

**Problemática Ambiental Causada Por El Uso Del Glifosato En El Contexto
Productivo Agrario Colombiano**

Carlos Andrés Torres Romero

Universidad Nacional Abierta y a Distancia -UNAD

Escuela de Ciencias Agrarias, Pecuarias y del Medio Ambiente - ECAPMA

Ingeniería Ambiental

Bogotá, Colombia

2021

Problemática Ambiental Causada Por El Uso Del Glifosato En El Contexto Productivo

Agrario Colombiano

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar por el título de

Ingeniero Ambiental

Monografía Aplicada

Carlos Andrés Torres Romero

Asesor:

Pablo Alberto Quintero Cotes

Ingeniero Ambiental y Sanitario

Universidad Nacional Abierta y a Distancia - UNAD

Escuela de Ciencias Agrarias, Pecuarias y del Medio Ambiente (ECAPMA)

Ingeniería Ambiental

Bogotá

2021

Resumen

El glifosato, es un herbicida de amplio espectro, no selectivo y de acción sistémica, altamente efectivo para matar cualquier tipo de planta, es absorbido principalmente por las partes verdes de los tejidos vegetales, BAYER, la farmacéutica que lo comercializa en la actualidad, ha sostenido que no tiene efectos nocivos directos sobre el ambiente, ni la salud humana; sin embargo, en algunos países se ha considerado su utilización como peligrosa. En este trabajo que buscaba como objetivo reconocer la problemática ambiental generada por la utilización de glifosato como herbicida en el sector agrario colombiano, se concluyó, evidenciando los diversos efectos causados por el glifosato a nivel general, en cuanto a su uso en el mundo.

En Colombia se demuestra la falta de artículos especializados, en cuanto a índole científico, con respecto a este tema.

Palabras clave: Glifosato, Herbicida, Contaminación, Salud, Colombia.

Abstract

Glyphosate is a broad spectrum, non-selective and systemic action herbicide, highly effective in killing any type of plant, it is absorbed mainly by the green parts of plant tissues, BAYER, the pharmaceutical company that currently markets it, has sustained that it does not have direct harmful effects on the environment, nor on human health; however, in some countries its use has been considered dangerous. In this work that sought to recognize the environmental problems generated by the use of glyphosate as a herbicide in the Colombian agricultural sector, it was concluded that there is a diversity of evidence regarding the effects of glyphosate at a general level and in the world. In Colombia, the lack of specialized scientific articles on the subject is evident in Colombia. During the last government of the country, the issue of the use of glyphosate, has caused a lot of controversy regarding its use and even more because of the way it is applied aerially.

Keywords: Glyphosate, Herbicide, Pollution, Health, Colombia.

Tabla de Contenido

Resumen	3
Abstracto.....	4
Introducción.....	8
Objetivos.....	12
Objetivo General.....	12
Objetivos específicos.....	12
Generalidades glifosato.....	13
Antecedentes.....	20
Efectos ambientales Del Glifosato.....	23
Problemática Ambiental del Glifosato en Colombia.....	35
Conclusiones.....	42
Recomendaciones.....	44
Bibliografía.....	45

Lista de tablas

Tabla 1. Propiedades fisicoquímicas del glifosato.....	14
--	----

Tabla de ilustraciones

Ilustración 1. Estructura química del glifosato	13
Ilustración 2. Reacciones para la síntesis de glifosato.....	18
Ilustración 3. Sistema de producción de glifosato.....	19
Ilustración 4. Esquema de absorción del herbicida no selectivo.....	22
Ilustración 5. Presentación clásica comercial.....	33
Ilustración 6. Principales zonas del país fumigadas con glifosato.....	36

Introducción

El glifosato, es un herbicida de amplio espectro, no selectivo y de acción sistémica, altamente efectivo para matar cualquier tipo de planta, es absorbido principalmente por las partes verdes de los tejidos vegetales. Una vez ingresado en la planta, inhibe la acción del ácido siquímico, paso obligado hacia la síntesis de tres aminoácidos esenciales, presentes en las plantas superiores y ciertos microorganismos, pero no en animales, BAYER, ha sostenido que no tiene efectos nocivos directos sobre el ambiente y la salud humana; sin embargo, en algunos países se ha considerado su utilización como peligrosa.

En Colombia desde 1994 se usa el glifosato por la aprobación hecha del Programa de Erradicación de Cultivos Ilícitos con Glifosato (PEGIC), reglamentado por el Consejo Nacional de Estupefacientes (3). En el año 2000, con el establecimiento del Plan Colombia se intensificaron las actividades de erradicación, con las cuales se logró disminuir las hectáreas cultivadas de hoja de coca en un 11,3% durante el primer año de implementación y alcanzando en el segundo año una caída de más del 30% (4), que significó un avance importante en términos de eficiencia. Sin embargo, por parte de las comunidades objeto de aspersion se tuvo una percepción negativa frente a la estrategia ya que el herbicida no sólo atacó los cultivos de hoja de coca o de marihuana, sino también cultivos de uso lícito como el cacao y los pastizales con vocación ganadera (5). Algunos autores y el actual gobierno consideran que aún es viable la utilización del glifosato en Colombia después del acuerdo de paz firmado en 2016. La verdad, la utilización del

herbicida actualmente es una práctica común en el campo colombiano, pero debido a la permanente discusión que ha generado, este trabajo busca revisar desde una perspectiva holística el impacto en salud pública y ambiental que han tenido en el país desde su utilización y que por consiguiente puede ayudar a la toma de decisiones para el agricultor.

El glifosato es el ingrediente activo en muchos herbicidas comercializados en todo el mundo, incluyendo la conocida formulación Roundup. Los herbicidas a base de glifosato son ampliamente utilizados para el control de malezas ya que no son selectivos; el glifosato elimina toda la vegetación. En Colombia ha sido ampliamente utilizado y promovido como seguro. Sin embargo, una creciente evidencia científica cuestiona la seguridad del glifosato en términos de salud pública e impactos ambientales. Existe evidencia de que productos a base de glifosato pueden tener efectos adversos sobre la salud humana y en general del ambiente. En ese sentido, y en función de la relevancia que tiene su utilización en un país megadiverso, una revisión analítica sobre los riesgos, ventajas y desventajas de su utilización en el actual contexto agrícola de Colombia y las nacientes perspectivas sobre sostenibilidad y convivencia con agrotóxicos puede generar herramientas de juicio para la toma de decisiones en función de su utilización.

Entre las propiedades biológicas del glifosato y sus sales, virtualmente lo hacían no tóxico para mamíferos, aves, peces, insectos y muchas bacterias (Grossbard & Atkinson, 1984). El glifosato, desarrollado y comercializado en el 1970 por Monsanto Company y actualmente por una variedad de empresas a lo largo del mundo. Tiene una

alta eficiencia y amplio espectro según (Murtaza & William, 2001; Qian, 2020). En reciente años, la demanda del mercado para el glifosato ha crecido dramáticamente por la creciente utilización de plantaciones transgénicas desde la perspectiva de monocultivo y en ese sentido se han generado gran cantidad de métodos de síntesis de compuesto (Lu et al., 2009; Qian, 2020). Para el mercado colombiano, los mayores proveedores de glifosato son China, Estados Unidos, Brasil y Panamá. De hecho, China es el mayor productor mundial de glifosato y representa alrededor de 30% de las exportaciones del químico

El glifosato ejerce su acción por inhibición de la actividad de la enzima 5-enolpiruvilshikimo-3-fosfo sintasa (EPSP), por lo que no permite la síntesis de los aminoácidos aromáticos fenilalanina, tirosina y triptófano, esenciales para la formación de otros productos como ligninas, alcaloides y ácidos benzoicos que son necesarios para el crecimiento y desarrollo de las plantas (Grossbard & Atkinson, 1984; Franz et al., 1997). A pesar de que el mecanismo de acción es aparentemente específico, sus efectos deletéreos a largo plazo sobre los organismos que se encuentran potencialmente expuestos muestran por un alto estrés metabólico e intoxicación en humanos (Qian et al., 2020; Martin, 2020).

El glifosato es ampliamente utilizado en el sector agrario colombiano para la eliminación de malezas, sin embargo, su uso trae un impacto ambiental que podría ser mitigado mediante prácticas en campo generadas por los productores. Para ello es fundamental que se cuente con información significativa y validada mediante la comunidad científica. No existe, una revisión dirigida a la utilización del glifosato y

alternativas para mitigar sus efectos. En ese sentido, esta revisión será una revisión útil para la toma de decisiones para los agricultores y en general para todo profesional interesado en estudiar los efectos del glifosato en el contexto agroambiental colombiano.

Objetivos

Objetivo General

Reconocer la problemática ambiental generada por la utilización de glifosato como herbicida en el sector agrario colombiano.

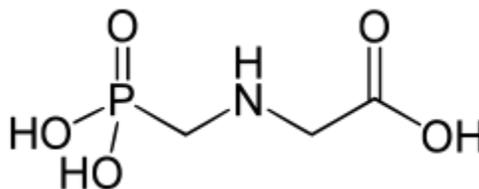
Objetivos Específicos

- Establecer efectos ambientales del uso del glifosato como herbicida en Colombia.
- Orientar puntos fuertes, débiles, amenazas y oportunidades mediante Matriz DOFA por la utilización de glifosato en el sector agrario en Colombia.
- Realizar un análisis del comportamiento ambiental del glifosato en función del material bibliográfico disponible extrapolado al contexto colombiano.

