el algodón es uno de los cultivos más intensivos en pesticidas del mundo.<sup>39</sup> La producción de algodón ocupa el 2,4% de las tierras agrícolas del mundo, pero utiliza el 4,7% de los pesticidas del mundo, y específicamente el 10% de los insecticidas del mundo.<sup>40</sup> Este uso cada vez más elevado de pesticidas tiene un impacto negativo tanto en el medio ambiente como en la salud humana.

## Los efectos del uso de pesticidas en los seres humanos y en la biodiversidad

Los impactos en la salud por la exposición a pesticidas peligrosos incluyen enfermedades agudas como las erupciones en la piel, las enfermedades gastrointestinales y respiratorias así como los problemas del sistema nervioso central.<sup>41, 42</sup> Además, la exposición a pesticidas está relacionada con muchas enfermedades crónicas, incluidos el cáncer, los trastornos reproductivos y del desarrollo y la disfunción neurológica a largo plazo.<sup>43</sup> Una revisión reciente de los casos de intoxicación aguda por pesticidas en 141 países estimó que alrededor de 385 millones de casos de intoxicación aguda por pesticidas no intencional ocurren anualmente en todo el mundo, incluidas alrededor de 11 000 muertes.<sup>15</sup> Basado en una población agrícola mundial de aproximadamente 860 millones de personas, esto significa que alrededor del 44% de los agricultores se envenenan con pesticidas cada año.<sup>15</sup>

Además de los agricultores, los más directamente afectados por el uso de pesticidas peligrosos en la agricultura incluyen los trabajadores agrícolas, los residentes de comunidades rurales y los residentes de comunidades donde se producen pesticidas y donde se vierten desechos de pesticidas.<sup>11, 44, 45, 46</sup> En los Estados Unidos, las personas que viven en estas comunidades afectadas por pesticidas son desproporcionadamente personas de bajos ingresos y personas de color.<sup>11</sup> Estas comunidades experimentan intoxicaciones agudas por pesticidas, efectos crónicos en la salud como el cáncer y daños en el desarrollo, incluidas discapacidades graves de aprendizaje entre los niños.<sup>15, 47, 48</sup> En estas comunidades, las vías principales de exposición son el aire y el agua contaminados.<sup>49, 50</sup> Para las personas que no viven ni trabajan en comunidades de alto riesgo, las vías principales de exposición a pesticidas peligrosos son los alimentos que comen y el agua que beben.<sup>51, 52</sup> Debido a que los niños comen, beben y respiran más por libra que los adultos, y debido a que sus cuerpos se están desarrollando activamente, son particularmente vulnerables a los pesticidas en su entorno y en sus alimentos.<sup>48, 53</sup>

Para los trabajadores agrícolas, las vías principales de exposición son los pesticidas en el aire, el contacto con residuos de pesticidas en los cultivos o al mezclar, cargar o aplicar pesticidas.<sup>54</sup> Los efectos de la exposición se ven agravados por los efectos del cambio climático, como

las altas temperaturas, que conducen al estrés térmico y hacen que el cuerpo humano sea más susceptible a los pesticidas, lo que aumenta el riesgo de efectos en la salud a corto y largo plazo.<sup>12</sup> Cuando hace calor, los trabajadores agrícolas se enfrentan a la compensación entre un mayor estrés térmico por usar equipo para protegerse de los pesticidas y no usar equipo de protección para bajar la temperatura corporal.<sup>55</sup> Además de las duras condiciones de trabajo, los trabajadores agrícolas también experimentan habitualmente un acceso inadecuado a la atención médica.<sup>56</sup> Debido a su residencia en comunidades agrícolas, junto con su mayor susceptibilidad, los niños de los trabajadores agrícolas sufren algunas de las repercusiones de salud más severas por el uso de pesticidas agrícolas.<sup>48</sup>

Los pesticidas también dañan la biodiversidad de la que dependen nuestros sistemas agrícolas y el mundo natural. Se sabe desde hace mucho tiempo que envenenan directamente o conducen a la disminución de la población de aves, mamíferos, anfibios y especies de plantas e insectos beneficiosas.<sup>57</sup> Ahora son ampliamente reconocidos como uno de los principales impulsores de la pérdida de biodiversidad en todo el mundo.<sup>58, 59</sup> Los neonicotinoides, un tipo de insecticida, han recibido atención pública debido al daño significativo a los polinizadores, como las abejas melíferas.<sup>60, 61</sup> Las abejas melíferas desempeñan un papel esencial en la polinización de cultivos agrícolas y son responsables de alrededor de \$15 mil millones en valor agregado de cultivos en los Estados Unidos cada año.<sup>62</sup> Los pesticidas también tienen efectos profundos en la macro y microfauna del suelo, lo que a su vez afecta la estructura y la función a largo plazo del suelo agrícola.<sup>63</sup> Por ejemplo, el uso de insecticidas y otros pesticidas puede provocar la muerte de invertebrados del suelo como las lombrices de tierra.<sup>64</sup> Los invertebrados del suelo son cruciales en la creación de la estructura y la aireación en los suelos y en la prevención de la compactación del suelo, funciones que ayudan al suelo a retener agua y realizar otras funciones deseables.<sup>64</sup>

## La política climática ignora los pesticidas sintéticos

A nivel mundial, los sistemas alimentarios representan más de un tercio de todas las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), de las cuales el 31% proviene de la producción agrícola, incluida la producción de insumos asociados, como pesticidas.<sup>65</sup> Si bien las contribuciones de la agricultura al cambio climático se reconocen cada



vez más en las políticas públicas, existen dos problemas evidentes con los enfoques actuales del problema. En primer lugar, el papel de los pesticidas en las emisiones de GEI se aborda con poca frecuencia y rara vez se consideran soluciones agrícolas como la agroecología que reducirían su impacto. Por ejemplo, ciertas prácticas catalogadas como climáticamente inteligentes, como la labranza cero, a menudo dependen en gran medida de herbicidas sintéticos para controlar las malezas en las granjas convencionales y pueden conducir a una mayor resistencia de las malezas a los herbicidas.<sup>66</sup> En segundo lugar, muchas de las soluciones propuestas no generarían reducciones significativas de las emisiones de GEI o agravarían aún más las desigualdades en la alimentación y la agricultura.

Un ejemplo de una solución falsa es la agricultura de precisión, que promete reducir el uso de pesticidas y fertilizantes derivados del petróleo mediante el uso de tecnologías asistidas por computadora para determinar con mayor precisión la necesidad basada en la presencia de plagas y luego aplicar pesticidas con mayor precisión a los objetivos previstos.<sup>67</sup> Sin embargo, la agricultura de precisión mantiene un sistema que depende de tecnologías y materiales químicos y de alto consumo energético intensivo. Al mismo tiempo, desvía la atención y la inversión en las estrategias agrícolas más efectivas y respetuosas con el clima que tienen beneficios colaterales sociales y de salud pública adicionales, como la agroecología. La agricultura de precisión también aumenta el poder y el control de las empresas agroquímicas, muchas de las cuales poseen las plataformas de agricultura de precisión y los datos ingresados por los agricultores.<sup>68</sup>

Otra solución defectuosa, los mercados de carbono, permite que las empresas agrícolas o los agricultores vendan créditos de carbono a las corporaciones para “compensar” las continuas emisiones de gases de efecto invernadero, lo que perpetúa la dependencia de los combustibles fósiles. Los mercados de carbono tienen un historial deficiente en términos de mitigación climática a largo plazo y se ha demostrado que empeoran las disparidades económicas y raciales.<sup>69</sup>

En cambio, los sistemas agrícolas que no dependen del uso de pesticidas sintéticos, como los que se basan en principios agroecológicos o la agricultura orgánica diversificada, pueden reducir las emisiones de GEI y aumentar la captura de carbono.<sup>70, 71, 72</sup> También aumentan la resiliencia de las granjas al cambio climático y las plagas al mejorar muchos servicios ecosistémicos, como la calidad del agua y la disponibilidad de agua para los cultivos, así como la salud del suelo, la resiliencia de los cultivos a las plagas y enfermedades, y mayores recursos naturales de control de plagas y recursos para polinizadores.<sup>73</sup> El uso de prácticas ecológicas de manejo de plagas y cultivos reduce la necesidad de pesticidas y fertilizantes derivados del petróleo<sup>74</sup> y, por lo tanto, reduce las emisiones asociadas de gases de efecto invernadero. La política pública debe apoyar prácticas manifiestamente eficaces y basadas en la ecología que mitiguen el cambio climático y, al mismo tiempo, hagan que las granjas y las comunidades rurales sean más resilientes a medida que cambian las condiciones climáticas.<sup>69</sup> Más allá del cambio de prácticas, en última instancia, se necesita con urgencia una transformación social de los sistemas agrícolas para evitar una mayor exacerbación de las actuales crisis climática, alimentaria y de biodiversidad. Los expertos internacionales están de acuerdo en que, a diferencia de los ajustes incrementales que dejan un sistema fundamentalmente dependiente de los combustibles fósiles, la agroecología ofrece un enfoque muy transformador.<sup>17</sup>



# Los efectos del cambio climático en las plagas y el uso de pesticidas

Los científicos creen que el cambio climático alterará drásticamente la forma en que se utilizan productos químicos tóxicos como los pesticidas sintéticos, lo que afectará negativamente al medio ambiente y la salud pública. Las investigaciones detalladas a continuación muestran que los efectos de nuestro clima cambiante probablemente llevarán a los agricultores a aumentar el uso de pesticidas sintéticos a menos que comencemos la transición hacia formas de agricultura más seguras que usan prácticas agroecológicas diversificadas y de menor escala.

