

Nueva metodología de análisis para determinar el delito ambiental de ecocidio por glifosato en cultivos permanentes de coca en Colombia

New analysis methodology to determine the environmental crime of ecocide by glyphosate in permanent coca crops in Colombia

Nova metodologia analítica para determinar o crime ambiental do ecocídio do glifosato em cultivos permanentes de coca na Colômbia

• Fecha de recepción: 2024/09/29
• Fecha de evaluación: 2025/03/11
• Fecha de aprobación: 2025/03/21

Para citar este artículo / To reference this article / Para citar este artigo: González Forero, R., Kavouras, J. y González Ruiz, É. (2025). Nueva metodología de análisis para determinar el delito ambiental de ecocidio por glifosato en cultivos permanentes de coca en Colombia, *Revista Criminalidad*, 67(2), 49-62. <https://doi.org/10.47741/17943108.645>

Rosalina González Forero

Doctora en Ingeniería
Universidad de La Salle
Bogotá, Colombia,
rogonzalez@unisalle.edu.co
<https://orcid.org/0000-0002-5860-657X>

Jerry Kavouras

Doctor en Ciencias Biológicas,
Lewis University, Romeoville
Illinois, Estados Unidos de América
kavourje@lewisu.edu
<https://orcid.org/0009-0001-7039-6325>

Érika González Ruiz

Escuela de Guías Caninos ESGAC
Facatativá, Colombia
gonzalezruiz.eriest@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0006-5919-5553>

Resumen

El crimen organizado transnacional ha sido nefasto para el territorio colombiano, en especial el asociado a la producción de coca en la última década, lo que ha generado impactos económicos y sociales debido al aumento del conflicto e inseguridad en las zonas de influencia del cultivo. Esto se debe a que en el 2023 se tenían 230 000 hectáreas sembradas, lo que representa el 20 % de la superficie del país, con un impacto ambiental no cuantificado en términos penales. Este requiere de acciones de entidades estatales, así como de cooperación internacional, para adaptar estrategias y poder judicializar estos delitos que afectan a generaciones de personas, con nuevas técnicas forenses. En el presente trabajo se aplicó una nueva metodología mediante el seguimiento de la actividad metabólica microbiana a lo largo del tiempo, usando EcoPlatos. Esta técnica novedosa para el país fue el resultado de la sinergia entre la Universidad de La Salle (Bogotá) y su aliada lasallista Lewis University, la cual se aplicó a tres muestras de suelo de reservas, parques industriales y campos agrícolas con más de quince años de aplicación del químico, bajo técnicas estándar. Se analizó el crecimiento celular usando EcoPlatos, lo que permitió establecer la utilización de sustratos de carbono por los microorganismos del suelo y evidenciar la pérdida definitiva de especies clave para las cadenas tróficas. Con esta prueba se podría tipificar el ecocidio, ya que es innegable lo que se ocasiona en la base del bioma y que se extiende a las otras especies en la cadena.

Palabras clave

Delito ambiental; comunidades microbianas; impacto antropogénico; suelos

Abstract

Transnational organised crime has been harmful for the Colombian territory, especially that associated with coca production in the last decade, which has generated economic and social impacts due to an increase of the conflict and insecurity in the areas of influence of the crop. This is due to the fact that in 2023, 230,000 hectares were sown, representing 20 % of the country's surface area, with an environmental impact that has not been quantified in criminal terms. This requires actions by state entities, as well as international cooperation, in order to adapt strategies and be able to prosecute these crimes that affect



Esta obra está bajo licencia CC BY-NC-ND 4.0©
por Policía Nacional de Colombia

generations of people, with new forensic techniques. In the present work, a new methodology was applied by monitoring microbial metabolic activity over time, using EcoPlatos. This novel technique for the country was the result of the synergy between the Universidad de La Salle (Bogotá) and its Lasallian ally Lewis University, and was applied to three soil samples from reserves, industrial parks and agricultural fields with more than fifteen years of application of the chemical, under standard techniques. Cell growth was analysed using EcoPlatos, which made it possible to establish the utilisation of carbon substrates by soil micro-organisms and to demonstrate the definitive loss of key species for the food chains. With this evidence, ecocide could be typified, as what is caused at the base of the biome is undeniable and extends to the other species in the chain.

Keywords

Environmental crime; microbial communities; anthropogenic impact; soils

Resumo

O crime organizado transnacional tem causado prejuízos significativos ao território colombiano, especialmente no que se refere à produção de coca na última década. Essa atividade gerou impactos econômicos e sociais expressivos, em decorrência do aumento do conflito e da insegurança nas áreas influenciadas por esse cultivo. Em 2023, foram registrados 230 mil hectares cultivados com coca, o que corresponde a 20% da superfície do país, gerando um impacto ambiental ainda não quantificado sob a perspectiva penal. Isso requer ações de entidades estatais, bem como cooperação internacional, para adaptar estratégias e poder processar esses crimes que afetam gerações de pessoas, com novas técnicas forenses. No presente trabalho, uma nova metodologia foi aplicada por meio do monitoramento da atividade metabólica microbiana ao longo do tempo, utilizando o EcoPlatos. Essa nova técnica para o país foi o resultado da sinergia entre a Universidade de La Salle (Bogotá) e a Universidade Lewis, sua aliada lassalista, cuja metodologia foi aplicada a três amostras de solo de reservas, parques industriais e campos agrícolas com mais de 15 anos de aplicação da substância química, sob técnicas-padrão. O crescimento celular foi analisado por meio do EcoPlatos, o que possibilitou estabelecer a utilização de substratos de carbono pelos microrganismos do solo e demonstrar a perda definitiva de espécies-chave para as cadeias alimentares. Com essas evidências, o ecocídio pode ser tipificado, pois é inegável o que é causado na base do bioma e que se estende às outras espécies da cadeia.

Palavras-chave

Crime ambiental; comunidades microbianas; impacto antropogênico; solos

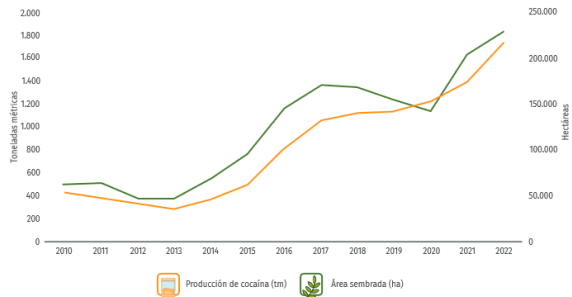
Introducción

El tema de la coca y el glifosato en Colombia ha sido objeto de escrutinio público desde hace diez años, en especial cuando como política de Estado, esta relación

fue mal vista para la erradicación del cultivo ilícito. En su momento, se discutieron los aspectos asociados a los impactos ambientales que el químico potencialmente podría ocasionar, así como otros relacionados con temas de salud en las personas. Lo anterior, soportado en parte por los anuncios de la Agencia Internacional de