Generalidades Del Glifosato

El Glifosato es un herbicida post emergente, no selectivo, cuya estructura corresponde a un α -aminoácido simple de glicina, sustituido en el átomo de nitrógeno por un grupo Fosfometilo. Entre las propiedades biológicas del glifosato y sus sales virtualmente no tóxico para mamíferos, aves, peces, insectos y muchas bacterias (Grossbard & Atkinson, 1984). El glifosato es un compuesto cullas constante de disociación (pK_a) permite que sea altamente reactivo con el medio y difícilmente soluble en solventes orgánicos.

Ilustración 1



. Estructura química del glifosato (Bravo, 2004).

La alta polaridad de la molécula glifosato la hace prácticamente insoluble en solventes orgánicos.

Este herbicida usualmente es comercializado como la sal isopropilamina de N-fosfonometilglicina, un producto de fácil manejo (Grossbard & Atkinson, 1984).

Aplicado a bajas dosis, sirve como regulador del crecimiento de las plantas.

Tabla 1

Propiedades	Compuesto puro
Fórmula molecular	$C_3H_8NO_5P$
Peso molecular	169.08 g/mol
Estado físico	Sólido blanco
Olor	Inodoro
Densidad	0.5 g/ml
Punto de fusión	200 °C
Presión de vapor	$1.31 * 10^{-5} Pa$ (25 °C,)
Constante de Henry	$2.1 * 10^{-7} Pa m^3 mol^{-1}$
pH en solución al 1%	2.5
Solubilidad en agua	12 000 mg L ⁻¹ a 25°C
Estabilidad	32 días 25°C y pH = 5,7 ó 9
Kow	- 3,2 pH 5-9
Kd	24000
pKa	2,34 5,73 10,2

Propiedades fisicoquímicas del glifosato (Bravo, 2004)

En Colombia, según los registros del Instituto Colombiano Agropecuario (ICA;2010), los nombres comerciales de los productos que contienen como ingrediente activo el glifosato son: Roundup SL, Rocky SL, Tunda SL, Faena 320 SL, Patrol SL, Fuente SL, Roundup 747 SG, Glifonox, Ramger SL, Glyphogan 480 SL, Panzer 320 SL, Coloso SL, Candela 120 SL, Glyfosan SL, Batalla SG 75, Glifosato Agrogen, Rocket SG, Squadron, Socar SL, Sumup 480 SL, Clabesato 48SL, Estelar 480 SL, Crossout 320, Batalla SL 480, Gly-41, Glifogroz 480 SL, Glyfosan 77 WG, Helosate 480 SL, Piton 480 SL, Rumba 480 SL, Sumglifo 480 SL, Stopwest 48 S.L., Kalach 480 SL, Herbiglifo 48SL, Pilarsato SL, Agrosato S.L, Glifofed 48 S.L, Klifos 48SL, Rambo 48 SL.

El glifosato ejerce su acción por inhibición de la actividad de la enzima 5-enolpiruvilshikimo-3-fosfo sintasa (EPSP), por lo que no permite la síntesis de los aminoácidos aromáticos fenilalanina, tirosina y triptófano, esenciales para la formación de otros productos como ligninas, alcaloides y ácidos benzoicos que son necesarios para el crecimiento y desarrollo de las plantas (Grossbard & Atkinson, 1984; Franz et al., 1997).

El glifosato es un herbicida sistémico que es rápidamente translocado del follaje a las raíces, rizomas y tejido apical de las plantas tratadas. Es ampliamente usado en el mundo; en Estados Unidos se ubicó en el puesto número 11 como el plaguicida más utilizado (Bailey et al., 2000). En Colombia el glifosato es utilizado en el manejo de malezas en sistemas agrícolas, como los cultivos de algodón, arroz, banano, café, palma africana y cacao entre otros. También se utiliza para la maduración de cosechas, como en la caña de azúcar por medio de la inhibición de la elongación de los tallos favoreciendo la acumulación del azúcar. Conseguir información con respecto a los procesos industriales para la realización del glifosato es un proceso dispendioso debido a que este defendido por una serie de patentes que hace que, la información no paga sea no asequible. Sin embargo, existen trabajos que pueden ser útiles para entender el proceso industrial de la realización de este compuesto, por ejemplo, los trabajos de Zhou y colaboradores (2012), quienes realizaron delineamiento experimental para encontrar las condiciones de optimización de un proceso industrial del glifosato.

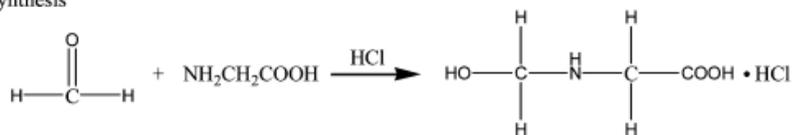
El nombre químico del glifosato es amino fosfonometilacético. Como una especie de herbicida fosfina orgánica, el glifosato, desarrollado y comercializado en el 1970 por Monsanto Company, tiene una alta eficiencia, baja toxicidad, baja en residuos, y amplio espectro según (Murtaza & William, 2001). En recientes años, la demanda del mercado para el glifosato ha crecido dramáticamente por la creciente utilización de plantaciones transgénicas desde la perspectiva de monocultivo y en ese sentido se han generado gran cantidad de métodos de síntesis de compuesto (Lu, et al., 2009) entre los que destaca los métodos con la utilización de clorometilo fosfórico, iminodiacético (IDA), iminodiacetonitrilo, bromoacetato de etilo, cloruro de bencilo, ácido cloroacético, oxidazing N-(fosfonometil) iminodiacético (PMIDA) Todos estos métodos tienen sus desventajas, por ejemplo, la obtención de iminodiacético o iminodiacetonitrilo son baratos pero dispendiosos. El bromoacetato de etilo o cloruro de bencilo tiene un proceso alto costo de las materias primas al igual que el proceso con ácido tricloroacético; La oxidación de PMIDA implica la utilización de carbón activo, en el que el glifosato y el carbón activo se mezclan entre sí, y generan un compuesto que debe ser lavado posteriormente, generando así una gran cantidad de líquido de desecho (Liu, 2005); el proceso de oxidación de los ácidos sulfúrico con peróxido concentrado tiene ventajas pues no produce productos carbonizados pero el rendimiento de glifosato no es muy alto. Todos estos procesos a nivel residual tienen una gran cantidad de actividades industriales y la posterior generación de aguas y gases residuales y algunos de ellos implican la

utilización de paladio, rodio y osmio como catalizadores que permiten sustituir el N de la estructura de la glicina por oxígeno (Hitzler et al., 2004) aumentando los costos.

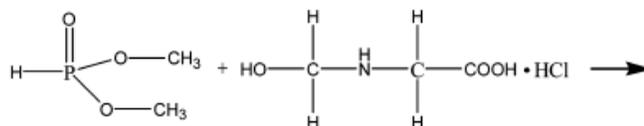
El proceso de glicina-dimetil fosfito de síntesis glifosato se utiliza principalmente en China, es el más utilizado para la síntesis de glifosato actualmente en el mundo (Gao et al., 2011) y se caracteriza por ser una técnica estable y de alto rendimiento, sin embargo hay desventajas en el proceso, tales como la generación de una gran cantidad de contaminación ambiental por la utilización de trietilamina y la generación de residuos líquidos, el tratamiento de este tipo de residuos implica un alto costo económico para su tratamiento, o en su defecto un alto costo ambiental. La trietilamina es un compuesto altamente tóxico y altamente reactivo por lo cual es perjudicial para la salud humana, es uno de los 189 contaminantes peligrosos del aire incluido en La Nueva Ley de Aire por el Congreso de Estados Unidos (2008) que hace referencia a la categorización de sustancias peligrosas que pueden afectar la calidad del aire, protegido por la constitución norteamericana. Por lo tanto, es necesario invertir en equipos de recuperación para la trietilamina que se caracterizan por un gran consumo de hidróxido de Sodio. Además, a pesar de esta neutralización la cantidad de cloruro de sodio puede ser alta y así de cualquier manera se tendrá una emisión de agua con alta fuerza iónica también prohibida en la mayoría de los países por lo que hace un par de años se viene practicando la realización de glifosato sin Trietilamina (Ilustración 1 y 2).

Ilustración 2

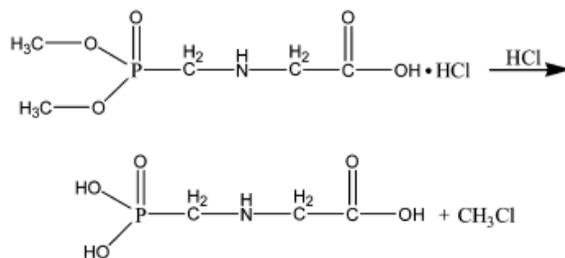
Synthesis



Condensation

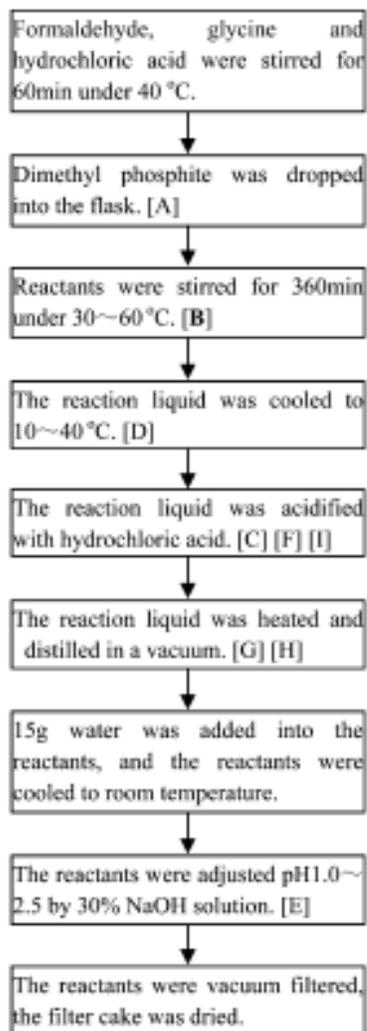


Hydrolysis



Reacciones para la síntesis de glifosato. (Gao Et Al. 2011)

Ilustración 3.