## Cómo responderán las plagas agrícolas al cambio climático

Se espera que el cambio climático tenga efectos variables sobre las plagas agrícolas, según los cambios climáticos regionales, el tipo de sistema de cultivo y la clase de plaga.<sup>75</sup> La presión de las plagas agrícolas —incluidos los insectos, otros animales, malezas y enfermedades que afectan la productividad de los cultivos— puede aumentar o disminuir según los cambios climáticos regionales, como los cambios en la precipitación y la temperatura.

La ciencia más reciente demuestra que en la época del aumento de las temperaturas, la resiliencia de los cultivos (la capacidad de los cultivos para resistir fuerzas externas, como los impactos climáticos o las plagas) está disminuyendo en las granjas, lo que hace que los cultivos sean más vulnerables a las plagas en general. El estrés térmico y los cambios en los patrones de lluvia reducen la resistencia de los cultivos a las plagas.<sup>76</sup> Las condiciones de sequía en particular, que se espera que empeoren en muchas regiones, pueden debilitar las defensas naturales de las plantas contra las plagas, y los cambios en la biología de las plantas debido a la sequía pueden atraer plagas.<sup>77</sup> Los insectos pueden sentir cambios que indican que las plantas son más vulnerables, como experimentar las temperaturas más altas en la superficie de la planta, la coloración amarillenta de las hojas y los cambios bioquímicos, además de la posibilidad de incluir las ondas de sonido producidas cuando las columnas de agua en el tejido de la planta se rompen debido al estrés hídrico.<sup>78</sup> Dado que el 80% de las tierras agrícolas del mundo son de secano, el rendimiento mundial de los cultivos es muy

susceptible a los cambios en los patrones de lluvia<sup>79</sup> y al aumento de las presiones de plagas que pueden acompañar a los cambios en las precipitaciones.

Además de reducir la resiliencia de los cultivos, es probable que las temperaturas mundiales más altas estimulen un aumento general en la tasa de desarrollo de insectos y el crecimiento de la población de ellos en ciertas regiones, como el Medio Oeste de los Estados Unidos.<sup>76</sup> El incremento de las temperaturas y los cambios en los niveles de humedad pueden aumentar o cambiar la gama geográfica de las plagas de insectos y su capacidad para sobrevivir durante el invierno.<sup>77</sup> Los investigadores han predicho que el aumento de CO<sub>2</sub> y de la temperatura acelerarán el metabolismo de las plagas de insectos y lo que consumen, lo que en última instancia conducirá a la disminución de los rendimientos de los cultivos.<sup>80</sup>

Los científicos predicen que el cambio climático afectará negativamente a ciertos enemigos naturales de las plagas de insectos (conocidos también como benéficos), aumentando aún más la susceptibilidad de los cultivos al daño de las plagas de insectos. Por ejemplo, el cambio climático podría hacer que las plagas de insectos migren a nuevas áreas donde sus enemigos naturales no puedan seguirlos, o que se interrumpa la sincronización entre los ciclos de vida de las plagas y sus enemigos naturales.<sup>81, 82</sup> Se sabe que las aplicaciones de pesticidas son perjudiciales para los organismos benéficos que controlan las poblaciones de plagas, y los aumentos previstos en las aplicaciones de pesticidas reducirían aún más estas poblaciones benéficas. Los impactos específicos de un clima cambiante en estas interacciones entre plagas y organismos benéficos a menudo dependen de la región y del sistema de cultivo.

Los investigadores también han predicho que las condiciones ambientales cambiantes, como del CO<sub>2</sub> y de los aumentos de temperatura, probablemente aumentarán la presión de las malezas en los cultivos. Es más probable que las malezas sean resistentes y se adapten mejor a los efectos del cambio climático que los cultivos porque tienen más diversidad en su acervo genético y una mayor capacidad para aclimatarse fisiológicamente a diferentes condiciones medioambientales.<sup>83</sup> También se anticipa que el cambio climático introducirá malezas en nuevas regiones y cambiará la composición de las especies



de malezas regionales, favoreciendo particularmente a las especies invasoras.<sup>84</sup> Los aumentos esperados en las aplicaciones de herbicidas también aumentarían la prevalencia de malezas resistentes a los herbicidas.<sup>84</sup> Estos factores sugieren que las malezas tendrán una mayor capacidad para desplazar a los cultivos agrícolas en muchas regiones, lo que conducirá a una disminución de los rendimientos.<sup>85</sup>

Los investigadores encuentran que ciertos cambios climáticos afectan a diferentes plagas de diferentes maneras. Por ejemplo, las plagas más pequeñas, como los pulgones, los ácaros o las moscas blancas, pueden eliminarse durante las precipitaciones intensas.<sup>86</sup> En áreas que podrían experimentar más períodos de precipitaciones prolongadas, es probable que las enfermedades fúngicas y bacterianas de las plantas se vuelvan más comunes.<sup>75</sup> Por lo tanto, los impactos climáticos regionales específicos tendrán una influencia significativa sobre qué plagas se vuelven más frecuentes, y se necesita una investigación más exhaustiva para predecir los efectos para cada región específica, cada cultivo determinado y las plagas particulares. Sin embargo, ciertos cambios en el sistema de agricultura, como la diversificación de nuestros sistemas agrícolas, podrían servir como soluciones universales, ya que aumentan la resiliencia de los ecosistemas y, por lo tanto, la resiliencia agrícola al cambio climático, independientemente de la región.<sup>87</sup>

## ¿Qué significa esto para el uso de pesticidas en el contexto del cambio climático?

La ciencia más reciente revela que el cambio climático probablemente aumentará el desplazamiento de pesticidas lejos de sus objetivos previstos, contaminando el medio ambiente y poniendo en peligro la salud pública. Se anticipa que el aumento de las temperaturas resultará en una mayor volatilización de pesticidas (cuando los pesticidas se transforman en gas), lo que significa que más pesticidas terminarán en nuestro aire, en lugar de su objetivo de aplicación.<sup>88</sup> La volatilización es una fuente clave de deriva de pesticidas, que puede causar envenenamiento por pesticidas a cualquier persona expuesta al vapor tóxico.<sup>89</sup> Se espera que un aumento en los casos de lluvias fuertes aumente la pérdida de pesticidas en nuestras vías fluviales, con un estudio que

muestra que las concentraciones de pesticidas en las vías fluviales son 84–2100% más altas después de tormentas de 100 años en comparación con tormentas de dos años.<sup>90</sup>

También se espera que el cambio climático afecte la degradación de los pesticidas, o el proceso por el cual los pesticidas se descomponen en el medio ambiente. Los productos de descomposición del proceso de degradación de pesticidas pueden ser menos tóxicos o, en ocasiones, más tóxicos que el producto original.<sup>91, 92</sup> Los investigadores anticipan que ciertos efectos del cambio climático provocarán una degradación más rápida de los pesticidas, lo que significa que los pesticidas se descompondrán más rápido y se volverán menos efectivos con el tiempo. Por ejemplo, el aumento de la temperatura del suelo se ha relacionado con una duración reducida del control de malezas con herbicidas debido a una degradación más rápida. Por el contrario, la baja humedad del suelo se ha relacionado con una degradación más lenta de los herbicidas.<sup>93</sup> Sin embargo, en general, se espera una degradación más rápida de los pesticidas, lo que probablemente lleve a aplicaciones de pesticidas más frecuentes a tasas de aplicación más altas.<sup>10</sup> Se espera que estos factores combinados contribuyan a un aumento probable, tanto en volumen como en frecuencia, del uso de pesticidas en una variedad de productos.<sup>94</sup>





# Las emisiones de gases de efecto invernadero que provienen de los pesticidas

En las últimas décadas, las emisiones de gases de efecto invernadero y otros impactos medioambientales negativos de los fertilizantes nitrogenados sintéticos han llamado mucho la atención.<sup>95,96</sup> Aunque en la agricultura se usan más fertilizantes nitrogenados que pesticidas, comparativamente se ha prestado poca atención a las emisiones de gases de efecto invernadero que resultan de la producción y el uso de pesticidas. Esto es a pesar de la evidencia de que la fabricación de un kilogramo de ingrediente activo de pesticida requiere, en promedio, unas 10 veces más energía que un kilogramo de fertilizante nitrogenado.<sup>2,3</sup> A medida que las naciones buscan mitigar el cambio climático y desarrollar sistemas agrícolas más sostenibles, es crucial medir y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas con el uso de pesticidas.