Investigación sobre el Cáncer (IARC, por sus siglas en inglés), la cual catalogó al glifosato como probablemente (*probably*) carcinógeno a los humanos (ATSDR, 2020). Esto generó que, mediante la Sentencia T-413/21 (Corte Constitucional, 2021), se dispusiera de un mecanismo de participación en materia ambiental para las poblaciones campesinas, indígenas y afrodescendientes potencialmente afectadas por la reanudación de las aspersiones aéreas con glifosato, antes de que la Agencia Nacional de Licencias Ambientales (ANLA) emitiera una decisión de modificación al Plan de Manejo Ambiental sobre la materia. Han pasado tres años y esto no se ha vuelto a discutir. Sin embargo, por otra parte, al revisar el último informe (2023) de la Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito (UNODC, por sus siglas en inglés) (UNODC, 2023), se registra un área neta con cultivos de coca en el país a 31 de diciembre de 2022, de 230 000 hectáreas, que comparada con el informe del 2021 (UNODC, 2021) donde había 143 000 hectáreas, se aprecia un aumento del 60% del área sembrada (figura 1). Esto resulta preocupante y paradójico, ya que, precisamente en este cultivo, se utiliza el glifosato para limpiarlo de malezas, con el agravante de que, según Roa (2014), esta sustancia bajo este contexto, es de aplicación directa y repetida en el suelo para evitar nacimiento de malezas y el contacto con las hojas de coca. Lo anterior evidencia cómo, mientras el Estado intentaba proteger de contaminación las zonas cultivadas, la delincuencia en dos años deforestó 87 000 hectáreas para establecer más cultivos y, además, inundó dichas zonas de glifosato. El impacto en el país y la expansión de este cultivo ha sido especialmente nefasto en las zonas de la Orinoquía y Amazonía, donde están las comunidades que, precisamente, la Sentencia T-413/21 (Corte Constitucional, 2021) buscaba que tuvieran voz en el proceso de erradicación. Adicional a lo anterior, el último informe de la Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito (UNODC, 2023) de una forma muy preocupante indica cómo el 49% de las áreas sembradas con coca están en zonas denominadas de manejo especial, con la siguiente distribución: 21.5% en parques nacionales naturales, 18% en resguardos indígenas, 4% en tierras de comunidades afrodescendientes y 2% en reservas forestales. Esto genera una alarma realmente fuerte, porque se ha invadido el país con una práctica que implica mucho más glifosato en suelo, que el usado por hectárea en la agricultura tradicional, con formulaciones más altas en comparación con las comerciales (Camacho y Mejía, 2017; Oldham y Massey, 2002).

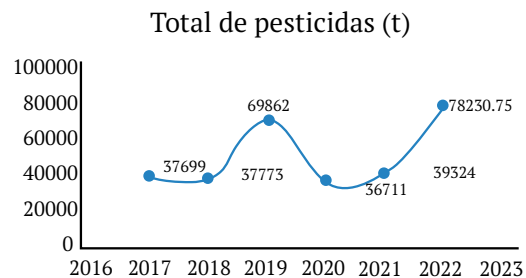
Figura 1. | Serie histórica de producción de cocaína en Colombia (tm) y área sembrada en el país (ha) para el periodo 2010-2022



Fuente: UNODC-SIMCI (2023).

Teniendo en cuenta lo anterior y al revisar los datos de consumo de pesticidas en Colombia, según FAOSTAT (base de datos estadísticos corporativos de la Organización de las Naciones para la Alimentación y la Agricultura) (2024), se observa en la figura 2 que en el 2022 se duplicó el consumo de pesticidas, siguiendo el patrón de aumento de hectáreas cultivadas de coca, en especial desde el 2019, con un récord histórico de 70 230 toneladas de consumo interno. El factor agravante son las estadísticas sobre comercialización de plaguicidas en Colombia, que, según el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA, 2022), indican que el porcentaje de uso de glifosato en el país es, en promedio, del 20% del total de las importaciones. Esto implicó para el 2022 un uso de 15 646.15 t. Es de anotar que estos datos son globales para todo tipo de cultivo en Colombia, ya que la sustancia química usada para fines ilícitos llega al país por importación.

Figura 2. | Estadística de uso de pesticidas en Colombia en toneladas periodo 2017-2022



Fuente: FAOSTAT (2024).

Estudios realizados indican efectos negativos a nivel ambiental, como resultado del uso de las elevadas proporciones en campo y las aplicaciones repetitivas por área, las cuales afectan la microbiota nativa, impactando la calidad del suelo y sus comunidades microbianas en cuanto a composición, diversidad y actividad de los microorganismos (Druille et al., 2016; Guijarro et al., 2018; Lane et al., 2012; Newman et al., 2016; Nguyen et al., 2016; Zabaloy et al., 2012). Esto conlleva un desequilibrio en la funcionalidad de los servicios ecosistémicos, y más específicamente en los procesos biogeoquímicos de descomposición de la materia orgánica y el ciclo de nutrientes en el suelo (Gilbert, 2013).

Dichas investigaciones indican también que el químico tiene la capacidad de actuar generando cambios en la composición o diversidad de las comunidades microbianas, principalmente sobre los *phyla* o géneros específicos (Kremer y Means, 2009; Tohge et al., 2013). Además, de cambios en su estructura por diferencias en las tasas de aplicación del herbicida y aplicaciones repetitivas (Druille et al., 2016; Guijarro et al., 2018; Liu et al., 2018; Newman et al., 2016; Schlatter et al., 2017; Zabaloy et al., 2015); esto se observa, por ejemplo, en el caso de las *Pseudomonas fluorescens* reductoras de manganeso, otras rizobacterias productoras de ácido indolacético (AIA) y hongos filamentosos no rizosféricos de la especie *Aspergillus nidulas*, un bioindicador del estado del ecosistema de suelos agrícolas, donde se afecta su germinación, crecimiento y desarrollo (Nicolas et al., 2016).

Es de anotar que estos últimos, los hongos, son especialmente sensibles al glifosato en la biomasa del suelo a dosis altas (Vázquez et al., 2021), ya que inhiben enzimas requeridas para la biosíntesis de aminoácidos aromáticos y metabolitos secundarios (Van Bruggen et al., 2018), generando algunos efectos en procesos fisiológicos como la fotosíntesis, el metabolismo del carbono y nitrógeno, la nutrición mineral vegetal, los mecanismos de lignificación, los eventos de estrés oxidativo y la alteración de las comunidades microbianas que interactúan con las plantas (microbioma) (Gomes et al., 2014; Van Bruggen et al., 2018; Zobiolo et al., 2012). Lo anterior, debido también a que el glifosato es de naturaleza no selectiva, con efectos en especies no objetivo sensibles al mismo y de amplio espectro (Annett et al., 2014; Benbrook, 2016; Guijarro et al., 2018; Kurenbach et al., 2018; Lane et al., 2012; Newman et al., 2016; Myers et al., 2016; Van Bruggen et al., 2018; Zabaloy et al., 2012; Zhan et al., 2018). Es de anotar, que el estudio de Lara-Rodríguez et al. (2020), muestra que el uso de glifosato en proporción mayor a la recomendada, genera un impacto negativo sobre los microorganismos del suelo; así como alteraciones en las defensas fisiológicas de las plantas, siendo estas más

susceptibles a enfermedades; permitiendo el crecimiento de fitopatógenos por supresión del crecimiento de microorganismos benéficos. Por último, se obtiene resistencia al glifosato, lo que obliga a utilizar dosis más altas, en un ciclo creciente de consumo, que en el cultivo ilícito se evidencia principalmente, puesto que el costo es uno más en la cadena productiva.