Sistema de producción de glifosato. (Gao et al., 2011)

Antecedentes

El herbicida glifosato, que contiene glifosato como ingrediente activo, fue introducido por primera vez en 1974 para el control no selectivo de malezas. Los productos con base en glifosato se han usado de forma creciente por agricultores en la preparación del campo antes de la siembra y en programas de conservación de suelo sin labranza. El uso del glifosato en la agricultura continúa expandiéndose particularmente en las aplicaciones que involucran variedades vegetales que son modificadas genéticamente para tolerar el tratamiento al glifosato (Roundup-Ready®) (Williams et al., 2000).

El principal producto comercial es el Roundup®, formulado como sal isopropilamina (IPA) y un surfactante, la amina de polioxietileno (POEA), para realzar la eficacia del herbicida. La otra formulación, Rodeo®, contiene la sal IPA de glifosato sin el surfactante, y es principalmente usado para controlar malezas acuáticas en algunos países (Tsui & Chu, 2003). Mundialmente, el glifosato es vendido en más de 17 diferentes formulaciones que van para uso agrícola hasta productos listos para usar en el hogar y jardín. Además del glifosato, la mayoría de estas formulaciones también contienen coadyuvantes para incrementar la eficacia del producto. La mayoría de las formulaciones contienen surfactantes para incrementar la penetración del ingrediente activo hacia los tejidos vegetales. Se ha puntualizado que la relativa baja toxicidad del glifosato contribuye poco a la toxicidad total del producto formulado. Según Solomon & Thompson (2003) el producto formulado es más tóxico que el ingrediente activo, particularmente para organismos acuáticos que son más sensibles a sustancias activas superficiales (BHAG, 2020; Maggi, 2020).

Las personas, las plantas y los animales pueden ser expuestos al glifosato y al Roundup de muchas maneras. Agricultores, habitantes, operadores, y los hábitats naturales pueden estar expuestos durante su aplicación por desvíos desde el área donde está siendo rociado. La aplicación aérea es utilizada en algunos cultivos, tales como las vastas plantaciones de monocultivos de soja transgénica RR en América, lo que aumenta considerablemente las posibilidades de exposición accidental de poblaciones o hábitats cercanos (Paganelli et al. 2010; Lutri et al., 2020).

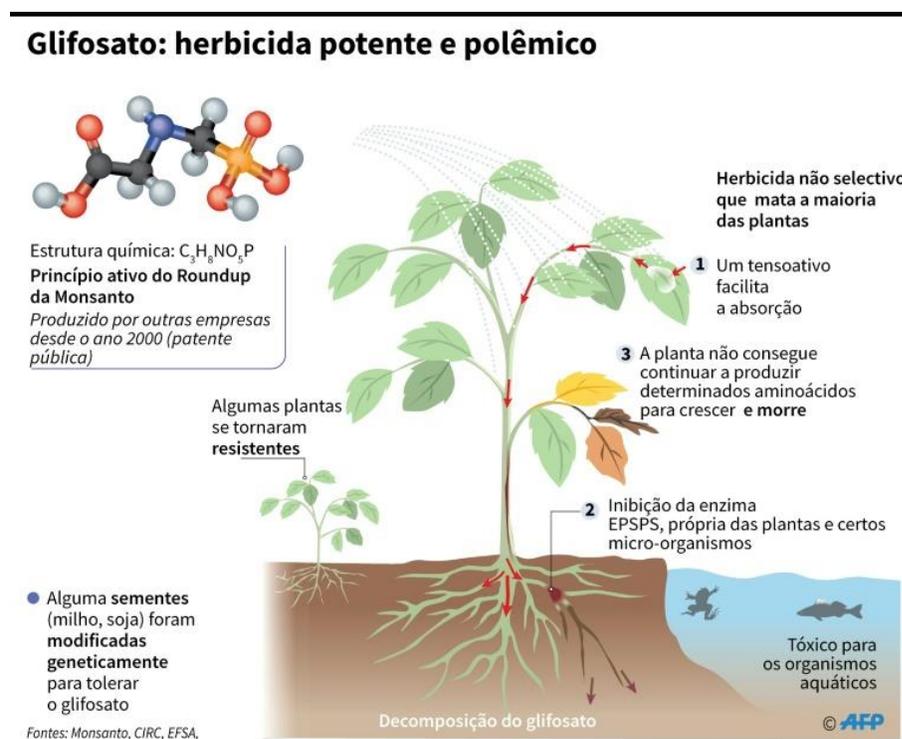
La exposición al Roundup también ocurre a través de sus residuos, frecuentemente encontrados en los alimentos y el medio ambiente. Los Límites Máximos Residuales (LMR) en alimentos para el glifosato y su producto de descomposición fueron acordados por la Comisión del Codex Alimentarius de las Naciones Unidas en 2006, pero parecen estar más relacionados con el tipo de prácticas agrícolas propias de cada cultivo alimentario que con los umbrales de seguridad para la salud humana (Tang et al., 2020). A la luz de la nueva evidencia científica sobre los impactos sanitarios y ambientales del glifosato, es esencial reevaluar los LMR con el fin de ajustarlos a evaluaciones de seguridad actualizadas (Paganelli et al. 2010; Woźniak et al., 2020).

En el medio ambiente, el glifosato puede ser retenido en el suelo uniéndose a partículas, pero dependiendo de la química de la tierra, también puede filtrarse hasta las aguas subterráneas. El glifosato también puede ser lavado directamente hacia desagües y aguas superficiales, y se ha detectado en ambos. El glifosato y sus productos de descomposición han sido detectados en estudios de aguas superficiales de escorrentía en Canadá, los Estados Unidos y Dinamarca. Estos hallazgos tienen implicaciones para la

calidad de las aguas superficiales y la calidad del agua potable. Ante la evidencia de que el glifosato puede causar daño a la salud humana y el medio ambiente, la lixiviación del glifosato también tiene graves repercusiones para la vida acuática (Gimsing et al. 2004; Qui et al., 2020; Xia et al, 2020) (Ilustración 1).

El glifosato está presente en los suelos, las aguas y nuestros alimentos como resultado de su uso como herbicida. Por lo tanto, resulta de gran importancia realizar una evaluación rigurosa sobre la seguridad del glifosato para las plantas, los seres humanos y animales (Simonsen et al., 2008; Artigas et al., 2020).

Ilustración 4.



Esquema de absorción del herbicida no selectivo. (Monsanto, CIRC, EFSA, 2021)

Efectos Ambientales Del Glifosato

Fue realizada una revisión de literatura, que utilizó como estrategia de búsqueda la información disponible por el internet con las palabras clave “Glifosato”, síntesis efectos nocivos, ventajas, ambiente y salud humana. La búsqueda resultó en una muestra inicial de 541 artículos científicos. En un primer filtro, restaron apenas 140 artículos, siendo 401 artículos excluidos, pues huían del tema, después de la lectura del título. En un nuevo filtro, 95 artículos fueron excluidos pues no se adecuaban a los criterios de inclusión, restando 60 artículos seleccionados que estuvieran escritos preferiblemente en idioma inglés durante el periodo de 1999 hasta 2021. Fueron excluidos artículos relacionados a otros temas, relatos de caso y editoriales.

De los 60 estudios que se analizaron, el 47% no reportó algún impacto en la salud ni en el medio ambiente derivado del uso de glifosato, el 46% sí señaló efectos y un 3% no entregó conclusiones relevantes. Con respecto al año de publicación del estudio, entre los estudios analizados se observó un aumento considerable entre los estudios que datan del año 2015 y aquellos del 2019, lo cual podría reflejar un mayor interés en la actualidad por investigar temas asociados a los efectos del uso del glifosato en actividades antropogénicas.

Debido a su naturaleza aniónica, el glifosato por sí mismo no penetra la cutícula vegetal, por lo tanto, la fitotoxicidad del herbicida es facilitada por la adición de un surfactante (Mann et al., 2009). A nivel mundial, el surfactante predominante usado en los productos Roundup® es un amino polietoxilado (POEA), que es una mezcla de alquilaminas polietoxiladas de cadena larga sintetizadas a partir de ácidos grasos de origen

animal (Williams et al., 2000). Un reporte no publicado de Monsanto muestra que el POEA es fuertemente adsorbido al suelo, planteando si el POEA no se degrada cuando se adsorbe a los suelos y sedimentos, acumulándose a altas concentraciones y volviéndose peligroso para organismos bénticos durante el periodo de aplicaciones continuas de herbicidas (Tsui & Chu, 2004; Horn et al., 2020).

