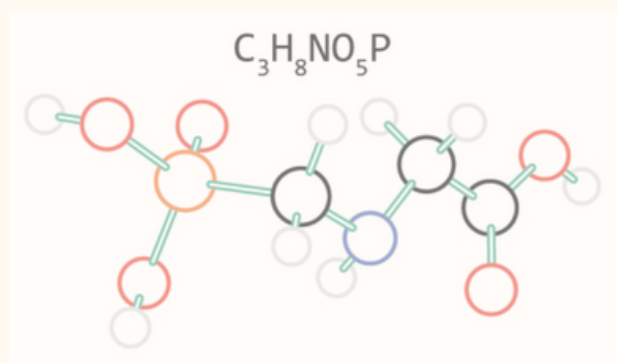


*Els límits planetaris, les entitats noves i la biodiversitat.
Una revisió sistemàtica del cas del glifosat*



Curs acadèmic 2024/25

*MÀSTER UNIVERSITARI EN CANVI AMBIENTAL I TRANSICIÓ
SOCIOECOLÒGICA*

TREBALL FINAL DE MÀSTER

Alumna

Anna Isabel Ferrer Moreso

ferrermoreso@gmail.com

Tutor

Josep Vila Subirós

 Universitat de Girona
Facultat de Ciències

Índex

Resum	1
Abstract	2
Agraïments	3
1. Introducció	4
2. Objectiu general	6
3. Objectius específics	6
4. Metodologia	7
4.1 Etapa 1: search	7
4.2 Etapa 2: appraisal	8
4.3 Etapa 3: synthesis	9
4.4 Etapa 4: analysis	10
5. Resultats	11
5.1 Etapa Search i Appraisal	11
5.2 Synthesis i Appraisal	12
6. Discussió	26
7. Conclusions	30
8. Bibliografia	33

Llistat de Taules

Taula 1. Anàlisi quinquennal de la producció científica sobre glifosat i biodiversitat.

Taula 2. Autors més productius de publicacions sobre glifosat i biodiversitat.

Taula 3. Classificació temàtica dels 191 articles inclosos en l'estudi.

Taula 4. Publicacions més citades per categoria temàtica.

Llistat de Figures

Figura 1. Diagrama de flux PRISMA que mostra el procés de selecció sistemàtica de literatura per a l'estudi. El procés va seguir la metodologia PRISMA i amb enfocament SALSA.

Figura 2. Gràfic de l'evolució temporal de les publicacions científiques des de l'any 1995 fins al 2025.

Figura 3. Revistes científiques amb més publicacions sobre glifosat i biodiversitat.

Figura 4. Top 10 dels països/regions amb més publicacions sobre glifosat i biodiversitat.

Figura 5. Mapa de la distribució de les publicacions sobre glifosat i biodiversitat.

Figura 6. Tipologia d'estudis de les publicacions sobre glifosat i biodiversitat segons l'anàlisi metodològica.

Figura 7. Diversitat d'organismes estudiats en les publicacions sobre glifosat i biodiversitat.

Figura 8. Diagrama de concurrència de paraules clau de les publicacions sobre glifosat i biodiversitat.

Figura 9. Mapa de densitat de paraules clau de les publicacions sobre glifosat i biodiversitat.

Figura 10. Mapa conceptual de les connexions entre el glifosat com a entitat nova i la transgressió del límit planetari d'integritat de la biosfera.

Resum

Aquest treball analitza la manera com es fusionen dos límits planetaris que ja han estat clarament superats: la Integritat de la Biosfera i les Entitats Noves¹. En aquest estudi, es va seleccionar el cas del glifosat com a cas paradigmàtic, un herbicida àmpliament utilitzat a escala global. En emprar la metodologia SALSA, es va aconseguir una revisió sistemàtica de 191 publicacions científiques, observant un notable creixement de les publicacions relacionades amb aquest tema, especialment a partir de l'any 2015, coincidint amb l'actualització del marc dels límits planetaris. Les troballes indiquen una àmplia concentració d'estudis a països de l'hemisferi nord com el Canàda i els USA, en canvi, els ecosistemes tropicals estan escassament representats. Des d'un punt de vista temàtic, el 45% dels estudis s'enfoquen als efectes sobre la biodiversitat, mentre que únicament un 3,7% vinculen directament el glifosat amb els límits planetaris. Addicionalment, s'observa un biaix metodològic cap a estudis de camp, i un enfocament taxonòmic en grups com ara flora i artròpodes. L'anàlisi conceptual de l'estudi identifica quatre vies principals d'impacte ambiental: els efectes sobre els pol·linitzadors, la toxicitat en ambients aquàtics, l'alteració de la microbiota del sòl i els danys sobre la vegetació no objectiu. Aquests impactes, sovint potenciat per efectes sinèrgics, generen retroalimentacions negatives que posen en risc la integritat de la biosfera. Tot plegat reforça la idea que el glifosat actua com una nova entitat capaç de desestabilitzar greument l'equilibri ecològic a escala global en impactar i disminuir la biodiversitat.

Paraules clau: integritat de la biosfera, entitats noves, límits planetaris, biodiversitat, glifosat.

¹ Entitats Noves: substàncies artificials o modificades per l'activitat humana que no existien prèviament a la biosfera i que poden causar efectes desconeguts o persistents sobre els ecosistemes i la salut (Steffen et al., 2015).