La literatura científica actual se divide en dos áreas de enfoque para las emisiones de gases de efecto invernadero de los pesticidas. Algunos estudios se enfocan en las emisiones que resultan de la producción, el transporte y la aplicación de pesticidas en el campo. Otros estudios se enfocan en las emisiones de gases de efecto invernadero a corto y largo plazo que resultan de las interacciones de los pesticidas con el medio ambiente después de la aplicación. Prácticamente ningún estudio calcula las emisiones de gases de efecto invernadero del uso de pesticidas durante el ciclo de vida completo de los productos químicos, lo que probablemente cause subestimaciones de las emisiones reales. Las investigaciones realizadas hasta la fecha también omiten las emisiones asociadas con los desechos de pesticidas, como las existencias obsoletas (reservas de pesticidas que han caducado, cuyo uso es ilegal o no son deseados) y su eliminación a través de la quema y otros métodos que son prácticas comunes en algunas partes del Hemisferio Sur.

## Las emisiones de gases de efecto invernadero de los pesticidas relacionadas con la producción, el transporte y la aplicación en el campo

Las emisiones de gases de efecto invernadero relacionadas con la producción, el transporte y la aplicación de pesticidas están vinculadas al consumo de combustibles

fósiles durante estos procesos. Es importante destacar que el 99% de todos los productos químicos sintéticos, incluidos los pesticidas, se derivan de combustibles fósiles, y varias compañías de petróleo y gas juegan un papel importante en el desarrollo de ingredientes de pesticidas.<sup>1</sup> Desde la Segunda Guerra Mundial, los pesticidas generalmente se han sintetizado a partir de petróleo o derivados del petróleo.<sup>97</sup> ExxonMobil, ChevronPhillips Chemical y Shell producen pesticidas o sus precursores químicos.<sup>1</sup> Muchos pesticidas también están recubiertos de microplásticos, que se derivan de combustibles fósiles, para garantizar una liberación más controlada del producto.<sup>98</sup> Múltiples corporaciones de pesticidas autoinforman altas emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente (CO<sub>2</sub>e) relacionadas con sus operaciones. Por ejemplo, 9,8 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>e resultaron directa o indirectamente de las operaciones de Syngenta en 2021.<sup>99</sup> Esto equivale a las emisiones anuales de dióxido de carbono de más de 2 millones de vehículos de pasajeros.<sup>100</sup> La división Crop Science de Bayer, responsable de sus operaciones de pesticidas, informó que sus emisiones directas sumaron en total alrededor de 2,7 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>e en 2021.<sup>101</sup> La empresa también afirmó que 8,94 millones de toneladas de emisiones de CO<sub>2</sub>e estaban vinculadas indirectamente a la cadena de valor de la empresa en 2021, aunque no especificó cuántas de esas emisiones estaban relacionadas con la división Crop Science.<sup>101</sup>

Aunque se necesitan investigaciones más actualizadas, los investigadores han calculado el uso de energía asociado con la producción de pesticidas específicos, que luego se puede usar para calcular las emisiones de CO<sub>2</sub>e. La producción de herbicidas genera de promedio entre 18,22 y 26,63 kilogramos de CO<sub>2</sub>e por kilogramo producido.<sup>2</sup> La producción de insecticidas genera entre 14,79 y 18,91 kilogramos de CO<sub>2</sub>e por kilogramo y la producción de fungicidas genera de promedio entre 11,94 y 29,19 kilogramos de CO<sub>2</sub>e por kilogramo.<sup>2</sup> Las emisiones de gases de efecto invernadero del glifosato, el herbicida más popular del mundo, producen 31,29 kilogramos de CO<sub>2</sub>e por kilogramo, mientras que otros pesticidas producen más de 40 kilogramos de CO<sub>2</sub>e por kilogramo.<sup>2</sup> Para poner esto en perspectiva, la energía utilizada para producir la cantidad de glifosato usada a nivel mundial

en 2014 equivale a la energía necesaria para alimentar unos 6,25 millones de automóviles durante un año.<sup>102</sup>

Estas estimaciones de emisiones de GEI por pesticidas sólo tienen en cuenta la energía utilizada para producir los ingredientes activos. Una estimación real también debe incluir la energía necesaria para formular los productos pesticidas y fabricar los ingredientes inertes, que pueden constituir la mayor parte de un producto. Por ejemplo, los ingredientes inertes constituyen hasta el 50–75 % de los productos de glifosato.<sup>103</sup> Más de 500 de estos llamados ingredientes inertes se han utilizado o se utilizan actualmente como ingredientes activos. Sin embargo, debido a las protecciones patentadas, la identificación y el volumen de estos ingredientes se mantienen en secreto para el público<sup>26</sup>, lo que hace imposible calcular los requisitos de energía para la fabricación de productos pesticidas en su totalidad.

Los procesos de transporte y de aplicación se suman a las emisiones de GEI relacionadas con el uso de pesticidas. Cuanto más lejos debe viajar un pesticida para llegar a su sitio de aplicación y cuantas más veces por temporada se aplica un pesticida, mayores son las emisiones del uso de pesticidas. El transporte y la aplicación de pesticidas producen menos emisiones que la fabricación de pesticidas, pero las investigaciones muestran que estas emisiones siguen siendo significativas.<sup>104</sup>

## Las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) a corto y largo plazo posteriores a la aplicación de pesticidas

Las emisiones de GEI que resultan del uso de pesticidas no se limitan a las emisiones involucradas en la fabricación, el transporte y la aplicación de pesticidas. Las emisiones adicionales son el resultado de la liberación del pesticida en el medio ambiente y las interacciones posteriores del pesticida con los organismos del suelo y la atmósfera, tanto a corto como a largo plazo.

Algunos pesticidas son ellos mismos gases de efecto invernadero. El fumigante fluoruro de sulfurilo (utilizado para fumigar productos básicos durante el transporte y el almacenamiento) es un potente gas de efecto invernadero. Emitir solo una tonelada estadounidense (0,91 tonelada) de fluoruro de sulfurilo equivale a emitir 4780 toneladas estadounidenses (4336 toneladas métricas) de

CO<sub>2</sub>.<sup>9, 105</sup> Mientras tanto, otros pesticidas interactúan con el medio ambiente para producir gases de efecto invernadero de diversas formas. Dado que a menudo menos del 0,1% de los pesticidas aplicados alcanzan su objetivo,<sup>106</sup> y el resto termina en las hojas de las plantas, en el suelo, en el agua o en el aire,<sup>107</sup> las consecuencias del movimiento fuera de lo proyectado de las emisiones GEI de pesticidas son significativas.

La aplicación de pesticidas puede producir gases de efecto invernadero al emitir compuestos orgánicos volátiles (VOC/COV). Los COV son compuestos que se volatilizan fácilmente en gases que reaccionan con los óxidos de nitrógeno (NOx) y los rayos UV para producir ozono troposférico.<sup>108, 109</sup> El ozono a nivel del suelo, o troposférico, es un importante gas de efecto invernadero que causa problemas respiratorios en las personas<sup>7</sup> y, según el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, causa más daño a las plantas que todos los demás contaminantes del aire combinados.<sup>8</sup> Los estudios han indicado que hasta el 90% de los pesticidas aplicados pueden volatilizarse a los pocos días de la aplicación.<sup>110, 111</sup> Los pesticidas fumigantes suelen estar relacionados con la mayoría de las emisiones de COV.<sup>6</sup> Sin embargo, muchos otros pesticidas también producen COV. El monitoreo en el Valle de San Joaquín de California ha demostrado que el 76% de las emisiones de COV de los pesticidas provienen de pesticidas no fumigantes.<sup>112</sup>

Si bien los efectos adversos de las perturbaciones físicas del suelo, como la labranza intensiva, en los microorganismos y macroorganismos del suelo han sido ampliamente investigados y documentados, muchos menos estudios se han centrado en los impactos de las alteraciones químicas, como pesticidas y herbicidas, en la vida del suelo. Sin embargo, los estudios hasta la fecha indican que el uso de pesticidas a largo plazo tiene un impacto grave en la salud del suelo. Muchos pesticidas diferentes tienen efectos negativos sobre las bacterias y hongos beneficiosos en el suelo.<sup>113</sup> Estas comunidades microbianas y fúngicas del suelo juegan un papel crucial en el secuestro de carbono en el suelo.<sup>114</sup> Las investigaciones indican que los microbios del suelo son responsables de producir las formas más estables de carbono orgánico del suelo que permanecerán en el suelo durante largos períodos de tiempo.<sup>69</sup> Los microorganismos del suelo cumplen una serie de otras funciones importantes, como construir un suelo saludable y, por extensión, cultivos saludables, y aumentar la resiliencia de los cultivos.<sup>115</sup> También regulan los ciclos de carbono y nitrógeno que controlan las



emisiones de dióxido de carbono, metano y óxido nitroso ( $N_2O$ ).<sup>116</sup>

Cuando los investigadores estudiaron los efectos de los fumigantes del suelo en las emisiones de  $N_2O$ , descubrieron que el uso de cloropicrina, un fumigante de uso común, podría aumentar la producción de  $N_2O$  entre siete y ocho veces.<sup>5</sup> El óxido nitroso es un gas de efecto invernadero 300 veces más potente que el dióxido de carbono. Se han documentado efectos similares en la producción de óxido nitroso después de la aplicación de

otros pesticidas y estos efectos fueron evidentes incluso después de 48 días para algunas aplicaciones.<sup>117,118</sup> Los investigadores han sugerido que las grandes emisiones de  $N_2O$  relacionadas con ciertas aplicaciones de pesticidas pueden ser el resultado de los impactos en los microbios del suelo.<sup>117,118</sup> Por lo tanto, el uso de pesticidas puede aumentar las emisiones de GEI, al tiempo que afecta negativamente la actividad microbiana del suelo y la salud del suelo.