Generalmente se carece de datos sobre el destino ambiental de otros surfactantes, con la excepción de alquilfenoletoxilados, que pueden degradarse a nonilfenol. Debido a su amplio uso en la industria y productos del hogar, se han detectado pequeñas concentraciones de estos compuestos y sus productos de degradación en el ambiente.

Los factores de bioconcentración (BCFs), para determinar la toxicidad y bioacumulación de alquilfenoletoxilados C8 y C9, medidos en el laboratorio van desde <1 a 1250 para especies de peces y de 1 a 3400 para invertebrados (Xia et al., 2020).

El glifosato tiene una relativa baja toxicidad aguda oral y dérmica. No tóxico por inhalación, ya que no es volátil (U.S. EPA, 1993). No existen efectos de toxicidad crónica o carcinogenicidad en ratas, ratones y perros Beagle. En junio de 1991, la EPA clasificó al glifosato como grupo E oncogeno, o sea de no carcinogenicidad para humanos—(U.S. EPA, 1993).

Las revisiones de las agencias reguladoras gubernamentales en varios países, las organizaciones internacionales (como Health Canada, U.S. EPA y WHO) y otras instituciones científicas, aplicando procedimientos en toxicología aceptados internacionalmente, han descubierto que no existen bases que sugieran preocupación por la seguridad del glifosato y Roundup® por la salud humana. Los datos sobre Roundup®

y glifosato son constantemente reevaluados por agencias reguladoras en un proceso basado en la ciencia que incluyen por muchas razones su volumen de producción y nuevos usos. No obstante, surgen periódicamente cuestionamientos acerca de su seguridad (Williams et al., 2000). Sin embargo, existen datos faltantes respecto a embriones y larvas de anfibios residentes y toxicidad con y sin surfactante (Tsui & Chu, 2004). Además, la mayoría de las pruebas de toxicidad se hacen para organismos principalmente de columna de agua, donde la ruta de exposición al organismo es principalmente a través de la fase disuelta del glifosato y surfactante.

Se carece de datos de toxicidad asociados con sedimentos para formulaciones basadas en glifosato. De hecho, la Organización Mundial de la Salud (WHO) y Environmental Canada recomendaron una prueba de toxicidad en sedimentos, debido a su acumulación y relativas largas vidas medias en sedimentos (Tsui & Chu, 2004). La absorción oral del glifosato es baja, y ambos materiales son eliminados esencialmente sin metabolizar. Los estudios de penetración dérmica con Roundup® muestran muy baja absorción. La evidencia experimental ha mostrado que ni el glifosato ni el AMPA se bioacumulan en tejido animal. No se presenta toxicidad significativa en estudios agudos, subcrónicos ni crónicos. La exposición ocular directa a la formulación concentrada Roundup® puede resultar en una transitoria irritación, mientras que la aspersion de diluciones normales causa, solo efectos mínimos. No hay evidencia convincente del daño directo en el DNA, in vitro ó in vivo, y se concluyó que el Roundup® y sus componentes no plantean un riesgo para la producción de mutaciones heredables/somáticas en humanos. Múltiples estudios de ingestión durante todo el ciclo vital han fallado en la

demostración de cualquier potencial tumorigénico por glifosato. Por consiguiente, se concluyó que el glifosato no es carcinógeno (Okada et al., 2020; Artigas et al., 2020).

El glifosato, AMPA, y POEA no son teratogénicos o tóxicos en el desarrollo. No hubo efectos en la fertilidad o parámetros reproductivos en dos estudios de reproducción multigeneracional. Igualmente, no hay efectos adversos en tejidos reproductivos a partir de animales tratados con glifosato, AMPA, o POEA en estudios crónicos y subcrónicos. Los resultados a partir de estudios estándar con estos materiales también fallaron en mostrar algún efecto indicativo de modulación endocrina. Por lo tanto, se concluyó que el uso del herbicida Roundup® no resulta en efectos adversos en el desarrollo, reproducción o sistemas endocrinos en humanos y otros mamíferos (ANLA, 2000).

Generalmente, el orden de toxicidad de los componentes es: POEA > Roundup® > ácido glifosato > sal IPA de glifosato, mientras que la toxicidad del ácido glifosato fue principalmente debido a su acidez. Las bacterias microtox® (*Vibrio fischeri*) y protozoarios (*Tetrahymena pyriformis* y *Euplotes vannus*) tienen sensibilidades similares hacia la toxicidad por Roundup. En contraste las microalgas (*Selenastrum capricornutum* y *Skeletonema costatum*) y crustáceos (*Ceriodaphnia dubia* y *Acartia tonsa*) fueron 4-5 veces más sensibles a la toxicidad por Roundup® que las bacterias y protozoarios (Mottier et al., 2020).

Excepto por las microalgas fotosintéticas, al POEA se le debe el 86% de la toxicidad por Roundup® y la contribución del POEA a la toxicidad mostró ser dependiente de la especie. El aumento en el pH (6-9) y en la concentración de sedimentos suspendidos (0-200 mg L⁻¹) incrementó significativamente la toxicidad del Roundup®

para *C. Dubia*, pero no hubo efectos significantes debido al cambio de temperatura y adición de alimentos (Tsui & Chu, 2003).

Se ha mostrado que la toxicidad basada en LC50 48h en pruebas de agua tuvo el siguiente orden: Roundup® (1.5-5.7 mg L⁻¹) > Roundup Biactive® (82 - 20 mg L⁻¹) > Roundup® (225-415 mg L⁻¹), y *Hyalella azteca* fue generalmente más sensible que *C. dubia* a estos herbicidas. Las diferencias de toxicidad entre las formulaciones fueron debidas a los diferentes surfactantes presentes en estos herbicidas. La presencia de carbono orgánico afecta de distinto modo a la toxicidad del glifosato según su presentación comercial; así, un incremento en el carbono orgánico disminuye la toxicidad del Roundup® en sedimentos, pero no del RoundupBiactive® (Tsui & Chu, 2004). La adsorción del glifosato a las arcillas es insignificante a bajas concentraciones del herbicida en el agua (Petit et al., 1995).

El expresar la toxicidad de las formulaciones glifosato/POEA en términos de concentración de glifosato, puede ser engañoso, debido a que la toxicidad es al parecer una consecuencia de la exposición a los surfactantes de la formulación, ya que varios estudios han mostrado que las formulaciones comerciales de glifosato pueden ser más tóxicas que el glifosato puro debido a la toxicidad o acción de los surfactantes usados (Battaglin et al., 2009).

Esta situación surge porque los surfactantes, en general, incluyendo el POEA, son típicamente una mezcla de oligómeros estrechamente relacionados y es difícil medir surfactantes como componentes discretos. Sin embargo, si varía las cantidades del surfactante usado en las formulaciones, entonces los datos de toxicidad también variarían

debido a la dependencia en la relación de glifosato a surfactante. Además, el análisis de muestras de agua para glifosato como una medición próxima de las concentraciones de surfactantes asociados probablemente subestime el riesgo debido a que la persistencia ambiental de los surfactantes puede ser mayor que el ingrediente activo. El glifosato tiene una vida media acuática en el rango de 2 a 14 días, mientras que el surfactante asociado POEA en el ambiente se ha estimado conservadoramente en 21-41 días (Mann et al., 2009).

En Colombia, (Bolognesi et al., 2009) presentaron resultados de la evaluación del daño genotóxico asociado con la aspersion de glifosato para control de cultivos ilícitos, comparando lugares como Santa Marta, Boyacá, Putumayo, Nariño y Valle del Cauca, evidenciado que bajo el riesgo genotóxico potencialmente asociado con la exposición al glifosato en áreas donde es aplicado el herbicida para la erradicación de coca y amapola.

El glifosato es ligeramente tóxico para aves y prácticamente no tóxico para peces, invertebrados acuáticos y abejas. Debido a la presencia de ingredientes inertes tóxicos, algunos productos de glifosato de uso final deben etiquetarse “tóxico para peces”, si pueden aplicarse directamente en ambientes acuáticos. El etiquetado de productos no imposibilita el movimiento del glifosato lejos del blanco por deriva (U.S. EPA, 1993).

En el ambiente, el glifosato se degrada principalmente por la actividad de microorganismos a ácido aminometil fosfónico (AMPA) (Williams et al., 2000), aunque también se presenta degradación abiótica (Zaranyika & Nyandoro, 1993; Sabio & Garcia, 2020).

Los niveles traza de glifosato y AMPA pueden persistir en el suelo año por año (Scribner et al., 2007). El glifosato es inmovilizado al contacto con los suelos y minerales arcillosos debido a la formación de complejos superficiales con iones metálicos. El tiempo de residencia en el suelo está en función de la retención y es afectada por la composición mineralógica de los suelos. Adicionalmente, como el glifosato es capaz de formar complejos estables con cationes favoreciendo su adsorción en los suelos ó superficies minerales, y en especial cuando estos contienen óxidos de hierro y aluminio. El contenido de arcilla, tipo de arcilla, capacidad de intercambio catiónico (CEC) pueden ser los factores más importantes del suelo para la adsorción de glifosato (R. C. Pessagno et al., 2008). Se ha comprobado la inactivación del glifosato por el ligamiento al suelo por el grupo fosfonato (Subramaniam & Hoggard, 1988; Gupta et al., 2020).