Otro aspecto importante de analizar es que la vida media del glifosato en el suelo oscila entre 1 y 197 días; el cual puede ser degradado naturalmente. Para que el 90% de este desaparezca del suelo, se requieren entre 40 a 280 días (Bento et al., 2016). Sin embargo, su metabolito (AMPA) persiste más tiempo en el recurso, llegando a una vida media entre 23 y 958 días, que, en espacios con repeticiones de aplicación, provocan que el impacto no cese, sino que aumente. Estos dos compuestos persisten en las capas superiores del suelo, alcanzando horizontes más profundos a través de poros o capilares radiculares e incluso afectar aguas superficiales o subterráneas (Bento et al., 2016; Gomes et al., 2014; Zhan et al., 2018), ocasionando que la saturación genere efectos ecotoxicológicos más altos. Por otro lado, al analizar los componentes constitutivos del suelo, como sus grupos funcionales carboxilo, amino y fosfonato, se encuentra que estos favorecen que el compuesto se adsorba fuertemente a los minerales y los cationes divalentes y trivalentes de este recurso como Ca^{2+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} , Al^{3+} y Fe^{3+} y se formen complejos estables con el glifosato, ya que él es un ácido poliprótico. El pH del suelo también influye en la adsorción de la sustancia, la cual es menor a pH altos. Esto permite la interacción con la biota y la presencia de materia orgánica y arcilla, generando variaciones en la adsorción, que se aprecia directamente en su reactividad al componente biológico (Bai y Ogbourne, 2016; Borggaard y Gimsing, 2008; Gimsing et al., 2007; Gimsing y Borggaard, 2002; Hébert et al., 2019; Maqueda et al., 2017).

La evidencia científica presentada indica el gran impacto que este material genera y cómo la afectación microbiológica es altamente notoria, además del impacto de esta en los suelos y plantas que también se ha correlacionado. Por ello, el delito de daños en los recursos naturales y ecocidio toma importancia, al causarse bajo este contexto un daño masivo y sistémico en el ecosistema, además de destruir y hacer desaparecer una parte vital del recurso del suelo. Por ello, desde la Ley 2111 de 2021 en su artículo 333 (Función Pública, 2021), se hace evidente una oportunidad para hacer justicia con algo que nunca se ha abordado: la posibilidad de judicialización de organizaciones criminales por delitos ambientales, en especial, el ecocidio por glifosato en cultivos de coca en Colombia. El daño que se causa de esta forma afecta a generaciones y muy posiblemente se perderán

especies para siempre. Ello no tiene precio y no hay pena que lo sopesa, ya que un daño de estos es irreparable. Además, este delito puede exacerbar otras situaciones que se viven hoy en día, como es el cambio climático y la escasez de agua. En el caso del establecimiento de los cultivos ilícitos de coca, un impacto inicial es la deforestación y luego viene la adición de glifosato para eliminar la biota del suelo, que se compone de plantas nativas y microorganismos, permitiendo así el cultivo. Es en este momento cuando se genera el daño y se hace manifiesto el ecocidio, ya que sin estos componentes la temperatura aumentará, no se darán procesos biológicos, se secará el suelo y los daños irreversibles pueden llegar si las aplicaciones de glifosato son directas al suelo y de forma repetida. Muy poderosa herramienta es esta, la de la judicialización del delito de ecocidio, desde el análisis de la pérdida de biota en el suelo. Sin embargo, hoy en Colombia, no se puede determinar este impacto en los laboratorios forenses. Por ello, la presente investigación se centró en desarrollar una metodología fácil, rápida y económica para que nuestros científicos puedan monitorear los efectos del glifosato mediante el seguimiento de la actividad microbiana (biológica) a lo largo del tiempo.

En consecuencia, se consultaron nuevas técnicas de medición, aprovechando el hecho de que las comunidades microbianas de los suelos se pueden monitorear verificando sus propiedades metabólicas. Por ello, la metodología de análisis de comunidades bacterianas por medio de la aplicación de la técnica de EcoPlatos (Biolog, 2024), se presenta como una poderosa herramienta con las cualidades buscadas como facilidad, inmediatez y confiabilidad. La razón es que los microorganismos están presentes en todos los entornos naturales y son los primeros en reaccionar ante los cambios químicos y físicos. Estos cambios en las comunidades microbianas generalmente son un precursor de los cambios en la salud y viabilidad del entorno en su conjunto. Múltiples investigaciones han demostrado que el perfil fisiológico a nivel de comunidad puede detectar y evaluar los cambios posteriores a la aparición de una variable ambiental. Lo anterior se evidencia en el trabajo de Lupwayi et al. (2004), donde se investigó la biomasa y la diversidad microbiana del suelo después de la aplicación de herbicidas mediante la técnica de los EcoPlatos, y se encontraron cambios estructurales en la comunidad microbiana inducidos por los herbicidas objeto de estudio. También en el de Decena y De la Cruz (2024), donde observaron que, cuando hay bosques menos perturbados, las comunidades microbianas son más diversas funcionalmente y la presencia de sustancias foráneas, como los antibióticos, hace disminuir significativamente la forma en que las comunidades microbianas del suelo utilizan el carbono.

Esta prueba consiste en el desarrollo de perfiles de comunidades bacterianas, lo que permite detectar cambios en su diversidad por los factores que se quieran medir, en este caso, la aplicación del glifosato al suelo, utilizando treinta y una fuentes de carbono distintas en un solo ensayo con triplicados para evaluar la actividad microbiana afectada. Se puede aplicar en suelo y en agua. La técnica presenta la ventaja de medir la actividad metabólica desde el primer día de medición y solo requiere 50 microlitros de muestra, lo que significa que se necesitan cantidades muy pequeñas de suelo por ensayo. Además, proporciona resultados inmediatos y cada EcoPlato para 90 muestras tiene un costo de USD 15. (al momento de escribir el presente documento) El fundamento de la prueba es la utilización de fuentes de carbono como sustrato por parte de los microorganismos, que a medida que respiran hacen que un colorante tetrazolio se reduzca para formar un color púrpura visible. Esto genera un patrón de reacción característico o huella metabólica, que refleja las propiedades de la comunidad. El crecimiento se mide por densidad óptica (Biolog, 2024).