## Soluciones: del círculo vicioso al círculo vivo

Los sistemas agrícolas convencionales actuales que dependen de productos químicos sintéticos ponen en peligro la integridad y el funcionamiento del agroecosistema y su capacidad para sustentar cultivos vigorosos y resistentes a las plagas. Estos sistemas requieren una perturbación continua del suelo y la aplicación frecuente de pesticidas y fertilizantes, **un círculo vicioso de destrucción del ecosistema**.

Por el contrario, los sistemas de cultivo agroecológicos muy diversos pueden construir suelos sanos y ecosistemas

en la superficie que suministren nutrientes y control natural de plagas sin productos químicos sintéticos añadidos,<sup>16</sup> **un círculo vivo de nutrientes y prevención de plagas**.

Hemos visto un apoyo creciente y generalizado de alto nivel para reemplazar el enfoque agrícola de insumos químicos que domina actualmente por un enfoque biológico. Varias agencias de las Naciones Unidas e informes de expertos de alto nivel han reconocido la necesidad de la agroecología.<sup>17, 119, 120, 121</sup> Estas perspectivas en evolución han sido informadas por décadas de investigación y milenios de prácticas de pueblos indígenas y agricultores que utilizan enfoques agroecológicos que han demostrado múltiples beneficios. Los beneficios incluyen mejores rendimientos, mayor rentabilidad y mayor equidad de género.<sup>16</sup> La agricultura agroecológica también es más resistente a los efectos del cambio climático<sup>122, 123</sup> y mitiga el cambio climático.<sup>124</sup> Los beneficios adicionales de la agricultura agroecológica incluyen una mejor salud pública, una mejor seguridad y soberanía alimentaria, y una mayor biodiversidad y beneficios sociales, como una mejor cooperación entre los agricultores y las comunidades.<sup>16, 125, 126</sup>

Sin embargo, existen muchos obstáculos estructurales que impiden que los agricultores hagan la transición a prácticas agrícolas diversificadas y agroecológicas. Estas barreras deben abordarse a través de políticas gubernamentales que apoyen una tenencia de la tierra más segura, un mejor acceso al capital durante la transición e incentivos de mercado.<sup>127, 128</sup> A continuación se puede encontrar una lista completa de recomendaciones de políticas.

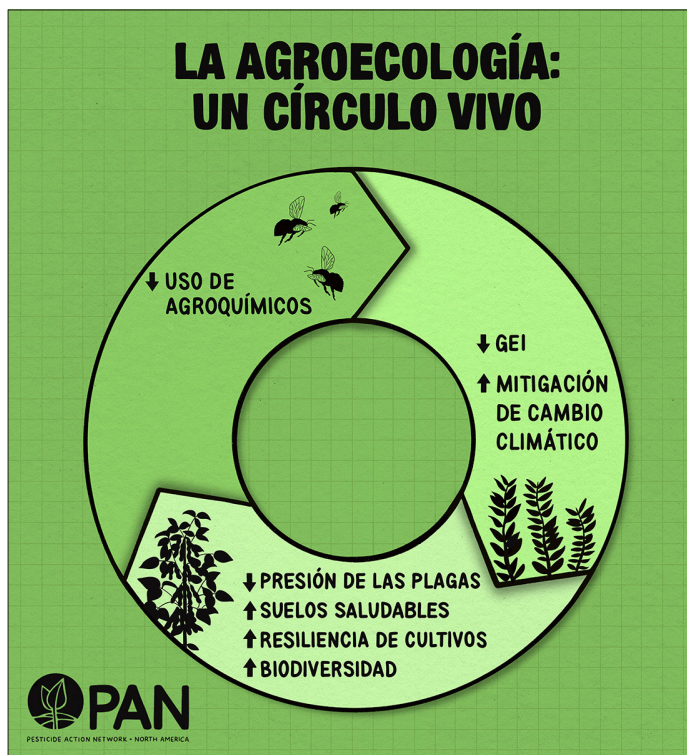


Figura 2.

# Un llamado a la acción

Se deben tomar medidas gubernamentales y colectivas para evitar los peores efectos de la crisis climática actual en nuestros sistemas alimentarios y agrícolas. Se requiere urgentemente una acción decisiva para mitigar el cambio climático y fortalecer la resiliencia climática. Las reducciones significativas en el uso y la dependencia de los pesticidas sintéticos, combinadas con transiciones hacia una agricultura agroecológica diversificada y menos tóxica, pueden ayudarnos a alcanzar estos objetivos necesarios.

Recomendamos las siguientes acciones prioritarias:

1. Las políticas gubernamentales que abordan el cambio climático deben incluir los objetivos de reducción del uso de los pesticidas sintéticos como una estrategia clave para mitigar y adaptarse al cambio climático, así como para lograr la justicia climática. Para alcanzar estos objetivos, las políticas gubernamentales deben incluir metas significativas, mensurables y jurídicamente vinculantes para:
  - a. Reducir el uso de pesticidas sintéticos en un 50% para el año 2030 (en consonancia con la Estrategia de la Granja a la Mesa de la Unión Europea) y en un 90% para el año 2050;
  - b. Reducir la toxicidad de los pesticidas en un 50% para 2030 y en un 90% para 2050. Reducir el nivel de toxicidad de los pesticidas para el cuerpo humano y el medio ambiente es un objetivo fundamental para evitar incentivar los pesticidas que se pueden aplicar en dosis más bajas, pero que presentan niveles más altos de toxicidad;<sup>129</sup>
  - c. Eliminar gradualmente el uso de pesticidas altamente peligrosos (HHP, como son sus siglas en inglés o PAP, como son sus siglas en español) para 2030.<sup>130</sup> El uso de los PAP da como resultado un daño desproporcionadamente mayor para la salud pública y el medio ambiente y, por lo tanto, debe eliminarse gradualmente en un plazo acelerado; y
  - d. Iniciar la transición del 30% de la superficie agrícola total a la agroecología o la agricultura orgánica diversificada para el año 2030, similar a la Estrategia de la Granja a la Mesa de la Unión Europea.

Sin objetivos mensurables como guías para la acción gubernamental, las políticas podrían resultar en gastos

gubernamentales sin lograr reducciones significativas en el uso de pesticidas sintéticos en general, y de pesticidas altamente peligrosos en particular. También reconocemos que los países de todo el mundo tienen una variedad de sistemas agrícolas y prácticas de manejo de plagas, y recomendamos que estos objetivos se adapten a las consideraciones regionales de manera que den prioridad a la salud y el bienestar de las comunidades rurales, los pueblos indígenas, los trabajadores y otras poblaciones históricamente oprimidas.

2. Los gobiernos deben aumentar significativamente la inversión pública en asistencia técnica e investigación participativa centrada en los agricultores, y el apoyo financiero directo para permitir que los agricultores hagan la transición a métodos agroecológicos. Las inversiones públicas deberían:
  - a. Aumentar las oportunidades de intercambio de conocimientos para que los agricultores y los trabajadores agrícolas compartan su experiencia y aprendan más sobre las prácticas agroecológicas en la gestión de granjas.
  - b. Ampliar la capacidad y la calidad de los proveedores de asistencia técnica para brindar apoyo pertinente a los agricultores, tanto a los que practican la agricultura ecológica como a los que buscan hacer la transición a un enfoque agroecológico.
  - c. Brindar asistencia financiera directa, especialmente a pequeños agricultores y agricultores de color, para que adopten o continúen prácticas agroecológicas de gestión agrícola; y
  - d. Aumentar los programas de adquisiciones gubernamentales que incentiven el crecimiento del mercado de productos cultivados en granjas agroecológicas u orgánicas diversificadas
3. Los gobiernos deben adoptar políticas que apoyen los derechos de los trabajadores agrícolas y otros grupos históricamente oprimidos.