El glifosato forma complejos superficiales con goetita, caolinita, ilita y montmorillonita, siendo el grado de complejidad dependiente de la concentración del ligando y el pH. El grado de adsorción del glifosato a óxidos de hierro fue mayor que a las arcillas. El grupo fosfoenato del glifosato se coordina al centro superficial externo de los sólidos con estructuras similares a los óxidos de hierro (Pessagno et al., 2008). El glifosato es un agente tan fuertemente complejante que podría pasar por el suelo sin completarse con iones metálicos, lo cual explicaría la inactivación como herbicida, una vez el glifosato pasa al suelo (Subramaniam & Hoggard, 1988; Rogacz et al, 2020).

La adsorción del glifosato a las superficies cargadas se incrementa cuando el pH del sistema arcilla-glifosato disminuye. Se ha mostrado que el glifosato también es fuertemente adsorbido a Al^{3+} y Fe^{3+} , y no es fácilmente adsorbido al Na^+ indicando que el

proceso de sorción es dependiente de la carga. La consecuencia de esta adsorción es que el glifosato es inactivado en suelos que contienen arcilla (Petit et al., 1995).

El glifosato se liga fuertemente a la materia orgánica y se considera inmóvil en suelos y sedimentos, lo cual favorece la remoción del glifosato disuelto en el agua, reduciendo efectivamente su exposición a organismos acuáticos. El glifosato es susceptible a la degradación microbiana y no es persistente en el ambiente, aunque en cierto grado puede protegerse de la degradación por su fuerte ligamiento a suelos y sedimentos. Los productos de la degradación del glifosato no son más persistentes que el compuesto parental y tampoco se bioacumulan. Desde un punto de vista de evaluación del riesgo, es más probable que se presenten exposiciones agudas y son las mediciones más apropiadas para propósitos de evaluación del riesgo (Solomon & Thompson, 2003; Gupta & Gupta, 2020).

En el agua, las principales vías de disipación son la degradación microbiana y el ligamiento a sedimentos (Solomon & Thompson, 2003). Es bastante difícil analizar el glifosato en las muestras de agua dada sus propiedades fisicoquímicas (Skark et al., 1998; Böcker et al., 2020).

Una vez el glifosato entra en la columna de agua es rápidamente adsorbido a las partículas del suelo. La degradación microbiana empieza inmediatamente y el glifosato es degradado a su metabolito AMPA y CO₂, y por ello no se espera su bio-concentración. La biodisponibilidad es influida por la sorción a coloides, carbono orgánico disuelto

(DOC) y partículas mayores (Siemering et al., 2008). Se ha comprobado que el glifosato es detectado más frecuentemente en aguas superficiales que en aguas subterráneas, y también ha sido detectado en aguas lluvias (Scribner et al., 2007).

En pozos vanales se ha detectado glifosato (328 $\mu\text{g L}^{-1}$) y AMPA ($>3 \mu\text{g L}^{-1}$) (Battaglin et al., 2009). Se ha detectado glifosato en aguas superficiales procedente de una planta de tratamiento de aguas residuales y de drenaje urbano (máxima concentración de 75-90 $\mu\text{g L}^{-1}$), y altas concentraciones de glifosato en el agua superficiales durante épocas de lluvias (Botta et al., 2009). Se ha comprobado el aporte urbano al contenido de glifosato y AMPA en las corrientes superficiales (Kolpin et al., 2006; Kranti & Stone, 2020).

Estudios científicos independientes señalan la necesidad de una reevaluación urgente del glifosato y sus productos relacionados. Estos estudios asocian la exposición al glifosato con una serie de efectos negativos en la salud humana y animal, incluyendo efectos a largo plazo o crónicos (Rosset & Gulden, 2020; Fan et al., 2020). Los defectos de nacimiento en la provincia argentina del Chaco, donde los cultivos transgénicos de soja y arroz son rociados intensamente con glifosato, se han incrementado, casi cuadruplicado, en el período de 2000 a 2008. Se encontraron defectos similares en mujeres de Paraguay expuestas a herbicidas a base de glifosato durante el embarazo. Estos defectos eran compatibles con aquellos inducidos en experimentos de laboratorio a concentraciones mucho más bajas que las del glifosato comercial (Ahsan et al. 2008)

Se sospecha que el glifosato es un disyuntor endócrino. Esto significa que podría interferir con la producción de hormonas reproductivas vitales, tales como la

progesterona y el estrógeno. Estudios publicados demuestran varios efectos endócrinos en animales y en células humanas asociados con el glifosato.

Los estudios de patrones de enfermedad en poblaciones humanas (estudios epidemiológicos) han vinculado la exposición al glifosato con el linfoma no-Hodgkin (un tipo de cáncer de la sangre); mientras que los estudios de laboratorio han confirmado que el glifosato y/o sus productos asociados presentan características típicas de los agentes causantes de cáncer (por ejemplo, genotoxicidad o mutagenicidad) en animales y en humanos. En conjunto, estos estudios sugieren que el glifosato puede contribuir al cáncer. Existe evidencia de que el glifosato también puede afectar el sistema nervioso e incluso podría estar implicado en el mal de Parkinson (Greenpeace International, 2011)

La evidencia científica que resalta estos efectos sobre la salud debe ser tomada muy seriamente. Debe llevarse a cabo una reevaluación urgente de los impactos en la salud del glifosato y sus productos relacionados (Greenpeace International, 2011).

El glifosato puede impactar sobre la biodiversidad de maneras diferentes y puede tener efectos negativos a corto y largo plazo, así como también efectos directos e indirectos. Hay evidencia acumulada de que el glifosato puede tener un impacto perjudicial sobre organismos acuáticos como resultado de su utilización en la agricultura o la silvicultura. Varios estudios han sugerido que, en condiciones de “campo cercano”, los productos a base de glifosato, incluyendo el Roundup, tienen un efecto tóxico directo sobre los adultos y los renacuajos de una variedad de especies anfibias (Greenpeace International, 2011). Pese a estos hallazgos, Monsanto aún sostiene que el Roundup “no tiene efectos adversos sobre los animales acuáticos” (Monsanto 2010).

Muchos animales acuáticos – desde algas microscópicas hasta peces y moluscos – han sido afectados por la exposición al glifosato y/o al Roundup (Ilustración 4).

Ilustración 5.



Presentación clásica comercial. (BBC News, 2020)

Los efectos observados incluyeron: reducción de la expectativa de vida y tasas de reproducción reducidas en los rotíferos (un tipo de invertebrado de agua dulce); cambios en la estructura de la población de fitoplancton o plancton vegetal; aumento en la mortalidad de gusanos acuáticos; y cambios en las células hepáticas de las carpas. Un estudio reciente encontró efectos genotóxicos en los glóbulos rojos de la sangre de las anguilas europeas cuando fueron expuestas al Roundup por un corto período. También existe la sospecha de que el glifosato puede afectar el sistema nervioso de los animales acuáticos de un modo similar a un plaguicida organofosforado.

El glifosato también puede tener un impacto directo en las plantas no-objetivo en los entornos donde es utilizado, a través del desvío de la pulverización o la sobre pulverización deliberada. Esto podría conducir a la pérdida de especies raras o en peligro

de extinción, o a una reducción general en la diversidad y la cantidad de especies.

Investigaciones llevadas a cabo en el Reino Unido sobre el uso del glifosato en remolacha transgénica RR mostró efectos indirectos significativos de este tipo de control de malezas. Estos incluyeron la reducción en el número de malezas en los campos de cultivo y la reducción en la producción de semillas de malezas, siendo ambos potencialmente perjudiciales, si es repetido durante varios años, para las especies superiores en la cadena alimenticia, incluyendo especies de aves amenazadas (Roy et al., 2003).

Es evidente que el glifosato y sus productos formulados comerciales (por ejemplo, el Roundup) pueden ser nocivos para las especies en muchas etapas a lo largo de la cadena alimentaria, incluyendo la cadena alimentaria acuática. Los reguladores deben asegurar que el uso de los herbicidas sea seguro para la vida silvestre cuando es utilizado para los fines que ha sido aprobado. Por lo tanto, la seguridad del glifosato para la biodiversidad necesita ser reevaluada con urgencia.

Problemática ambiental del glifosato en Colombia

Para la salud humana, Investigaciones realizadas por la Agencia Internacional de Investigación sobre el Cáncer manifestaron que algunas comunidades cercanas a los cultivos erradicados con glifosato en Colombia han presentado serios problemas de salud asociadas con irritaciones oculares graves, enfermedades estomacales cancerígenas o leucemia (Jurado, 2020).

En Colombia, entre el 10 al 14 % del glifosato se utiliza para la erradicación de cultivos de coca y amapola, según Solomon, Anadón, Cerdeira, Marshall y Sanín (2015)el restante se utiliza para control de malezas en el contexto de la agricultura. Un

factor que ha adquirido relevancia desde la utilización de glifosato en Colombia desde 1984.

Ilustración 6.



Principales zonas del país fumigadas con glifosato. (Osorio,2003)

Al respecto se ha encontrado que:

1. Aplicación terrestre: entre el 14 % y el 78 % del glifosato aplicado sale del sitio como consecuencia de esta técnica y mueren 40 especies sensibles a este componente.