Metodología

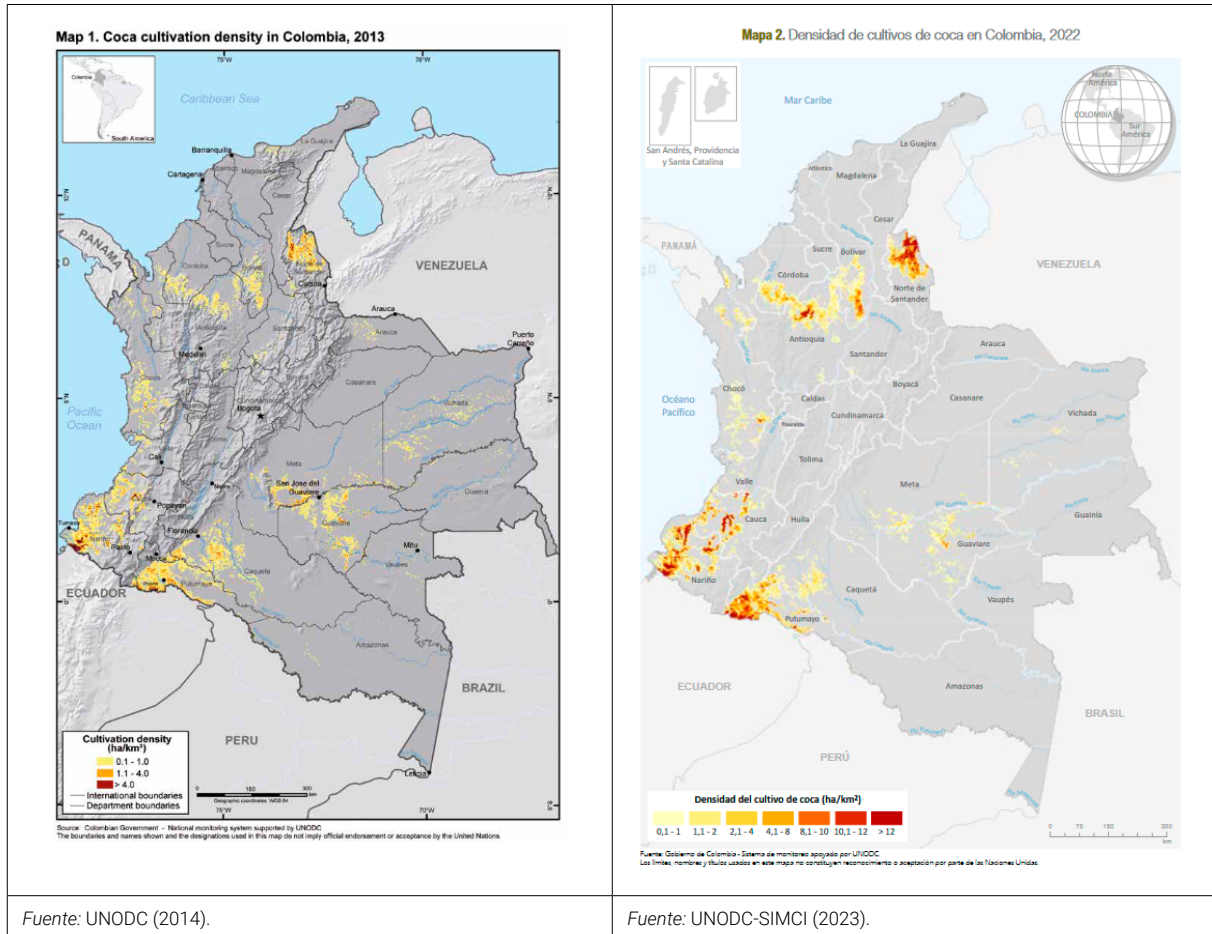
El estudio se realiza para Colombia en Lewis University (Illinois), aprovechando la red de universidades lasallistas, junto con la Universidad de La Salle (Bogotá), puesto que ninguno de los laboratorios forenses del país cuenta con la técnica descrita. Sin embargo, es de aclarar que, al analizar comunidades bacterianas, se busca determinar un efecto global de una actividad en un entorno; por tanto, para el resultado obtenido, no influye la localización de la realización de las pruebas y es posible extrapolar la metodología para la aplicación que se busca, que es el impacto del glifosato en comunidades microbianas de cultivos de coca permanentes. En este caso, lo único que cambia es el tipo de cultivo, que, para la actividad analizada, al ser una finca, el impacto es más leve que el del cultivo ilícito, ya que en el cultivo legal se tiene en cuenta costos de dosificación, mientras que en el ilegal no. Por otra parte, en Colombia, acceder a estos lugares, precisamente por los problemas sociales y de inseguridad, es prácticamente imposible. Por ello, se tomaron muestras locales cercanas a los laboratorios de análisis, pero con un impacto similar al deseado.

Para llevar a cabo la investigación, se recogieron muestras del suelo en tres locaciones con características distintas: una reserva natural, un parque industrial y una granja con más de quince años de aplicación de glifosato, con el fin de comparar los suelos y analizar el efecto de la actividad antrópica, en especial la del pesticida sobre su microbiota. Se seleccionó el primer sitio, porque en Colombia muchas de las áreas

utilizadas para el establecimiento de los cultivos ilícitos corresponden a zonas de reserva y parques naturales. El segundo corresponde a una zona donde no se ha usado la sustancia, mientras que el tercero, por el contrario, es un lugar con quince años de aplicación intensiva

del químico, que simula un cultivo permanente de coca. Como se puede apreciar en la figura 3, las áreas sembradas son básicamente las mismas que hace diez años; de hecho, muchas de ellas presentan un aumento de la densidad de siembra.

Figura 3. Mapas comparativos de densidad de siembra de coca en Colombia 2013 y 2022



Se muestrearon los siguientes sitios: la reserva Midewin National Tallgrass Prairie (41°20'53.4624"N 88°11'27.2862"W), el parque industrial North Island Industrial Park (41°18'34.041"N 88°0.705"W) y la granja Mazon Farm (41°10'15.905"N 88°27'16.851"W). En la figura 4 se aprecian las imágenes de los sitios muestreados, donde desde un inicio se puede observar el efecto en la actividad agrícola intensiva de amplio y repetido uso de la sustancia. De cada sitio, se recogieron muestras de suelo de aproximadamente 200 g, utilizando un tubo de recuperación de suelo y se colocaron en bolsas de cierre

hermético. La temperatura ambiente de muestreo osciló entre 74 y 87 °F y la humedad entre 47% y 64%. Los suelos se prepararon para su uso en los EcoPlatos mezclando 5 g de suelo de las 4 pulgadas superiores del tubo de recuperación y 5 g de suelo de las 4 pulgadas inferiores del mismo tubo, para cada sitio de recolección con 95 ml de solución salina tampón de fosfato (PBS) en una licuadora comercial durante un minuto. La suspensión de suelo se diluyó 1:100 y 1:1000 siguiendo el método estándar de preparación de EcoPlatos. Posteriormente, cada EcoPlato se inoculó con 120 µL de las diluciones

1:100 y 1:1000 y se incubaron a 25 °C. Diariamente se midieron los valores de absorbancia (densidad óptica) de los EcoPlatos, utilizando un lector de placas Perkin Elmer a intervalos de tiempo de 24, 48, 72, 96 y 120 horas (figura 5). Se realizaron triplicados y los datos se trataron mediante un análisis de varianza (ANOVA), con un nivel de significancia de $p < 0.05$.

Figura 4. | Sitios muestreados



Midewin National Tallgrass



North Island Industrial Park

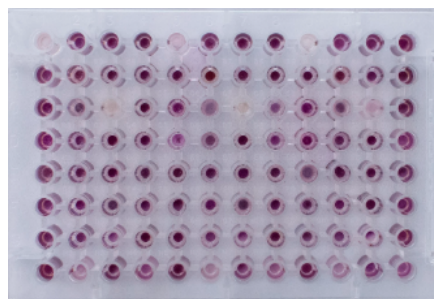


Mazon Farm

Figura 5. | Lector de placas Perkin Elmer y EcoPlatos



Lector de placas



EcoPlatos

Además, se hizo un ensayo en el que se aplicaron al suelo de reserva dosis de glifosato similares a las utilizadas en Colombia para la aspersión aérea y agrícola: 10.4 L/Ha y 3 L/Ha, respectivamente, con el fin de estimar el impacto en las comunidades bacterianas tras una sola aplicación y analizar la polémica situación de la fumigación con este químico, desde la perspectiva de la metodología.

Resultados y análisis

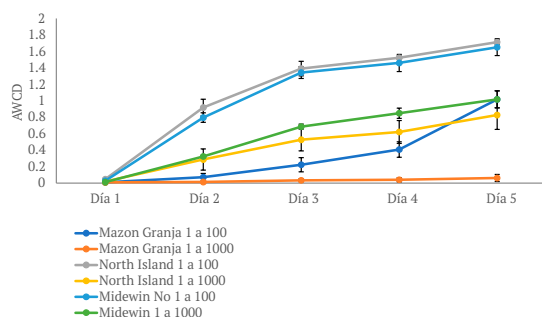
Los resultados obtenidos directamente del instrumento son los valores de densidad óptica, con los cuales se calcula la densidad celular media (AWCD) mediante la ecuación (1). Ella mide el nivel de actividad de los microorganismos en los EcoPlatos, cuanto mayor es la AWCD, mayor será el nivel de actividad. En la figura 6 se observan los AWCD obtenidos, y como se puede apreciar al comparar el AWCD del día 1 al día 5, se observa un aumento notable en cada muestra ambiental. Además, la aplicación continua y masiva de glifosato en suelo, hace que las comunidades microbianas desaparezcan permanentemente, mientras que las de los suelos de la reserva natural tienen los valores más altos indicando mucha mayor actividad en él. También se aprecia un impacto medio en actividades antrópicas como en el caso del parque industrial, lo que muestra evidencia

del potencial de la técnica. Después del periodo de cinco días, el AWCD de la granja Mazon para cualquiera de las diluciones fue menor que el de Midewin y el de North Island Park ($p = 0$). El AWCD de Midewin fue aproximadamente igual al de North Island Park para la dilución de 1 a 100 o la dilución de 1 a 1000 ($p = 0.976$ y $p = 0.292$, respectivamente).