Las políticas deben apoyar sistemas agrícolas alternativos como la agroecología o la agricultura orgánica diversificada donde el poder de toma de decisiones está en manos de los más afectados por el uso de pesticidas sintéticos y las prácticas agrícolas explotadoras,



como agricultores de color, pequeños agricultores, trabajadores agrícolas, comunidades de justicia medio ambiental y pueblos indígenas. Si los derechos de estas comunidades a la tierra, el aire y el agua limpios, condiciones de trabajo seguras y alimentos saludables fueran respetados por los que toman las decisiones, no tendríamos el sistema agrícola industrial cargado de químicos que vemos hoy. Las políticas recomendadas para garantizar el cumplimiento de los derechos de estos grupos incluyen políticas para:

- a. Proteger los derechos de los trabajadores a la salud, la seguridad y un salario digno; prohibir y prevenir las condiciones de trabajo abusivas y perjudiciales; otorgar un camino inmediato a la ciudadanía para los trabajadores agrícolas; y proteger sus derechos a la libertad de asociación (la capacidad de sindicalizarse y votar de forma anónima);
- b. Garantizar el acceso seguro a la tierra y la propiedad de los grupos mencionados anteriormente, a todos los cuales históricamente se les han negado los derechos de propiedad de la tierra, incluso a través de reparaciones o la devolución de tierras\*; y

- c. Apoyar el liderazgo y la representación de los más afectados por el uso de pesticidas sintéticos para definir y desarrollar soluciones.

## La acción colectiva

La historia nos ha demostrado cuánto más poder tenemos cuando actuamos colectivamente en lugar de individualmente. Recomendamos que las personas se unan a movimientos colectivos que apoyen los derechos de los pequeños agricultores, trabajadores agrícolas, pueblos indígenas y comunidades de justicia medioambiental para tomar decisiones sobre las tierras que administran. Las personas pueden participar en acciones colectivas con el PAN (Pesticide Action Network) y otras organizaciones y movimientos sociales que luchan para apoyar estos derechos y aprobar políticas agrícolas que minimicen el uso de pesticidas sintéticos y los daños asociados.

Juntos tenemos el poder de transformar la agricultura y lograr la justicia social, medioambiental y climática.

\* "Land back", o devolución de tierras, es un movimiento dirigido por pueblos indígenas para defender su soberanía y devolver las tierras a las personas que las ocuparon antes de la colonización.

## Referencias

- 1 Drugmand, D., Feit, S., Fuhr, L., & Muffett, C. (2022). Fossils, Fertilizers, and False Solutions: How Laundering Fossil Fuels in Agrochemicals Puts the Climate and the Planet at Risk. The Center for International Law. <https://www.ciel.org/wp-content/uploads/2022/10/Fossils-Fertilizers-and-False-Solutions.pdf>.
- 2 Audsley, E., Stacey, K. F., Parsons, D. J., & Williams, A. G. (2009). Estimation of the greenhouse gas emissions from agricultural pesticide manufacture and use. Cranfield University.
- 3 Ahlgren, S., Baky, A., Bernesson, S., Nordberg, Å., Norén, O., & Hansson, P. A. (2008). Ammonium nitrate fertiliser production based on biomass—environmental effects from a life cycle perspective. *Bioresource Technology*, 99(17), 8034-8041.  
Nota: El cálculo se basa en la comparación del cálculo de Audsley, y otros, de 2009 en la Tabla 1 de 370 MJ/kg de ingredientes activos de pesticidas con el nitrógeno de 35,14 MJ/kg
- de Ahlgren, y otros, de 2008 para fertilizantes de uso común producidos convencionalmente usando gas natural.
- 4 U.S. Environmental Protection Agency. (2022). Overview of Greenhouse Gases. <https://www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases-nitrous-oxide>.
- 5 Spokas, K., & Wang, D. (2003). Stimulation of nitrous oxide production resulted from soil fumigation with chloropicrin. *Atmospheric Environment*, 37(25), 3501-3507.
- 6 Marty, M., Spurlock, F., & Barry, T. (2010). Volatile organic compounds from pesticide application and contribution to tropospheric ozone. In *Hayes' Handbook of Pesticide Toxicology* (pp. 571-585). Academic Press.
- 7 U.S. Environmental Protection Agency. (2022). Health Effects of Ozone Pollution. <https://www.epa.gov/ground-level-ozone-pollution/health-effects-ozone-pollution>.
- 8 Agricultural Research Service, U.S. Department of Agriculture. (2016). Effects of Ozone Air Pollution on Plants. <https://www.ars.usda.gov/southeast-area/raleigh-nc/plant-science-research/docs/climate-changeair-quality-laboratory/ozone-effects-on-plants/>.
- 9 Mühle, J., Huang, J., Weiss, R. F., Prinn, R. G., Miller, B. R., Salameh, P. K., ... & Simmonds, P. G. (2009). Sulfuryl fluoride in the global atmosphere. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114(D5).
- 10 Choudhury, P. P., & Saha, S. (2020). Dynamics of pesticides under changing climatic scenario. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(1), 1-3.
- 11 Donley, N., Bullard, R. D., Economos, J., Figueroa, I., Lee, J., Liebman, A. K., ... & Shafiei, F. (2022). Pesticides and environmental injustice in the USA: root causes, current regulatory reinforcement and a path forward. *BMC Public Health*, 22(1), 1-23.
- 12 Ferguson, R., Dahl, K., & DeLonge, M. (2019). Farmworkers at Risk: The Growing Dangers of Pesticides and Heat. Union of Concerned Scientists. <https://www.ucsusa.org/resources/farmworkers-at-risk>.
- 13 Williams, B. (2018). "That we may live": Pesticides, plantations, and environmental racism in the United States South. *Environment and Planning E: Nature and Space*, 1(1-2), 243-267.
- 14 Pörtner, H. O., Roberts, D. C., Poloczanska, E. S., Mintenbeck, K., Tignor, M., Alegría, A., ... & Möller, V. (2022). IPCC, 2022: Summary for Policymakers. *Climate Change*.
- 15 Boedeker, W., Watts, M., Clausen, P., & Marquez, E. (2020). The global distribution of acute unintentional pesticide poisoning: estimations based on a systematic review. *BMC Public Health*, 20(1), 1-19.
- 16 Watts, M., & Williamson, S. (2015). Replacing Chemicals with Biology: Phasing out highly hazardous pesticides