2. Se evidenció que varias especies susceptibles pueden morir entre 100 a 400 metros del área de dispersión.
3. Entre el 41 % y el 82 % del glifosato aplicado con helicóptero se desplaza fuera del sitio; con este método se ha encontrado glifosato en algunas plantas, a 800 metros del área de dispersión.
4. Con aplicaciones realizadas por avión se ha encontrado que el glifosato puede salir del sitio de dispersión entre 800 a 1.200 metros
5. El glifosato que llega a los suelos es fácilmente adsorbido, aún en aquéllos con bajos contenidos de arcillas.
6. En el departamento de Nariño, estudios realizados por la frontera colombo-ecuatoriana determinaron que a un diámetro de cinco kilómetros del área de dispersión donde se fumigó cultivos con glifosato y otros herbicidas, las personas presentaron síntomas sobre su salud, como: intoxicación, problemas intestinales, afecciones neurológicas y problemas de piel.

En este contexto y frente a la evidencia científica presentada, en Colombia en el año 2015, se prohibió el uso del glifosato en la erradicación de cultivos de uso ilícito, producto de la publicación realizada por la Organización Mundial de la Salud (IARC, 2016) dado que el mecanismo empleado, la aspersión aérea, es considerado una práctica inadecuada en términos ambientales y sociales, ya que puede generar impactos relevantes sobre especies vegetales y animales que no son objetivo de erradicación, así como en el suelo y fuentes hídricas . Tal es el caso de los campesinos del Putumayo,

quienes sufrieron los efectos colaterales de la aspersión de glifosato, según lo reportado por Lyon en el año (2017).

Frente a esto, la Corte Constitucional en el 2017 solicitó pruebas científicas al consejo nacional de estupefacientes, como resultado se hizo énfasis en que el glifosato asegura la utilización de 1/3 parte de plaguicidas en comparación con procedimientos que no lo requieren. El gobierno actual implementara la fumigación aduciendo que no existe evidencia El consenso en el mundo entre las agencias de protección del medioambiente y las instituciones científicas es que el glifosato no es cancerígeno ni genotóxico. La European Commission, la Canadian Pest Management Regulatory Agency, la Australian Pesticides and Veterinary Medicines Authority y la German Federal Institute for Risk Assessment han concluido que el glifosato no es dañino para la salud humana. La EPA (Agencia de Protección del Medio Ambiente, por sus siglas en inglés) también califica como improbable que sea carcinogénico. Lo mismo concluyo el European Food Safety Authority en 2015. Por su parte, la Organización Mundial de la Salud ha dicho que hay una posibilidad de que pueda generar dichos riesgos.

En función de la evaluación holística realizada mediante DOFA (ANEXO 1) y como resultado de este trabajo encontramos que los artículos revisados contienen estudios que mencionen la toxicidad y los efectos negativos de los herbicidas a base de glifosato, sin embargo, estos no son suficientes y tampoco concluyentes, principalmente debido a que no se han establecido métodos y técnicas estandarizadas que permitan determinar su presencia en matrices ambientales como agua y suelo. Tal es el caso de las metodologías empleadas entre el Centro Internacional de Investigaciones sobre el Cáncer

(IARC), la Autoridad Europea para la Seguridad de los Alimentos (EFSA) y la Autoridad de Protección Ambiental de Nueva Zelanda (NZEPA), las cuales difieren considerablemente en las técnicas de análisis, y que, traen como resultado conclusiones opuestas (Tarazona et al., 2017; Douwes et al., 2018). Es importante tener en cuenta que los herbicidas a base de glifosato contienen además coadyuvantes y surfactantes, que potencian su acción, y son los que generan mayores impactos negativos.

Por otra parte, algunos autores reportan inconsistencias relacionadas con la integridad científica y la veracidad de la información que se ha publicado en algunas revistas en lo concerniente a los efectos del glifosato. Beatriz Sosa y colaboradores (2019), han afirmado que Monsanto ha sido autor de diversas publicaciones que han desviado sus resultados con el objeto de ocultar sus efectos y toxicidad (Infante et al., 2018; Douwes et al., 2018). Esta práctica pone en riesgo la salud humana y los ecosistemas, dado que podría comprometer la disponibilidad y calidad ambiental de los recursos naturales.

Con respecto a las alternativas o sustitutos identificados (Zhan et al., 2018) y otros autores proponen degradar el contaminante a través de microorganismos y métodos experimentales que permiten la disminución de las concentraciones en las matrices ambientales como suelo y agua. En el contexto nacional el Gobierno propuso la creación del Plan Nacional Integral de Sustitución de Cultivos de Uso Ilícito (PNIS) en el año 2015, el cual, entre sus muchas propuestas, busca “impulsar la construcción de proyectos productivos sostenibles como alternativa a los cultivos de uso ilícito en el país” y que quedo vigente en el marco del Acuerdo Final para la Terminación del Conflicto y la

Construcción de una Paz Estable y Duradera firmado en el año 2016. De igual manera, Colombia adoptó los Objetivos de Desarrollo Sostenible en 2015, con el fin de garantizar la reducción de la pobreza, proteger el planeta y asegurar la paz que, en materia ambiental, implica la promoción de la sostenibilidad y la protección de los recursos naturales. Teniendo en cuenta que a 2030, se plantean metas como: Poner fin al hambre, conseguir la seguridad alimentaria y una mejor nutrición, y promover la agricultura sostenible”. La generación de un contexto de cumplimiento requiere evaluar la pertinencia de herbicidas a base de glifosato, dado que no se tiene certeza de su toxicidad, así como evaluar la posibilidad de proponer alternativas que respondan a los compromisos ambientales asumidos por el país y que fortalezcan la riqueza en biodiversidad.

Durante el desarrollo de la investigación, la búsqueda no se centró únicamente en artículos con temáticas relacionadas con los efectos generados a partir del uso del herbicida como estrategia de erradicación en cultivos de uso ilícito, sino que se amplió el umbral dado que para este contenido en específico no se reportan fuentes oficiales tales como revistas indexadas. Lo anterior orientó la estrategia y búsqueda hacia los efectos generales del glifosato en la salud humana y en el medio ambiente, ya que esto permitió ampliar el alcance con respecto a la consulta de bibliografía disponible, es sorprendente la poca información disponible sobre efectos del glifosato en Colombia en artículos científicos.

En definitiva, es fundamental que se viabilicen estudio de los impactos del glifosato de una manera metódica, con libertad de publicar resultados y que se sustenten

en líneas de tiempo prolongado, estudios sobre efectos ecosistémicos del glifosato puede que no sean visibles en poco tiempo.

Conclusiones

De acuerdo con la revisión efectuada, fue posible realizar la identificación y clasificación de los posibles efectos generados a partir del uso y exposición al glifosato, sin embargo, no hay evidencia concluyente sobre los efectos del uso del glifosato como método de erradicación en cultivos ilícitos. Igualmente, se percibe la necesidad de establecer y definir métodos analíticos estándar que permitan determinar concentraciones y dosis del contaminante bajo un mismo criterio técnico y generación de artículos científicos asegurando la estandarización, comparación y contextualización de la investigación sobre territorios tropicales.

Existe diversidad de evidencia con respecto a los efectos del glifosato a nivel general y en el mundo. En Colombia se hace evidente la falta de artículos especializados de índole científicos sobre el tema en Colombia.

Mediante análisis realizado por DOFA fue posible distinguir algunas características del glifosato que son bien reconocidas por la literatura científica en cuanto su mecanismo de acción. Sin embargo, es difícil caracterizar efectos nocivos del glifosato en Colombia debido a la información controversial desde una perspectiva general y por otro lado por la falta de estudios a nivel local.

Es posible realizar análisis evaluativos del comportamiento del glifosato únicamente desde una perspectiva global, pues falta evidencia y artículos científicos

basados en el territorio nacional para que sea posible realizarlo desde experiencias propias.

Recomendaciones

Se requieren estudios a largo plazo en Colombia para que sea factible establecer a ciencia cierta efectos ambientales del uso del glifosato como herbicida en Colombia.

Con estudios relacionados en el contexto colombiano, será posible realizar análisis DOFA con mayor impacto para la toma de decisiones.

Para Realizar un análisis Evaluativo del Comportamiento del glifosato en los agros sistemas colombianos se requieren estudios propios enmarcados en los ecosistemas propios.

Bibliografía

Ahsan, N., Lee, D. G., Lee, K. W., Alam, I., Lee, S. H., Bahk, J. D., & Lee, B. H. (2008). *Glyphosate-induced oxidative stress in rice leaves revealed by proteomic approach. Plant Physiology and Biochemistry*, 46(12), 1062–1070.
<https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2008.07.002>

Alibhai, M. F., & Stallings, W. C. (2001). *Closing down on glyphosate inhibition--with a new structure for drug discovery. Proceedings of the National Academy of Sciences*, 98(6), 2944–2946.
<https://doi.org/10.1073/pnas.061025898>

Artigas, J., Batisson, I., & Carles, L. (2020). *Dissolved organic matter does not promote glyphosate degradation in auto-heterotrophic aquatic*

microbial communities. Environmental Pollution, 259, 113951.