Densidad celular media (AWCD)

$$AWCD = \frac{\sum(31 \text{ valores de densidad óptica})}{31} \quad (1)$$

Figura 6. | Valores de densidad óptica para comunidades bacterianas de Midewin National Tallgrass Prairie, North Island Industrial Park y Mazon Farm en las diluciones 1:100 y 1:1000



Posteriormente se calculó el Índice de Diversidad de Shannon con las ecuaciones (2) y (3), el cual mide la diversidad específica de la comunidad (Gryta et al., 2014). Valores inferiores a 2 son bajos en diversidad de especies, y superiores a 3 indican mejor diversidad. Un valor de cero indica que no hay diversidad. La figura 7 muestra los Índices de Diversidad de Shannon, donde se observa cómo la granja con quince años permanentes de aplicación de glifosato tiene índices de diversidad bajos, mientras que las otras locaciones, en especial la reserva natural de Midewin, tienen índices altos. Ello evidencia cómo el efecto en aplicaciones permanentes reduce en más de una unidad el índice de diversidad. En Colombia hay zonas que tradicionalmente han tenido por décadas este cultivo, como es el caso de los departamentos de Nariño, Putumayo y Norte de Santander, según la figura 3. La literatura respalda que las aplicaciones a largo plazo de glifosato tienen un efecto sobre la diversidad y composición de la comunidad microbiana (Kuklinsky-Sobral et al., 2005; Lancaster et al., 2010; Newman et al., 2016). Lo anterior significa que, en estas zonas de largo

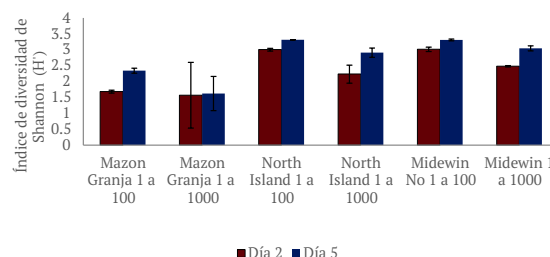
tiempo de cultivos de coca, evidentemente habrá pérdida de especies, en este caso microbianas, las cuales son responsables de los ciclos de nutrientes en el ambiente y, por ende, la base de la cadena trófica. El Índice de Shannon (H') se midió los días 2 y 5. Se observaron aumentos entre los días 2 y 5 en todas las muestras. El día 2, el H' de la granja Mazon fue menor que el de Midewin y North Island Park para las diluciones 1:100 ($p = 0.011$ y $p = 0.009$, respectivamente). No se encontraron diferencias en los valores de H' entre Midewin y North Island Park el día 2 ($p = 1$).

Índice de Diversidad de Shannon

$$H' = -\sum (p \times \ln p) \quad (2)$$

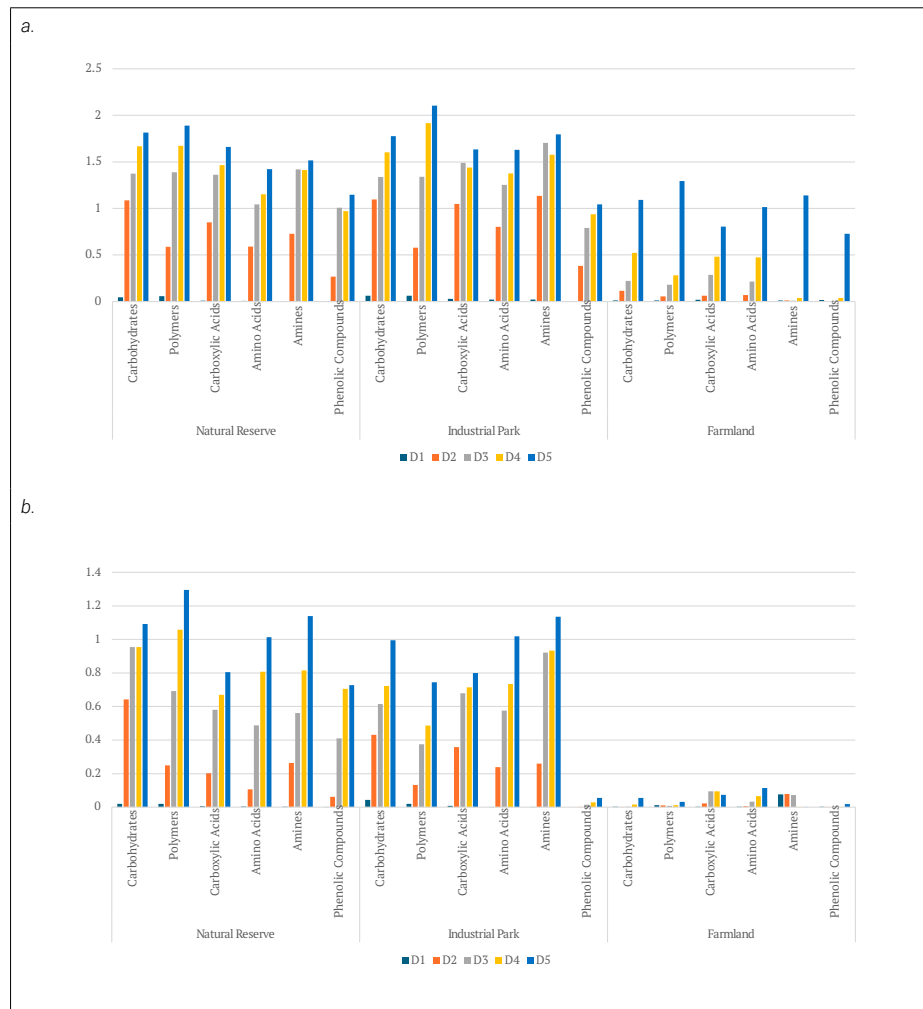
$$p = \frac{\text{Proporción de individuos de la especie por placa}}{\text{Suma del total de individuos por las 31 placas}} \quad (3)$$

Figura 7. | Valores del Índice de Diversidad de Shannon para comunidades bacterianas de Midewin National Tallgrass Prairie, North Island Industrial Park y Mazon Farm en las diluciones 1:100 y 1:1000



Para reforzar la hipótesis, se analizó el uso de las fuentes de carbono presentes en los EcoPlatos; es decir, el alimento que los microorganismos emplearon en el estudio, con el objetivo de establecer su impacto en los ciclos vitales de los nutrientes. Es así que González et al. (2021) demostraron cómo precisamente en el lugar con más de quince años de aplicación para cada una de las diluciones realizadas, todas las fuentes de carbono tuvieron valores muy bajos (carbohidratos, polímeros, ácidos carboxílicos, aminoácidos, aminas y compuestos fenólicos), validándose la hipótesis de la pérdida irreparable de especies y comprobando los datos del índice de biodiversidad, esto se puede apreciar en la Figura 8. Además, estas fuentes son indicativo de microorganismos participantes en los ciclos de nutrientes en el suelo, lo que muestra la utilidad de la técnica en análisis forenses.