- with agroecology. Pesticide Action Network Asia and the Pacific, Penang, Malaysia. <https://www.panna.org/sites/default/files/Phasing-Out-HHPs-with-Agroecology.pdf>.
- 17 HLPE. (2019). Agroecological and other innovative approaches for sustainable agriculture and food systems that enhance food security and nutrition. High Level Panel of Experts on Food Security and Nutrition of the Committee on World Food Security. <https://www.fao.org/3/ca5602en/ca5602en.pdf>.
  - 18 UN Environment Programme. Agroecology – a contribution to food security? <https://www.unep.org/news-and-stories/story/agroecology-contribution-food-security>.
  - 19 Nicholson, C.C. & Williams, N. M. (2021). Cropland heterogeneity drives frequency and intensity of pesticide use. *Environmental Research Letters*, 16(7), 074008.
  - 20 Gomiero, T., Paoletti, M. G., & Pimentel, D. (2008). Energy and environmental issues in organic and conventional agriculture *Critical Reviews in Plant Sciences*, 27(4), 239-254.
  - 21 Tegmeier, E. M. & Duffy, M. D. (2004). External costs of agricultural production in the United States *International Journal of Agricultural Sustainability*, 2(1), 1-20.
  - 22 Buttel, F. H. (2003). Internalizing the societal costs of agricultural production *Plant Physiology*, 133(4), 1656-1665.
  - 23 Power, A. G. (2010). Ecosystem services and agriculture: tradeoffs and synergies. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 365(1554), 2959-2971.
  - 24 Fernandez-Cornejo, J., Nehring, R. F., Osteen, C., Wechsler, S., Martin, A., & Vialou, A. (2014). Pesticide use in U.S. agriculture: 21 selected crops, 1960-2008. *USDA-ERS Economic Information Bulletin*, (124).
  - 25 Sharma, A., Kumar, V., Shahzad, B., Tanveer, M., Sidhu, G. P. S., Handa, N., & Thukral, A. K. (2019). Worldwide pesticide usage and its impacts on ecosystem. *SN Applied Sciences*, 1(11), 1-16.
  - 26 Cox, C. & Surgan, M. (2006). Unidentified inert ingredients in pesticides: implications for human and environmental health. *Environmental Health Perspectives*, 114(12), 1803-1806.
  - 27 Food and Agriculture Organization of the United Nations. FAOSTAT Online Database. <https://www.fao.org/faostat/en/#home>, Accessed on September 7, 2022.
  - 28 Douglas, M. R. & Tooker, J.F. (2015). Large-scale deployment of seed treatments has driven rapid increase in use of neonicotinoid insecticides and preemptive pest management in US field crops. *Environmental Science & Technology*, 49(8), 5088-5097.
  - 29 Allington, A. (2020). When Is a Pesticide Not a Pesticide? When It Coats a Seed. Bloomberg Law Online. <https://news.bloomberglaw.com/environment-and-energy/when-is-a-pesticide-not-a-pesticide-when-it-coats-a-seed>.
  - 30 Clayton, C. (2022). Treated Seeds a Focus of Consent Decree: EPA to Act on Regulatory Oversight of Pesticide-Treated Seeds. *Progressive Farmer*. <https://www.dnnpf.com/agriculture/web/ag/crops/article/2022/07/06/epa-act-regulatory-oversight-treated>.
  - 31 Maggi, F., Tang, F. H., la Cecilia, D., & McBratney, A. (2019). PEST-CHEMGRIDS, global gridded maps of the top 20 crop-specific pesticide application rates from 2015 to 2025. *Scientific Data*, 6(1), 1-20.
  - 32 California Department of Pesticide Regulation. (2020). Summary of Pesticide Use Report Data 2018. [https://www.cdpr.ca.gov/docs/pur/pur18rep/pur\\_data\\_summary\\_2018.pdf](https://www.cdpr.ca.gov/docs/pur/pur18rep/pur_data_summary_2018.pdf).
  - 33 California Department of Food and Agriculture. California Agricultural Production Statistics. <https://www.cdffa.ca.gov/Statistics/>.
  - 34 Rosenheim, J. A., Cass, B. N., Kahl, H., & Steinmann, K. P. (2020). Variation in pesticide use across crops in California agriculture: Economic and ecological drivers. *Science of The Total Environment*, 733, 138683.
  - 35 Hartzog, C., Abrams, C., Erbsstein, N., London, J.K., & Watterson, S. (2016). California's San Joaquin Valley: A Region and Its Children Under Stress. Sierra Health Foundation and U.C. Davis Center for Regional Change. <https://regionalchange.ucdavis.edu/report/region-and-its-children-under-stress>.
  - 36 Conrow, J. (2020). New study: GMO crops reduce pesticide use, greenhouse gas emissions. Alliance for Science. <https://allianceforscience.cornell.edu/blog/2020/07/new-study-gmo-crops-reduce-pesticide-use-greenhouse-gas-emissions/>.
  - 37 Benbrook, C.M. (2012). Impacts of genetically engineered crops on pesticide use in the U.S. --the first sixteen years. *Environmental Sciences Europe*, 24(1), 1-13.
  - 38 Benbrook, C. M. (2016). Trends in glyphosate herbicide use in the United States and globally. *Environmental Sciences Europe*, 28(1), 1-15.
  - 39 Compson, S. (2017). Failed promises: The rise and fall of GM cotton in India. Soil Association. <https://www.soilassociation.org/media/13510/failed-promises-e-version.pdf>.
  - 40 Pesticide Action Network UK. (2018). Is cotton conquering its chemical addiction? A review of pesticide use in global cotton production. <https://www.pan-uk.org/cotton/#:~:text=These%20concerns%20in%20cotton&text=Globally%2C%20this%20crop%20covers%20just,world%27s%20most%20pesticide%20intensive%20crops>.
  - 41 Thundiyil, J. G., Stober, J., Besbelli, N., & Pronczuk, J. (2008). Acute pesticide poisoning: a proposed classification tool. *Bulletin of the World Health Organization*, 86, 205-209.
  - 42 Starks, S. E., Gerr, F., Kamel, F., Lynch, C. F., Alavanja, M. C., Sandler, D. P., & Hoppin, J. A. (2012). High pesticide exposure events and central nervous system function among pesticide applicators in the Agricultural Health Study. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 85(5), 505-515.
  - 43 U.S. Environmental Protection Agency. (2022). Recognition and Management of Pesticide Poisonings. <https://www.epa.gov/pesticide-worker-safety/recognition-and-management-pesticide-poisonings>.
  - 44 Farmworker Justice. (2013). Exposed and Ignored: How pesticides are endangering our nation's farmworkers. Farmworker Justice. <https://www.farmworkerjustice.org/resource/exposed-and-ignored-how-pesticides-are-endangering-our-nations-farmworkers/>.
  - 45 Calvert, G. M. (2016). Acute occupational pesticide-related illness and injury—United States, 2007–2011. *MMWR. Morbidity and Mortality Weekly Report*, 63.
  - 46 Gillam, C. (2021). 'There's a red flag here': how an ethanol plant is dangerously polluting a US village. *The Guardian*. <https://www.theguardian.com/us-news/2021/jan/10/mead-nebraska-ethanol-plant-pollution-danger>.
  - 47 Pedrosa, T. M. A., Benvindo-Souza, M., de Araújo Nascimento, F., Woch, J., Dos Reis, F. G., & de Melo e Silva, D. (2022). Cancer and occupational exposure to pesticides: a bibliometric study of the past 10 years. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(12), 17464-17475.
  - 48 Schafer, K.S., & Marquez, E.C. (2012). A Generation in Jeopardy: How pesticides are undermining our children's health & intelligence. Pesticide Action Network North America, Oakland, CA. <https://www.panna.org/sites/default/files/KidsHealthReportOct2012.pdf>.
  - 49 Dereumaux, C., Fillol, C., Quénel, P., & Denys, S. (2020). Pesticide exposures for residents living close to agricultural lands: A review. *Environment International*, 134, 105210.
  - 50 U.S. Geological Survey. (2018) Pesticide in Groundwater. <https://www.usgs.gov/special-topics/water-science-school/science/pesticides-groundwater>.
  - 51 Benbrook, C. M., & Davis, D. R. (2020). The dietary risk index system: a tool to track pesticide dietary risks. *Environmental Health*, 19(1), 1-18.
  - 52 Syafrudin, M., Kristanti, R. A., Yuniarto, A., Hadibarata, T., Rhee, J., Al-Onazi, W. A., & Al-Mohaimed, A. M. (2021). Pesticides in drinking water—a review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(2), 468.
  - 53 Roberts, J. R., Karr, C. J., Council on Environmental Health, Paulson, J. A., Brock-Utne, A. C., Brumberg, H. L., ... & Wright, R. O. (2012). Pesticide exposure in children. *Pediatrics*, 130(6), e1765-e1788.
  - 54 Reeves, M., Katten, A., & Guzman, M. (2002). Fields of Poison 2002: California Farmworkers and Pesticides. Pesticide Action Network, San Francisco, CA. <https://www.panna.org/sites/default/files/FieldsofPoison2002Eng.pdf>.
  - 55 Guarna, O.N. (2022). Exposed and at Risk: Opportunities to Strengthen Enforcement of Pesticide Regulations for Farmworker Safety. Center for Agriculture and Food Systems and Farmworker Justice. <https://www.vermontlaw.edu/sites/default/files/2022-09/Exposed-and-At-Risk.pdf>.
  - 56 Curl, C. L., Spivak, M., Phinney, R., & Montrose, L. (2020). Synthetic pesticides and health in vulnerable populations: agricultural workers. *Current Environmental Health Reports*, 7(1), 13-29.
  - 57 Isenring, R. (2010). Pesticides and the loss of biodiversity. Pesticide Action Network Europe. <https://www.pan-europe.info/issues/pesticides-and-loss-biodiversity>.
  - 58 Sánchez-Bayo, F., & Wyckhuys, K. A. (2019). Worldwide decline of the entomofauna: A review of its drivers. *Biological Conservation*, 232, 8-27.
  - 59 Hallmann, C. A., Sorg, M., Jongejans, E., Siepel, H., Hofland, N., Schwan, H., ... & de Kroon, H. (2017). More than 75 percent decline over 27 years in total flying insect biomass in protected areas. *PloS One*, 12(10), e0185809.
  - 60 Christen, V., Schirrmann, M., Frey, J. E., & Fent, K. (2018). Global transcriptomic effects of environmentally relevant concentrations of the neonicotinoids clothianidin, imidacloprid, and thiamethoxam in the brain of honey bees (*Apis mellifera*). *Environmental Science & Technology*, 52(13), 7534-7544.
  - 61 Colin, T. Meikle, W. G., Wu, X., & Barron, A. B. (2019). Traces of a neonicotinoid induce precocious foraging and reduce foraging performance in honey bees. *Environmental Science & Technology*, 53(14), 8252-8261.
  - 62 U.S. Food and Drug Administration. (2018). Helping Agriculture's Helpful Honey Bees. <https://www.fda.gov/animal-veterinary/animal-health-literacy/helping-agricultures-helpful-honey-bees#:~:text=These%20plants%20rely%20on%20other,carries%20it%20to%20the%20stigma>
  - 63 Pesticide Action Network. (2020). Pesticides and Soil Health: State of the Science and Viable Alternatives. Pesticide Action Network, Berkeley, CA.
  - 64 Gunstone, T., Cornelisse, T., Klein, K., Dubey, A., & Donley, N. (2021). Pesticides and soil invertebrates: A hazard assessment. *Frontiers in Environmental Science*, 122.