<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.113951>

Bailey, B. A., Collins, R., & Anderson, J. D. (2000). *Factors influencing the herbicidal activity of Nep1, a fungal protein that induces the hypersensitive response in Centaurea maculosa. Weed Science. 48(6), 776–785.*

Battaglin, W. A., Kolpin, D. W., Scribner, E. A., Kuivila, K. M., & Sandstrom, M. W. (2005). *GLYPHOSATE, OTHER HERBICIDES, AND TRANSFORMATION PRODUCTS IN MIDWESTERN STREAMS, 20021. Journal of the American Water Resources Association, 41(2), 323–332.*
<https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2005.tb03738.x>

Battaglin, W. A., Rice, K. C., Focazio, M. J., Salmons, S., & Barry, R. X. (2008). *The occurrence of glyphosate, atrazine, and other pesticides in vernal pools and adjacent streams in Washington, DC, Maryland, Iowa, and*

Wyoming, 2005–2006. *Environmental Monitoring and Assessment*, 155(1–4), 281–307. <https://doi.org/10.1007/s10661-008-0435-y>

B.B.C.N.M. (2020, 25 junio). *Glifosato: 3 preguntas sobre el herbicida por el que Bayer tendrá que pagar casi US\$11.000 millones en demandas*. BBC NEWS MUNDO. <https://www.bbc.com/mundo/noticias-53180741>

Benbrook, C. (2020). Why EPA and IARC Classifications of Glyphosate Oncogenicity Differ. ISEE Conference Abstracts, 2020(1). <https://doi.org/10.1289/isee.2020.virtual.o-sy-1981>

Böcker, T., Britz, W., Möhring, N., & Finger, R. (2019). An economic and environmental assessment of a glyphosate ban for the example of maize production. *European Review of Agricultural Economics*. Published. <https://doi.org/10.1093/erae/jby050>

Bolognesi, C., Carrasquilla, G., Volpi, S., Solomon, K. R., & Marshall, E. J. P. (2009). Biomonitoring of Genotoxic Risk in Agricultural Workers from

Five Colombian Regions: Association to Occupational Exposure to Glyphosate. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A*, 72(15–16), 986–997.
<https://doi.org/10.1080/15287390902929741>

Botta, F., Lavison, G., Couturier, G., Alliot, F., Moreau-Guigon, E., Fauchon, N., Guery, B., Chevreuil, M., & Blanchoud, H. (2009). Transfer of glyphosate and its degradate AMPA to surface waters through urban sewerage systems. *Chemosphere*, 77(1), 133–139.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2009.05.008>

Bradshaw, L. D., Padgett, S. R., Kimball, S. L., & Wells, B. H. (1997). Perspectives on Glyphosate Resistance. *Weed Technology*, 11(1), 189–198.
<https://doi.org/10.1017/s0890037x00041567>

Bravo, E. (2004). Ficha Técnica Glifosato. Red de Acción en Plaguicidas y sus Alternativas de América Latina (RAP-AL), 10

C., & P.I.E. (2019, 31 diciembre). *Plan de Manejo Ambiental del programa de erradicación de cultivos ilícitos mediante aspersión aérea con el herbicida Glifosato - PECIG. Autoridad Nacional de Licencias Ambientales.*
<https://www.anla.gov.co/proyectos-anla/154-proyectos-de-evolucion/175-plan->

de-manejo-ambiental-del-programa-de-erradicacion-de-cultivos-ilicitos-
mediante-aspersion-aerea-con-el-herbicida-glifosato-pecig

Claudio Screpanti, Cesare Accinelli, Alberto Vicari, Pietro Catizone.

Glyphosate and glufosinate ammonium runoff from a corn-growing area in Italy. Agronomy for Sustainable Development, Springer Verlag/EDP Sciences/INRA, 2005, 25 (3), pp.407-412. fhal-00886310.

Douwes J, 't Mannetje A, McLean D, Pearce N, Woodward A, Potter JD. Carcinogenicity of glyphosate: why is New Zealand's EPA lost in the weeds? *N Z Med J.* 2018 Mar 23;131(1472):82-89. PMID: 29565939.

Fan, Y., Wang, Z., Liao, D., Raza, M. A., Wang, B., Zhang, J., Chen, J., Feng, L., Wu, X., Liu, C., Yang, W., & Yang, F. (2020). *Uptake and utilization of nitrogen, phosphorus and potassium as related to yield advantage in maize-soybean intercropping under different row configurations. Scientific Reports, 10(1).* <https://doi.org/10.1038/s41598-020-66459-y>

Geological Survey Scientific Investigations, Scribner, E. A., Battaglin, W. A., Gilliom, R. J., & Meyer, M. T. (2007). *Concentrations of glyphosate, its degradation product, aminomethylphosphonic acid, and glufosinate in*

ground- and surface-water, rainfall, and soil samples collected in the United States, 2001–06 (N.o 5122). U.S. Geological Survey.

<https://pubs.usgs.gov/sir/2007/5122/>

Gimsing, A. L., Borggaard, O. K., & Bang, M. (2003). *Influence of soil composition on adsorption of glyphosate and phosphate by contrasting Danish surface soils. European Journal of Soil Science, 55(1), 183–191.*

<https://doi.org/10.1046/j.1365-2389.2003.00585.x>

GREENPEACE INTERNATIONAL, LABORATORIOS GM FREEZE.
(2011, julio). TOLERANCIA A HERBICIDAS Y CULTIVOS
TRANSGENICOS (N.o 1). GREENPEACE.

<https://fdocuments.in/document/tolerancia-a-herbicidas-y-cultivos-transgenicos.html>

Gupta, S., & Gupta, K. (2020). *Bioaccumulation of Pesticides and Its Impact on Biological Systems. Pesticides in Crop Production*, 55–67.
<https://doi.org/10.1002/9781119432241.ch4>

Hitzler, M., Thalhammer, F., & Hammer, B. (2004). Método para producir n- (fosfometil) glicina (6.730.813). Patente de Estados Unidos.
<https://patft.uspto.gov/netacgi/nph-Parser?Sect1=PTO1&Sect2=HITOFF&p=1&u=/netahtml/PTO/srchnum.html&r=1&f=G&l=50&d=PALL&s1=6730813.PN>.

Horn, S., Pieters, R., & Bøhn, T. (2020). May agricultural water sources containing mixtures of agrochemicals cause hormonal disturbances? *Science of The Total Environment*, 711, 134862.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134862>

IARC (International Agency for Research on Cancer). IARC Monographs –112. GLYPHOSATE [Internet]. 2016 [cited 2019 May 27].

Available from: <https://monographs.iarc.fr/wp-content/uploads/2018/06/mono112-10.pdf>

Instituto Colombiano Agropecuario, ICA. (2010, diciembre).
Comercialización de Plaguicidas 2009 (00.02.60.10). PRODUMEDIOS.
<https://www.ica.gov.co/getattachment/Areas/Agricola/Servicios/Regulacion-y-Control-de-Plaguicidas-Quimicos/Estadisticas/Comercializacion-plaguicidas-2009.pdf.aspx>

Kolpin, D. W., Thurman, E. M., Lee, E. A., Meyer, M. T., Furlong, E. T., & Glassmeyer, S. T. (2006). Urban contributions of glyphosate and its degradate AMPA to streams in the United States. *Science of The Total*

Environment, 354(2–3), 191–197.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2005.01.028>

Kranthi, K. R., & Stone, G. D. (2020). Long-term impacts of Bt cotton in India. *Nature Plants*, 6(3), 188–196. <https://doi.org/10.1038/s41477-020-0615-5>

Lu, Y.; Tao, J.; Zhou, Z. The Research of Glyphosate Synthetic Technology. *Chem. Intermed.* 2009, 5 (8), 47–50

Lutri, V., Matteoda, E., Blarasin, M., Aparicio, V., Giacobone, D., Maldonado, L., Becher Quinodoz, F., Cabrera, A., & Giuliano Albo, J. (2020). Hydrogeological features affecting spatial distribution of glyphosate and AMPA in groundwater and surface water in an agroecosystem. Córdoba, Argentina.

Science of The Total Environment, 711, 134557.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134557>

Maggi, F., La Cecilia, D., Tang, F. H., & McBratney, A. (2020). The global environmental hazard of glyphosate use. Science of The Total Environment, 717, 137167. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137167>

Mann, R. M., Hyne, R. V., Choung, C. B., & Wilson, S. P. (2009). Amphibians and agricultural chemicals: Review of the risks in a complex environment. Environmental Pollution, 157(11), 2903–2927. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2009.05.015>

Molin, W. T. (1998). Glyphosate, a Unique Global Herbicide. J. E. Franz, M. K. Mao, and J. A. Sikorski, ACS Monograph 189, 1997. 653 pp. Weed Technology, 12(3), 564–565. <https://doi.org/10.1017/s0890037x0004433x>

Mottier, A., Serpentine, A., Dallas, L., James, A., Lebel, J. M., & Costil, K. (2020). In vitro effects of glyphosate-based herbicides and related adjuvants

on primary culture of hemocytes from *Haliotis tuberculata*. *Fish & Shellfish Immunology*, 100, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2020.02.058>

Okada, E., Allinson, M., Barral, M. P., Clarke, B., & Allinson, G. (2020a). Glyphosate and aminomethylphosphonic acid (AMPA) are commonly found in urban streams and wetlands of Melbourne, Australia. *Water Research*, 168, 115139. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115139>

Okada, E., Allinson, M., Barral, M. P., Clarke, B., & Allinson, G. (2020b). Glyphosate and aminomethylphosphonic acid (AMPA) are commonly found in urban streams and wetlands of Melbourne, Australia (1.a ed., Vol. 1) [Libro electrónico]. Pergamon.