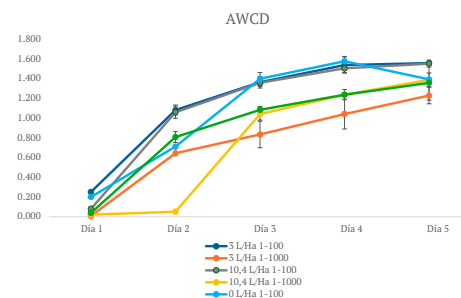
Figura 8. | Densidades ópticas de comunidades microbianas del suelo de reservas naturales, parques industriales y tierras agrícolas de D1 a D5 de diluciones de 1:100 (A) y 1:1000 (B)



Fuente: González et al. (2021), permisos de uso aceptados.

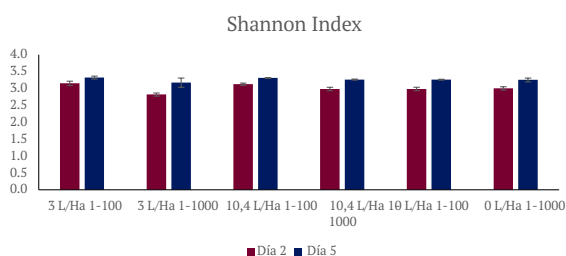
Los resultados para el ensayo de suelo con dosis de glifosato similares a las usadas en Colombia para aspersión aérea y de agricultura se presentan en las figuras 9 y 10, de densidad óptica e Índice de Diversidad de Shannon. Al comparar el AWCD del día 1 al día 5, se observa un aumento notable, donde no hay mucha diferencia entre las diluciones 1:100 a 1:1000, incluso con los controles. Este resultado está soportado con el análisis ANOVA, que indicó la ausencia de diferencias significativas entre tratamientos ($p > 0.05$), lo que sugiere que una dosis única no genera daño permanente y se efectúa la recuperación del ecosistema.

Figura 9. | Valores de densidad óptica para comunidades bacterianas de suelo de reserva en las diluciones 1:100 y 1:1000 para las dosis de 3 L/Ha y 10 L/Ha



Respecto al Índice de Diversidad de Shannon (H'), la figura 10 indica que para el día 2, el control tuvo un H' menor que los tratamientos de 3 L/Ha y 10 L/Ha ($p = 0.015$ y $p = 0.045$, respectivamente) y para el día 5, no se encontraron diferencias entre los tratamientos ($p = 0.139$). Lo anterior, es respaldado por la literatura, que indica que las aplicaciones únicas de glifosato generalmente no afectan a las comunidades microbianas (Dennis et al., 2018; Lupwayi et al., 2004; Newman et al., 2016). Esto desmitifica mucho de lo mencionado ante la aspersión aérea en un ensayo controlado de metabolismo bacteriano y abre la puerta a la realización de ensayos similares, pero mucho más específicos en condiciones y suelos colombianos con el apoyo de las autoridades encargadas de este fin.

Figura 10. | Valores del Índice de Diversidad de Shannon para comunidades bacterianas de suelo de reserva en las diluciones 1:100 y 1:1000 para las dosis de 3 L/Ha y 10 L/Ha



Se demostró que EcoPlate es una herramienta útil que se puede usar para monitorear los efectos del glifosato en las comunidades microbianas y que el glifosato requiere un tratamiento repetido durante un periodo de tiempo para producir diferencias mensurables en las comunidades microbianas del suelo. Los resultados indicaron que las diferencias en la diversidad funcional se pueden medir entre áreas con alta exposición al glifosato y áreas con baja o nula exposición al glifosato. La técnica detecta la pérdida de utilización de sustratos de carbono por parte de los microbios del suelo, causada por la aplicación de pesticidas. Se trata de una pérdida de diversidad funcional que podría tener un efecto dominó en el ecosistema a lo largo del tiempo y se puede aplicar perfectamente para detectar la contaminación ambiental desde el ámbito forense.

Aplicación forense

Para tipificar el delito de ecocidio dentro de la cadena criminal asociada a la producción de coca en Colombia y sentar un precedente en este sentido, es necesaria la

cooperación internacional. Por ello, esfuerzos que ya se han sentado, en especial con agencias como la Sección de Asuntos Antinarcóticos y Aplicación de la Ley (INL, por su sigla en inglés), la cual “trabaja por la seguridad local de los estadounidenses combatiendo el crimen internacional, las drogas ilícitas y la inestabilidad en otros países, en alianza con ellos” (Embajada de EE. UU. en Colombia, 2018), son requeridos. A través de su línea de acción en *Crímenes Ambientales*,

ayuda al gobierno colombiano a combatir delitos ambientales por los mismos grupos criminales involucrados en el tráfico de drogas. El programa fortalece la capacidad de las instituciones colombianas a través de capacitación, tecnología y equipo, para la coordinación interinstitucional dentro del gobierno colombiano para mejorar los procesos y condenas por estos delitos. (Embajada de EE. UU. en Colombia, 2018)

Se tiene la oportunidad de implementar la técnica de los EcoPlatos presentada en el presente documento. Puesto que es una aplicación norteamericana, que como se mostró, permite obtener resultados rápidos, contundentes y económicos aplicables, dentro del sistema penal colombiano. Los esfuerzos solicitados apuntarían básicamente a la adquisición del equipo lector, porque los consumibles son más accesibles que los usados en cualquier técnica química. Por otra parte, la generación de datos es proporcionada por el software, y la interpretación de los resultados puede ser realizada muy fácilmente por un biólogo o microbiólogo colombiano por su sencillez.

Conclusión

La “Nueva metodología de análisis para determinar el delito ambiental de ecocidio por glifosato en cultivos permanentes de coca en Colombia”, que se propone, es un método fácil, rápido y económico, que permite evaluar la pérdida de diversidad funcional, la cual podría tener un efecto dominó en el ecosistema a lo largo del tiempo. Esto se debe al impacto en los ciclos de nutrientes que generan un daño sistémico. Este daño se demostró con las diferencias entre muestras sin y con aplicación permanente del herbicida, además de la simulación de aplicaciones con dosis en agricultura y aspersión aérea. Para ello, se midieron las densidades ópticas, el Índice de Diversidad de Shannon y la diversidad funcional en el uso de fuentes de carbono (carbohidratos, polímeros, ácidos carboxílicos, aminoácidos, aminos y compuestos fenólicos) por cada comunidad microbiana. Se observó que las comunidades microbianas en suelos de aplicación del herbicida tuvieron en todas las fuentes de carbono

valores más bajos que la reserva natural y el parque industrial (30% a 90%), siendo las reservas naturales las más impactadas al transformarlas en cultivos permanentes, porque su gran riqueza en biodiversidad se pierde, tal como está ocurriendo en Colombia en varios departamentos desde hace varias décadas.

Estos hallazgos indicaron que es posible evaluar el impacto antropogénico en suelos usando esta técnica y que ella se puede implementar muy fácilmente a nivel forense si se aprovechan las alianzas existentes, como la que se tiene con Sección de Asuntos Antinarcóticos y Aplicación de la Ley (INL, por su sigla en inglés) del Gobierno de los Estados Unidos, en especial con su línea de crímenes ambientales en cuanto a capacitación, tecnología y equipo, ya que la tecnología usada ha sido desarrollada en este país. Lo anterior, sería una respuesta de cooperación internacional ante la lucha contra el crimen organizado transnacional (COT) relacionado con las drogas, y se recomienda realizar estudios similares en zonas directamente afectadas para cuantificar el daño ecosistémico y el ecocidio generados en el país por este flagelo.