- 65 Tubiello, F. N., Karl, K., Flammini, A., Gütschow, J., Conchedda, G., Pan, X. & Torero, M. (2022). Pre-and post-production processes increasingly dominate greenhouse gas emissions from agri-food systems. *Earth System Science Data*, 14(4), 1795-1809.
- 66 Huggins, D. R., & Reganold, J. P. (2008). No-till: the quiet revolution. *Scientific American*, 299(1), 70-77.
- 67 Oliver, M. A., Bishop, T. F., & Marchant, B. P. (Eds.). (2013). Precision agriculture for sustainability and environmental protection. Abingdon: Routledge.
- 68 Schimpf, M. (2020). Digital Farming: Can digital farming really address the systemic causes of agriculture's impact on the environment and society, or will it entrench them?. Friends of the Earth Europe. <http://www.foeeurope.org/sites/default/files/gmos/2020/foee-digital-farming-paper-feb-2020.pdf>
- 69 National Sustainable Agriculture Coalition. (2012). Climate Solutions for Farmers: Invest in proven federal programs, not carbon markets. National Sustainable Agriculture Coalition, Washington, D.C. [https://sustainableagriculture.net/wp-content/uploads/2021/06/Climate-Solutions-for-Farmers\\_-\\_Invest-in-Proven-Conservation-Programs-Not-Carbon-Markets-1.pdf](https://sustainableagriculture.net/wp-content/uploads/2021/06/Climate-Solutions-for-Farmers_-_Invest-in-Proven-Conservation-Programs-Not-Carbon-Markets-1.pdf)
- 70 Scialabba, N. E. H., & Müller-Lindenlauf, M. (2010). Organic agriculture and climate change. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 25(2), 158-169.
- 71 Gattinger, A., Muller, A., Haeni, M., Skinner, C., Fliessbach, A., Buchmann, N., ... & Niggli, U. (2012). Enhanced top soil carbon stocks under organic farming. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(44), 18226-18231.
- 72 Lori, M., Symonczak, S., Mäder, P., De Deyn, G., & Gattinger, A. (2017). Organic farming enhances soil microbial abundance and activity—A meta-analysis and meta-regression. *PLoS One*, 12(7), e0180442.
- 73 Palomo-Campesino, S., González, J. A., & García-Llorente, M. (2018). Exploring the connections between agroecological practices and ecosystem services: A systematic literature review. *Sustainability*, 10(12), 4339.
- 74 Wezel, A., Casagrande, M., Celette, F., Vian, J. F., Ferrer, A., & Peigné, J. (2014). Agroecological practices for sustainable agriculture. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 34(1), 1-20.
- 75 Sutherst, R. W., Constable, F., Finlay, K. J., Harrington, R., Luck, J., & Zalucki, M. P. (2011). Adapting to crop pest and pathogen risks under a changing climate. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2(2), 220-237.
- 76 Taylor, R. A. J., Herms, D. A., Cardina, J., & Moore, R. H. (2018). Climate change and pest management: Unanticipated consequences of trophic dislocation. *Agronomy*, 8(1), 7.
- 77 Skendzić, S., Zovko, M., Živković, I. P., Lešić, V., & Lemić, D. (2021). The impact of climate change on agricultural insect pests. *Insects*, 12(5), 440.
- 78 Dunn, D., & Crutchfield, J. P. (2006). Insects, trees, and climate: The bioacoustic ecology of deforestation and entomogenic climate change. *arXiv preprint q-bio/0612019*.
- 79 UN World Water Assessment Programme. (2009). *The United Nations World Water Development Report 3: Water in a Changing World (Two-Volume Set)*. Earthscan.
- 80 Tonnang, H. E., Sokame, B. M., Abdel-Rahman, E. M., & Dubois, T. (2022). Measuring and modelling crop yield losses due to invasive insect pests under climate change. *Current Opinion in Insect Science*, 100873.
- 81 Thomson, L. J., Macfadyen, S., & Hoffmann, A. A. (2010). Predicting the effects of climate change on natural enemies of agricultural pests. *Biological Control*, 52(3), 296-306.
- 82 Cho, C & Ishii M. (2021). Climate Change and Pests. Pesticide Action Network North America. <https://www.panna.org/sites/default/files/202107Climate%26Pests%20FINAL.pdf>
- 83 Varanasi, A., Prasad, P. V., & Jugulam, M. (2016). Impact of climate change factors on weeds and herbicide efficacy. *Advances in Agronomy*, 135, 107-146.
- 84 Peters, K., Breitsameter, L., & Gerowitt, B. (2014). Impact of climate change on weeds in agriculture: a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 34(4), 707-721.
- 85 Anwar, M. P., Islam, A. M., Yeasmin, S., Rashid, M. H., Juraimi, A. S., Ahmed, S., & Shrestha, A. (2021). Weeds and Their Responses to Management Efforts in A Changing Climate. *Agronomy* 11(10), 1921.
- 86 Pathak, H., Aggarwal, P. K., & Singh, S. D. (2012). Climate change impact, adaptation and mitigation in agriculture: methodology for assessment and applications. *Indian Agricultural Research Institute, New Delhi*, 302.
- 87 Lin, B. B. (2011). Resilience in agriculture through crop diversification: adaptive management for environmental change. *BioScience*, 61(3), 183-193.
- 88 Noyes, P. D., McElwee, M. K., Miller, H. D., Clark, B. W., Van Tiem, L. A., Walcott, K. C., ... & Levin, E. D. (2009). The toxicology of climate change: environmental contaminants in a warming world. *Environment International*, 35(6), 971-986.
- 89 Lee, S. J., Mehler, L., Beckman, J., Diebolt-Brown, B., Prado, J., Lackovic, M., ... & Calvert, G. M. (2011). Acute pesticide illnesses associated with off-target pesticide drift from agricultural applications: 11 States, 1998–2006. *Environmental Health Perspectives*, 119(8), 1162-1169.
- 90 Chiovarou, E. D., & Siewicki, T. C. (2008). Comparison of storm intensity and application timing on modeled transport and fate of six contaminants. *Science of the Total Environment*, 389(1), 87-100.
- 91 Pathak, V. M., Verma, V. K., Rawat, B. S., Kaur, B., Babu, N., Sharma, A., ... & Cunill, J. M. (2022). Current status of pesticide effects on environment, human health and it's eco-friendly management as bioremediation: A comprehensive review. *Frontiers in Microbiology*, 2833.
- 92 Ji, C., Song, Q., Chen, Y., Zhou, Z., Wang, P., Liu, J., ... & Zhao, M. (2020). The potential endocrine disruption of pesticide transformation products (TPs): The blind spot of pesticide risk assessment. *Environment International*, 137, 105490.
- 93 Bailey, SW. (2004). Climate change and decreasing herbicide persistence. *Pest Management Science: formerly Pesticide Science*, 60(2), 158-162.
- 94 Delcour, I., Spanoghe, P., & Uyttendaele, M. (2015). Literature review: Impact of climate change on pesticide use. *Food Research International*, 68, 7-15.
- 95 Tesfaye, K., Takele, R., Sapkota, T. B., Khatri-Chhetri, A., Solomon, D., Stirling, C., & Albanito, F. (2021). Model comparison and quantification of nitrous oxide emission and mitigation potential from maize and wheat fields at a global scale. *Science of the Total Environment*, 782, 146696.
- 96 Good, A. G., & Beatty, P. H. (2011). Fertilizing nature: a tragedy of excess in the commons. *PLoS Biology*, 9(8), e1001124.
- 97 Jungers, G., Portet-Koltalo, F., Cosme, J., & Seralini, G. E. (2022). Petroleum in Pesticides: A Need to Change Regulatory Toxicology. *Toxics*, 10(11), 670.
- 98 Center for International Environmental Law. (2022). *Sowing a Plastic Planet: How Microplastics in Agrochemicals Are Affecting Our Soils, Our Food, and Our Future*. <https://www.ciel.org/reports/microplastics-in-agrochemicals/>
- 99 Syngenta. (2021). ESG Report 2021. <https://www.syngenta.com/sites/syngenta/files/2022-03/Syngenta-AG-ESG-Report-2021.pdf>
- 100 U.S. Environmental Protection Agency. (2022). Greenhouse Gas Emissions from a Typical Passenger Vehicle. <https://www.epa.gov/greenvehicles/greenhouse-gas-emissions-typical-passenger-vehicle#:~:text=typical%20passenger%20vehicle%3F,A%20typical%20passenger%20vehicle%20emits%20about%204.6%20metric%20tons%20of,8%2C887%20grams%20of%20CO2>
- 101 Bayer. (2021). Sustainability Report 2021. <https://www.bayer.com/sites/default/files/2022-03/Bayer-Sustainability-Report-2021.pdf>
- 102 Nota: Se utilizan aproximadamente 454 MJ/kg para producir, formular, envasar y transportar glifosato (Audsley 2009). Utilizando la estimación del uso mundial de glifosato de 2014 de 825,8 millones de kg (Benbrook 2016), la energía utilizada para producir 825,8 millones de kg de glifosato es de aproximadamente 359,6 mil millones de MJ. Hay 121,3 MJ en un galón de gasolina. El uso anual promedio de combustible por parte de los automóviles es equivalente a 474 galones de gasolina (<https://afdc.energy.gov/data/10308>). Por lo tanto, la energía utilizada para producir el uso mundial de glifosato por año equivale al combustible de aproximadamente 6,25 millones de automóviles por año.
- 103 Iowa State University Extension and Outreach. Glyphosate - A Review. <https://crops.extension.iastate.edu/encyclopedia/glyphosate-review>
- 104 Heimpel, G. E., Yang, Y., Hill, J. D., & Ragsdale, D. W. (2013). Environmental consequences of invasive species: greenhouse gas emissions of insecticide use and the role of biological control in reducing emissions. *PLoS One*, 8(8), e72293.
- 105 U.S. Environmental Protection Agency. Understanding Global Warming Potentials. [https://www.epa.gov/ghgemissions/understanding-global-warming-potentials#:~:text=Methane%20\(CH4\)%20is%20estimated,uses%20a%20different%20value](https://www.epa.gov/ghgemissions/understanding-global-warming-potentials#:~:text=Methane%20(CH4)%20is%20estimated,uses%20a%20different%20value)
- 106 Pimentel, D. & Levitan, L. (1986). Pesticides: amounts applied and amounts reaching pests. *Bioscience*, 36(2), 86-91.
- 107 Margni, M., Rossier, D., Crettaz, P., & Jolliet, O. (2002). Life cycle impact assessment of pesticides on human health and ecosystems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 93(1-3), 379-392.
- 108 U.S. Environmental Protection Agency. What are Volatile Organic Compounds (VOCs)? <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/what-are-volatile-organic-compounds-vocs>
- 109 Martin, T. (2013). Volatile Organic Compound (VOC) Emissions from Pesticides. University of California, Agriculture and Natural Resources. <https://ucanr.edu/blogs/blogcore/postdetail.cfm?postnum=11273>
- 110 Jiang, J., Chen, L., Sun, Q., Sang, M., & Huang, Y. (2015). Application of herbicides is likely to reduce greenhouse gas (N2O and CH4) emissions from rice-wheat cropping systems. *Atmospheric Environment*, 107, 62-69.
- 111 Das, S., Ghosh, A., & Adhya, T. K. (2011). Nitrous oxide and methane emission from a flooded rice field as influenced by separate and combined application of herbicides bensulfuron methyl and pretilachlor. *Chemosphere*, 84(1), 54-62.
- 112 Department of Pesticide Regulation. Preliminary Estimates of Volatile Organic Compound Emissions from Pesticides in the San Joaquin Valley: Emissions for 2018. [https://www.cdpr.ca.gov/docs/emon/vocs/vocproj/voc\\_emissions\\_2018.pdf](https://www.cdpr.ca.gov/docs/emon/vocs/vocproj/voc_emissions_2018.pdf)
- 113 Chowdhury, A., Pradhan, S., Saha, M., & Sanyal, N. (2008). Impact of pesticides on soil microbiological parameters and possible bioremediation strategies. *Indian Journal of Microbiology*, 48(1), 114-127.
- 114 Crowther, T. W., Sokol, N. W., Oldfield, E. E., Maynard, D. S., Thomas, S. M., & Bradford, M. A. (2015). Environmental stress response limits