Osorio G., A. R. (2003). *APROXIMACIONES A LOS EFECTOS AMBIENTALES, SOCIALES Y ECONÓMICOS DE LA ERRADICACIÓN DE CULTIVOS ILÍCITOS POR ASPERSIÓN AÉREA EN COLOMBIA*. *Agroalimentaria*, 17(2).

http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-03542003000200005&lng=es&tlng=es

Paganelli, A., Gnazzo, V., Acosta, H., López, S. L., & Carrasco, A. E. (2010). Glyphosate-Based Herbicides Produce Teratogenic Effects on Vertebrates by Impairing Retinoic Acid Signaling. *Chemical Research in Toxicology*, 23(10), 1586–1595. <https://doi.org/10.1021/tx1001749>

Pessagno, R. C., Torres Sánchez, R. M., & dos Santos Afonso, M. (2008). *Glyphosate behavior at soil and mineral–water interfaces*.

Environmental Pollution, 153(1), 53–59.

<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2007.12.025>

Petit, V. (1995). *Review of strategies for modelling the environmental fate of pesticides discharged into riverine systems*. *Environment International*, 21(2), 167–176. [https://doi.org/10.1016/0160-4120\(95\)00006-2](https://doi.org/10.1016/0160-4120(95)00006-2)

Qiu, S., Fu, H., Zhou, R., Yang, Z., Bai, G., & Shi, B. (2020). Toxic effects of glyphosate on intestinal morphology, antioxidant capacity and barrier function in weaned piglets. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 187, 109846. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109846>

Rogacz, D., Lewkowski, J., Cal, D., & Rychter, P. (2020). Ecotoxicological effects of new C-substituted derivatives of N-phosphonomethylglycine (glyphosate) and their preliminary evaluation towards

herbicide application in agriculture. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 194, 110331. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110331>

Rosset, J. D., & Gulden, R. H. (2019). Cultural weed management practices shorten the critical weed-free period for soybean grown in the Northern Great Plains. *Weed Science*, 1–13. <https://doi.org/10.1017/wsc.2019.60>

Rossi, E. M. (2020). *Antología Toxicológica del Glifosato +1000 (5.a ed., Vol. 1) [Libro electrónico]. Naturaleza De Derechos*. <https://surcosdigital.com/wp-content/uploads/2020/04/Antologia-toxicol%C3%B3gica-del-glifosato-5-ed.pdf>

URL: <https://surcosdigital.com/wp-content/uploads/2020/04/Antologia-toxicol%C3%B3gica-del-glifosato-5-ed.pdf>

Roundup Lawsuit, M. (s. f.). IARC Glyphosate Monograph Concludes “Probable Human Carcinogen”. Baum Bh Hedlund. Recuperado 12 de

septiembre de 2021, de <https://www.baumhedlundlaw.com/toxic-tort-law/monsanto-roundup-lawsuit/iarc-glyphosate-monograph/>

Roy, D. B., Bohan, D. A., Houghton, A. J., Hill, M. O., Osborne, J. L., Clark, S. J., Perry, J. N., Rothery, P., Scott, R. J., Brooks, D. R., Champion, G. T., Hawes, C., Heard, M. S., & Firbank, L. G. (2003). Invertebrates and vegetation of field margins adjacent to crops subject to contrasting herbicide regimes in the Farm Scale Evaluations of genetically modified herbicide-tolerant crops. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 358(1439), 1879–1898.
<https://doi.org/10.1098/rstb.2003.1404>

Sabio Y García, C. A., Schiaffino, M. R., Lozano, V. L., Vera, M. S., Ferraro, M., Izaguirre, I., & Pizarro, H. (2020). New findings on the effect of glyphosate on autotrophic and heterotrophic picoplankton structure: A

microcosm approach. Aquatic Toxicology, 222, 105463.

<https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2020.105463>

Siemering, G. S., Hayworth, J. D., & Greenfield, B. K. (2008).

Assessment of Potential Aquatic Herbicide Impacts to California Aquatic

Ecosystems. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 55(3),*

415–431. <https://doi.org/10.1007/s00244-008-9137-2>

Simonsen, L., Fomsgaard, I. S., Svensmark, B., & Spliid, N. H. (2008).

Fate and availability of glyphosate and AMPA in agricultural soil. *Journal of*

Environmental Science and Health, Part B, 43(5), 365–375.

<https://doi.org/10.1080/03601230802062000>

Skark, C., Zullei-seibert, N., Schöttler, U., & Schlett, C. (1998). The

Occurrence of Glyphosate in Surface Water. *International Journal of*

Environmental Analytical Chemistry, 70(1–4), 93–104.

<https://doi.org/10.1080/03067319808032607>

Solomon, K., & Thompson, D. (2003). Ecological Risk Assessment for Aquatic Organisms from Over-Water Uses of Glyphosate. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part B*, 6(3), 289–324.

<https://doi.org/10.1080/10937400306468>

Subramaniam, V., & Hoggard, P. E. (1988). Metal complexes of glyphosate. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 36(6), 1326–1329.

<https://doi.org/10.1021/jf00084a050>

Tang, Q., Tang, J., Ren, X., & Li, C. (2020). *Glyphosate exposure induces inflammatory responses in the small intestine and alters gut microbial*

composition in rats. Environmental Pollution, 261, 114129.

<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114129>

Tarazona, J. V., Court-Marques, D., Tiramani, M., Reich, H., Pfeil, R., Istace, F., & Crivellente, F. (2017). Glyphosate toxicity and carcinogenicity: a review of the scientific basis of the European Union assessment and its differences with IARC. *Archives of Toxicology, 91*(8), 2723–2743.

<https://doi.org/10.1007/s00204-017-1962-5>

Tsui, M. T., & Chu, L. (2003). Aquatic toxicity of glyphosate-based formulations: comparison between different organisms and the effects of environmental factors. *Chemosphere, 52*(7), 1189–1197.

[https://doi.org/10.1016/s0045-6535\(03\)00306-0](https://doi.org/10.1016/s0045-6535(03)00306-0)

Tsui, M. T. K., & Chu, L. M. (2004). Comparative Toxicity of Glyphosate-Based Herbicides: Aqueous and Sediment Porewater Exposures.

Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 46(3).

<https://doi.org/10.1007/s00244-003-2307-3>

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, &
O.P.P.T.S. (1994, febrero). GLYPHOSATE (N.o 20460). Reregistration
Eligibility Decision (RED).

https://www3.epa.gov/pesticides/chem_search/reg_actions/reregistration/red_PC-417300_1-Sep-93.pdf

US EPA (Environmental Protection Agency). 1993. EPA Reregistration
Eligibility Document, Glyphosate. EPA 738-R-93-014. Office of Prevention,
Pesticides and Toxic Substances, United States Environmental Protection
Agency. Washington, D.C.

Wang, S., Seiwert, B., Kästner, M., Miltner, A., Schäffer, A., Reemtsma,
T., Yang, Q., & Nowak, K. M. (2016). (Bio)degradation of glyphosate in water-
sediment microcosms – A stable isotope co-labeling approach. Water Research,
99, 91–100. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2016.04.041>

Wang, T., Ren, J., Qu, G., Liang, D., & Hu, S. (2016). Glyphosate
contaminated soil remediation by atmospheric pressure dielectric barrier

discharge plasma and its residual toxicity evaluation. *Journal of Hazardous Materials*, 320, 539–546. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.08.067>

Weeks Santos, S., Gonzalez, P., Cormier, B., Mazzella, N., Bonnaud, B., Morin, S., Clérandeau, C., Morin, B., & Cachot, J. (2019). A glyphosate-based herbicide induces sub-lethal effects in early life stages and liver cell line of rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss*. *Aquatic Toxicology*, 216, 105291. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2019.105291>

Williams, G. M., Kroes, R., & Munro, I. C. (2000). Safety Evaluation and Risk Assessment of the Herbicide Roundup and Its Active Ingredient, Glyphosate, for Humans. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 31(2), 117–165. <https://doi.org/10.1006/rtph.1999.1371>

Woźniak, E., Reszka, E., Jabłońska, E., Balcerczyk, A., Broncel, M., & Bukowska, B. (2020). Glyphosate affects methylation in the promoter regions of selected tumor suppressors as well as expression of major cell cycle and

apoptosis drivers in PBMCs (in vitro study). *Toxicology in Vitro*, 63, 104736.

<https://doi.org/10.1016/j.tiv.2019.104736>

Xia, Y., Yang, X., Lu, J., Xie, Q., Ye, A., & Sun, W. (2020). The endoplasmic reticulum stress and related signal pathway mediated the glyphosate-induced testosterone synthesis inhibition in TM3 cells.

Environmental Pollution, 260, 113949.

<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.113949>

Yushchenko, D. Y., Khlebnikova, T. B., Pai, Z. P., & Bukhtiyarov, V. I. (2021). Glyphosate: Methods of Synthesis. *Kinetics and Catalysis*, 62(3), 331–341. <https://doi.org/10.1134/s0023158421030113>

Zhou, J., Li, J., An, R., Yuan, H., & Yu, F. (2012a). *Study on a New Synthesis Approach of Glyphosate. Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 60(25), 6279–6285. <https://doi.org/10.1021/jf301025p>

Zhou, J., Li, J., An, R., Yuan, H., & Yu, F. (2012b). *Study on a New Synthesis Approach of Glyphosate. Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 60(25), 6279–6285. <https://doi.org/10.1021/jf301025p>