Agradecimientos

Comunidad de La Salle a través de su programa internacional de cooperación de universidades lasallistas. Universidad de La Salle (Bogotá, Colombia).

Lewis University (Illinois, EE. UU.).

Emily Bernhard, Sharbel Dawalibi, Mateo Díaz, Fatimah Jabali, Lindsay Melvin y Nicholas Pawlica. Asistentes de Muestreo y Análisis de Laboratorio, Lewis University, Romeoville (Illinois, EE. UU.).

Shayna Garla y William Tegge.

Asistentes de Muestreo y Análisis de Laboratorio, Marist High School, Chicago (Illinois, EE. UU.).

Conflicto de intereses

No se presentó conflicto de interés entre los autores de la presente investigación académica. Declaramos que no tenemos ninguna relación financiera o personal que pudiera influir en la interpretación y publicación de los resultados obtenidos. Asimismo, aseguramos cumplir con las normas éticas y de integridad científica en todo momento, de acuerdo con las directrices establecidas por la comunidad académica y las dictaminadas por la presente revista.

Referencias

- Annett, R., Habibi, H. R. y Hontela, A. (2014). Impact of glyphosate and glyphosatebased herbicides on the freshwater environment. *Journal of Applied Toxicology*, 34(5), 458-479. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24615870/>
- ATSDR. (2020, 10 de agosto). *ToxFAQs™ - Glifosato (Glyphosate)*. https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts214.html
- Bai, S. H. y Ogbourne, S. M. (2016). Glyphosate: Environmental contamination, toxicity and potential risks to human health via food contamination. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(19), 18988-19001. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-016-7425-3>
- Benbrook, C. M. (2016). Trends in glyphosate herbicide use in the United States and globally. *Environmental Sciences Europe*, 28(1), 1-15. <https://n9.cl/867mq>
- Bento, C. P. M., Yang, X., Gort, G., Xue, S., Van Dam, R., Zomer, P., Mol, H. G. J., Ritsema, C. J. y Geissen, V. (2016). Persistence of glyphosate and aminomethylphosphonic acid in loess soil under different combinations of temperature, soil moisture and light/darkness. *Science of the Total Environment*, 572, 301-311. <https://n9.cl/fp3hrn>
- Biolog. (2024). *Microbial community analysis with EcoPlates*. <https://www.biolog.com/products/community-analysis-microplates/ecoplate/>
- Borggaard, O. K. y Gimsing, A. L. (2008). Fate of glyphosate in soil and the possibility of leaching to ground and surface waters: A review. *Pest Management Science*, 64(4), 441-456. <https://n9.cl/odhj8>
- Camacho, A., y Mejia, D. (2017). The health consequences of aerial spraying illicit crops: The case of Colombia. *Journal of Health Economics*, 54, 147-160. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28570914/>
- Corte Constitucional. (2021, 29 de noviembre). *Sentencia T-413*. <https://www.corteconstitucional.gov.co/relatoria/2021/T-413-21.htm>

- Decena, B. y De la Cruz, T. (2024). Detection of changes in soil microbial community physiological profiles in relation to forest types and presence of antibiotics using Biolog EcoPlate. *Indian Journal of Microbiology*, 773-779. <https://doi.org/10.1007/s12088-024-01294-7>
- Dennis, P., Kukulies, T., Forstner, C., Orton, T. y Pattison, A. The effects of glyphosate, glufosinate, paraquat and paraquat-diquat on soil microbial activity and bacterial, archaeal and nematode diversity. *Sci. Rep.*, 8 (2018), p. 2119
- Druille, M., Garcia-Parisi, P. A., Golluscio, R. A., Cavagnaro, F. P. y Omacini, M. (2016). Repeated annual glyphosate applications may impair beneficial soil microorganisms in temperate grassland. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 230, 184-190. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167880916303255>
- Embajada de EE. UU. en Colombia. (2018). Sección de Asuntos Antinarcóticos y Aplicación de la Ley (INL). <https://n9.cl/7v34f>
- FAOSTAT. (2024). *Pesticides use*. <https://www.fao.org/faostat/en/#data/RP>
- Función Pública. (2021, 29 de julio). Ley 2111 de 2021, “por medio del cual se sustituye el título XI ‘de los delitos contra los recursos naturales y el medio ambiente’ de la ley 599 de 2000, se modifica la ley 906 de 2004 y se dictan otras disposiciones”. <https://n9.cl/zmt88x>
- Gilbert, N. (2013). Case studies: A hard look at GM crops. *Nature*, 427, 24-26. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23636378/>
- Gimsing, A. L. y Borggaard, O. K. (2002). Competitive adsorption and desorption of glyphosate and phosphate on clay silicates and oxides. *Clay Minerals*, 37(3), 509-515.
- Gimsing, A. L., Szilas, C. y Borggaard, O. K. (2007). Sorption of glyphosate and phosphate by variable-charge tropical soils from Tanzania. *Geoderma*, 138(1-2), 127-132. <https://n9.cl/f5axm>
- Gomes, M. P., Smedbol, E., Chalifour, A., Henault-Ethier, L., Labrecque, M., Lepage, L., Lucotte, M. y Juneau, P. (2014). Alteration of plant physiology by glyphosate and its by-product aminomethylphosphonic acid: An overview. *Journal of Experimental Botany*, 65(17), 4691-4703. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25039071/>
- Gómez-Beltrán, C. A. (2021, 10 de septiembre). Destino ambiental y efectos ecológicos de los tres herbicidas más utilizados en Colombia. *Ces. Med. Vet. Zootec*, 16, 47-75. <https://dx.doi.org/10.21615/cesmvz.6238>
- González, R. et al. (2021). Use the metabolic fingerprint in microbial communities to evaluate the anthropogenic impact on soils. En *FAO, Keep soil alive, protect soil biodiversity – Global Symposium on Soil* (pp. 53-61). Rome. <https://doi.org/10.4060/cb7374en>
- Gryta, A., Frac, M. y Oszust, K. The Application of the Biolog EcoPlate Approach in Ecotoxicological Evaluation of Dairy Sewage Sludge. *Appl Biochem Biotechnol* 174, 1434–1443 (2014). <https://doi.org/10.1007/s12010-014-1131-8>
- Guijarro, K. H., Aparicio, V., de Geronimo, E., Castellote, M., Figuerola, E. L., Costa, J. L. y Erijman, L. (2018). Soil microbial communities and glyphosate decay in soils with different herbicide application history. *Science of the Total Environment*, 634, 974-982. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29660891/>
- Hébert, M. P., Fugere, V. y González, A. (2019). The overlooked impact of rising glyphosate use on phosphorus loading in agricultural watersheds. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 17(1), 48-56. <https://esajournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/fee.1985>
- ICA. (2022). *Estadísticas de comercialización de plaguicidas en Colombia*. <https://n9.cl/qkfgx>
- Kremer, R. J. y Means, N. E. (2009). Glyphosate and glyphosate-resistant crop interactions with rhizosphere microorganisms. *European Journal of Agronomy*, 31(3), 153-161. <https://n9.cl/1xgrg9>
- Kuklinsky-Sobral, J., Araújo, W. L. y Mendes, R. (2005). Isolation and characterization of endophytic bacteria from soybean (*Glycine max*) grown in soil treated with glyphosate herbicide. *Plant Soil* 273, 91–99 (2005). <https://doi.org/10.1007/s11104-004-6894-1>
- Kurenbach, B., Hill, A. M., Godsoe, W., Van Hamelsveld, S. y Heinemann, J. A. (2018). Agrichemicals and antibiotics in combination increase antibiotic resistance evolution. *PeerJ*, 6, e5801. <https://doi.org/10.7717/peerj.5801>