- microbial necromass contributions to soil organic carbon. *Soil Biology and Biochemistry*, 85, 153-161.
- 115 Sahu, P. K., Singh, D. P., Prabha, R., Meena, K. K., & Abhilash, P. C. (2019). Connecting microbial capabilities with the soil and plant health: Options for agricultural sustainability. *Ecological Indicators*, 105, 601-612.
- 116 Oertel, C., Matschullat, J., Zurba, K., Zimmermann, F., & Erasmí, S. (2016). Greenhouse gas emissions from soils—A review. *Geochemistry*, 76(3), 327-352.
- 117 Spokas, K., Wang, D., & Venterea, R. (2005). Greenhouse gas production and emission from a forest nursery soil following fumigation with chloropicrin and methyl isothiocyanate. *Soil Biology and Biochemistry*, 37(3), 475-485.
- 118 Jezierska-Tys, S., Joniec, J., Bednarz, J., & Kwiatkowska, E. (2021). Microbiological Nitrogen Transformations in Soil Treated with Pesticides and Their Impact on Soil Greenhouse Gas Emissions. *Agriculture*, 11(8), 787.
- 119 UN Environment Programme. Agroecology – a contribution to food security? <https://www.unep.org/news-and-stories/story/agroecology-contribution-food-security>
- 120 IPBES. (2019). Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. <https://ipbes.net/global-assessment>
- 121 IPES-Food. (2016). From uniformity to diversity: a paradigm shift from industrial agriculture to diversified agroecological systems. International Panel of Experts on Sustainable Food systems. [https://www.ipes-food.org/\\_img/upload/files/UniformityToDiversity\\_FULL.pdf](https://www.ipes-food.org/_img/upload/files/UniformityToDiversity_FULL.pdf)
- 122 Leippert, F., Darmaun, M., Bernoux, M., & Mpheshe, M. (2020). The potential of agroecology to build climate-resilient livelihoods and food systems. FAO and Biovision. <https://orgprints.org/id/eprint/38492/1/darmaun-et-al-2020-rural21-Vol54-Issue3-p42-43.pdf>
- 123 Altieri, M. A., Nicholls, C. I., Henao, A., & Lana, M. A. (2015). Agroecology and the design of climate change-resilient farming systems. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 35(3), 869-890.
- 124 Snapp, S., Kebede, Y., Wollenberg, E., Dittmer, K.M., Brickman S., Egler, C., & Shelton, S. (2021). Agroecology and climate change rapid evidence review: Performance of agroecological approaches in low- and middle- income countries. CGIAR Research Program on Climate Change, Agriculture and Food Security (CCAFS). <https://cgspace.cgiar.org/bitstream/handle/10568/113487/CCAFS%20FCDO%20AE%20Review%202021.pdf>
- 125 Biovision Foundation for Ecological Development and Global Alliance for the Future of Food. (2019). Beacons of Hope: Accelerating Transformations to Sustainable Food Systems. Global Alliance for the Future of Food. [https://foodsystemtransformations.org/wp-content/uploads/2019/08/BeaconsOfHope\\_Report\\_082019.pdf](https://foodsystemtransformations.org/wp-content/uploads/2019/08/BeaconsOfHope_Report_082019.pdf)
- 126 Anderson, C. R., Pimbert, M. P., Chappell, M. J., Brem-Wilson, J., Claeys, P., Kiss, C. & Singh, J. (2020). Agroecology now-connecting the dots to enable agroecology transformations. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 44(5), 561-565.
- 127 Esquivel, K. E., Carlisle, L., Ke, A., Olimpi, E. M., Baur, P., Ory, J., ... & Bowles, T. M. (2021). The "Sweet Spot" in the Middle: Why Do Mid-Scale Farms Adopt Diversification Practices at Higher Rates? *Front. Sustain. Food Syst.* 5: 734088. doi: 10.3389/fsufs.
- 128 Carlisle, L., Esquivel, K., Baur, P., Ichikawa, N. F., Olimpi, E. M., Ory, J., ... & Bowles, T. M. (2022). Organic farmers face persistent barriers to adopting diversification practices in California's Central Coast. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 46(8), 1145-1172.
- 129 Pesticide Action Network UK. (2018). Introducing a UK pesticide reduction target. <https://www.pan-uk.org/pesticide-reduction-target/>.
- 130 Pesticide Action Network International. (2021). No more excuses: Global network demands phase out of highly hazardous pesticides by 2030. <https://pan-international.org/release/no-more-excuses-global-network-demands-phase-out-of-highly-hazardous-pesticides-by-2030/>.



**Las autoras:** Asha Sharma, co-directora organizadora; Margaret Reeves, científica senior; Calista Washburn, ex becaria de política

### Agradecimientos

Las autoras desean agradecer a los revisores Sarah Aird, de Californians for Pesticide Reform; Janaki Anagha de California Farmer Justice Collaborative; Rajan Bhopal, de Pesticide Action Network UK; la Dra. Hannah Waterhouse, de la Universidad de California, Berkeley; y Mark Schonbeck, de la Virginia Association for Biological Farming y la Organic Farming Research Foundation. Su tiempo y sus contribuciones fueron fundamentales para la calidad de este informe.

Nuestro agradecimiento también a Emeline Mourocq de Giving Life to Data por su ayuda con la investigación inicial, y a Marie Hussein y Fanny Hennebo por producir la traducción al francés. Y gracias a Brenda Cervantes por la versión en español.

Las autoras desean agradecer a nuestros compañeros de Pesticide Action Network North America Marcia Ishii, Emily Summerlin, Rob Faux, y Brenda J. Willoughby por su revisión y sus contribuciones a este informe.