- Lancaster, S., Hollister, E., Senseman, S. y Gentry, T. (2010) Effects of repeated glyphosate applications on soil microbial community composition and the mineralization of glyphosate. *Pest Manag Sci.* 2010 Jan;66(1):59-64. doi: 10.1002/ps.1831. PMID: 19697445.
- Lane, M., Lorenz, N., Saxena, J., Ramsier, C. y Dick, R. P. (2012). The effect of glyphosate on soil microbial activity, microbial community structure, and soil potassium. *Pedobiologia*, 55(6), 335-342. <https://n9.cl/26akw>
- Lara-Rodríguez, A. M., Páez-Almanza, O. V., Guevara-Medina, C. J., Alarcón-Vargas A. F., Arenas N. E. y Cuervo-Soto, L. I. (2020). Efectos del glifosato en la expresión de algunos genes y sus implicaciones en la salud humana. *Revista Ciencias Agropecuarias*, 6(2) 71- 82. <https://doi.org/10.36436/24223484.328>
- Liu, Y., Li, Y., Hua, X., Muller, K., Wang, H., Yang, T., Wang, Q., Peng, X., Wang, M., Pang, Y., Qi, J. y Yang, Y. (2018). Glyphosate application increased catabolic activity of gram-negative bacteria but impaired soil fungal community. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(15), 14762-14772. <https://n9.cl/fiwbak>
- Lupwayi, N. et al. (2004). Soil microbial biomass and diversity after herbicide application. *Can. J. Plant Sci.*, 677-685. <https://doi.org/10.4141/P03-121>
- Maqueda, C., Undabeytia, T., Villaverde, J. y Morillo, E. (2017). Behaviour of glyphosate in a reservoir and the surrounding agricultural soils. *Science of the Total Environment*, 593-594, 787-795. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28364613/>
- Myers, J. P., Antoniou, M. N., Blumberg, B., Carroll, L., Colborn, T., Everett, L. G., Hansen, M., Landrigan, P. J., Lanphear, B. P., Mesnage, R., Vandenberg, L. N., Vom Saal, F. S., Welshons, W. V. y Benbrook, C. M. (2016). Concerns over use of glyphosate-based herbicides and risks associated with exposures: A consensus statement. *Environmental Health: A Global Access Science Source*, 15(1). <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26883814/>
- Newman, M., Hoilett, N., Lorenz, N., Dick, R. P., Liles, M. R., Ramsier, C. y Kloepper, J. W. (2016). Glyphosate effects on soil rhizosphere-associated bacterial communities. *Science of the Total Environment*, 543, 155-160. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26580738/>
- Nguyen, D. B., Rose, M. T., Rose, T. J., Morris, S. G. y Van Zwieten, L. (2016). Impact of glyphosate on soil microbial biomass and respiration: A meta-analysis. *Soil Biology and Biochemistry*, 92, 50-57. <https://n9.cl/23uho>
- Nicolas, V., Oestreicher, N. y Velot, C. (2016). Multiple effects of a commercial Roundup® formulation on the soil filamentous fungus *Aspergillus nidulans* at low doses: Evidence of an unexpected impact on energetic metabolism. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(14), 14393-14404. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-016-6596-2>
- Oldham, J. y Massey, R. (2002) Health and Environmental Effects of Herbicide Spray Campaigns in Colombia. <https://n9.cl/811ac>
- Roa, J. (2014). *Coca: deforestación, contaminación y pobreza*. <https://n9.cl/6vvqi>
- Rodríguez Mantilla, C. J. (2020). *Uso del glifosato en cultivos agrícolas e ilícitos: impacto en la microbiota del suelo a medida que aumenta la tasa de aplicación*. Universidad de los Andes. <https://n9.cl/52z60>
- Schlatter, D. C., Yin, C., Hulbert, S., Burke, I. y Paulitz, T. (2017). Impacts of repeated glyphosate use on wheat-associated bacteria are small and depend on glyphosate use history. *Applied and Environmental Microbiology*, 83(22). <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5666137/>
- Solomon, K. et al. (2005). *Estudio de los efectos del programa de erradicación de cultivos ilícitos mediante la aspersión aérea con el herbicida glifosato (PECIG) y de los cultivos ilícitos en la salud humana y en el medio ambiente*. OEA. <https://scm.oas.org/pdfs/2007/CP17420-S.pdf>
- Tohge, T., Watanabe, M., Hoefgen, R. y Fernie, A. R. (2013). Shikimate and phenylalanine biosynthesis in the green lineage. *Frontiers in Plant Science*, 4. <https://n9.cl/w4re2e>
- Un informe MamaCoca - Indepaz. (2015). *Memoria histórica de las fumigaciones 1978-2015*. <https://n9.cl/xjrl1>
- UNODC. (2014). *Colombia: coca cultivation survey 2013*. <https://n9.cl/vhfil>

- UNODC. (2021). *Monitoreo de territorios afectados por cultivos ilícitos 2020*. <https://n9.cl/5vt7v>
- UNODC. (2023). *Monitoreo de los territorios con presencia de cultivos de coca 2022*. <https://n9.cl/yc56g>
- UNODC-SIMCI. (2023). Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito (UNODC) - Sistema Integrado de Monitoreo de Cultivos Ilícitos (SIMCI), *Monitoreo de los territorios con presencia de cultivos de coca 2022*. Bogotá.
- Van Bruggen, A. H. C., He, M. M., Shin, K., Mai, V., Jeong, K. C., Finckh, M. R. y Morris, J. G. (2018). Environmental and health effects of the herbicide glyphosate. *Science of the Total Environment*, 616-617, 255-268. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29117584/>
- Vázquez, M. B., Moreno, M. V., Amodeo, M. R. y Bianchinotti, M. V. (2021). Efecto del glifosato en las comunidades fúngicas del suelo: estudio de campo. *Revista Argentina de Microbiología*, 53(4), 349-358. <https://n9.cl/26mgrl>
- Zabaloy, M. C., Carne, I., Viassolo, R., Gómez, M. A. y Gómez, E. (2015). Soil ecotoxicity assessment of glyphosate use under field conditions: Microbial activity and community structure of Eubacteria and ammonia-oxidising bacteria. *Pest Management Science*, 72(4), 684-691. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25960311/>
- Zabaloy, M. C., Gómez, E., Garland, J. L. y Gómez, M. A. (2012). Assessment of microbial community function and structure in soil microcosms exposed to glyphosate. *Applied Soil Ecology*, 61, 333-339. <https://n9.cl/riag6>
- Zhan, H., Feng, Y., Fan, X. y Chen, S. (2018). Recent advances in glyphosate biodegradation. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 102(12), 5033-5043. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29705962/>
- Zhang, M., Wang, W., Tang, L., Heenan, M. y Xu, Z. (2018). Effects of nitrification inhibitor and herbicides on nitrification, nitrite, and nitrate consumptions and nitrous oxide emission in an Australian sugarcane soil. *Biology and Fertility of Soils*, 54, 697-706. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00374-018-1293-6>
- Zobiolo, L., Kremer, R. J., de Oliveira, R. S. Jr. y Constantin, J. (2012). Glyphosate effects on photosynthesis, nutrient accumulation, and nodulation in glyphosateresistant soybean. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 175(2), 319-330. <https://n9.cl/aditq>