Abstract

This analysis focuses on the convergence of two planetary boundaries that have already been clearly exceeded: Biosphere Integrity and Novel Entities. Glyphosate was selected as a paradigmatic case for this study, given its widespread global use as an herbicide. Employing the SALSA methodology, a systematic review of 191 scientific publications was conducted, revealing notable growth in publications related to this topic, especially since 2015, which coincides with the update of the planetary boundaries framework. The findings indicate a strong concentration of studies in Northern Hemisphere countries, such as Canada and the USA, while tropical ecosystems are scarcely represented. From a thematic perspective, 45% of the studies focus on biodiversity effects, yet only a small percentage (just 3.7%) directly link glyphosate with the planetary boundaries framework. Additionally, there is a methodological bias towards field studies, with a taxonomic emphasis mainly on flora and arthropods. The conceptual analysis of the study identified four main pathways of environmental impact caused by glyphosate: effects on pollinators, toxicity in aquatic environments, alteration of soil microbiota, and damage to non-target vegetation. These impacts, often potentiated by synergistic effects, generate negative feedbacks that endanger biosphere integrity, reinforcing the conclusion that glyphosate acts as a novel entity capable of severely destabilizing global ecological balance by impacting and reducing biodiversity.

Keywords: biosphere integrity, novel entities, planetary boundaries, biodiversity, glyphosate

Agraïments

Voldria expressar el més sincer agraïment al meu tutor d'aquest treball final de màster, Josep Vila Subirós, per la seva guia experta i la qualitat dels seus consells al llarg de tot aquest treball, així com pel seu rigor i la seva disponibilitat constants, que m'han ajudat a millorar la qualitat de l'estudi i a donar forma i estructura a aquest projecte amb una mirada crítica i constructiva. També voldria reconèixer la tasca de Núria Roura Pascual, com a coordinadora d'estudis, per la seva dedicació i la seva paciència, que m'han proporcionat un guiatge valuós i clar en els moments decisius del procés.

Cal fer extensiu aquest reconeixement a altres professors del màster, com Maria Elena Roget Armengol, José Abel González Gutiérrez i Miquel Macias Arau, que sempre han tingut paraules d'ànim i m'han encoratjat a seguir endavant, i m'han ofert suport acadèmic valuós, especialment en l'àmbit de la física ambiental. A més, voldria expressar un agraïment molt personal a la meva tutora de pràctiques al Parlament de Catalunya, la lletrada Clara Marsans Raventós, que amb els seus consells m'ha ajudat a continuar creient en mi i en les meves capacitats per afrontar nous reptes.

Tanmateix, fer un reconeixement especial a la meva família, per la seva adaptació i la generositat amb què han acollit la meva il·lusió de continuar formant-me i aprenent.

Per últim, voldria agrair a la Universitat de Girona l'oportunitat d'haver pogut gaudir d'un marc formatiu que no només facilita la comprensió dels continguts, sinó que demostra un veritable compromís amb la inclusió i l'accessibilitat, permetent que estudiants de tot tipus i edats puguin continuar formant-se i enriquint-se acadèmicament en un entorn respectuós i obert.

1. Introducció

Durant les darreres dècades, l'activitat humana ha exercit una pressió mai vista abans sobre els ecosistemes naturals del planeta, cosa que ha motivat la comunitat científica a elaborar marcs conceptuals que permetin definir fins a quin punt podem actuar sense posar en risc l'estabilitat del planeta: els límits planetaris (Folke, 2013; Gómez-Lee, 20). El concepte, introduït per Rockström et al. (2009) i actualitzat per Steffen et al. (2015), que reconeix nous processos biofísics crítics per tal preservar l'equilibri de la terra. Dins aquests nou límits establerts pel Stockholm Resilience Centre, dos han estat sobrepassats de manera alarmant: la integritat de la biosfera i les entitats noves. La transgressió d'aquests límits suposa una amenaça important per a la persistència dels ecosistemes globals i la sostenibilitat de la vida al planeta tal com la coneixem (Richardson et al., 2023).

La pèrdua accelerada de biodiversitat, mesurada a través del límit d'Integritat de la Biosfera, representa un dels majors reptes ambientals actuals més grans. Aquest límit avalua tant la diversitat genètica com la funcionalitat dels ecosistemes, tots dos aspectes fonamentals per a la resiliència de l'ambient davant de pertorbacions, causades principalment actualment per l'home (Steffen et al., 2015). Paral·lelament, en les darreres dècades la introducció massiva de compostos sintètics al medi ambient, categoritzats dins del límit d'Entitats Noves, crea preguntes sobre els efectes acumulatius i sinèrgics d'aquestes substàncies en els sistemes ecològics. Tota aquesta problemàtica, de caràcter global, necessita una visió integrada com One Health², on no només importi la salut dels éssers humans, sinó també la de la vida silvestre i del medi ambient en general, com a unitats d'una mateixa estructura global. Segons Persson et al. (2022), la producció i l'alliberament de substàncies químiques sintètiques han sobrepassat la capacitat que es tenen d'avaluació i gestió dels seus impactes i han provocat una transgressió d'aquest límit planetari. Atesa la interacció complexa entre els dos límits d'interès, cal una anàlisi

² One Health: enfocament integrat que reconeix la interdependència entre la salut humana, animal i ambiental per desenvolupar polítiques sostenibles i coordinades (OMS).

interdisciplinària que permeti comprendre les dinàmiques de retroalimentació que n'incrementen els efectes.

El glifosat, l'herbicida d'ampli espectre i el més utilitzat a nivell mundial, destaca com a cas paradigmàtic per examinar la confluència entre els dos límits planetaris esmentats anteriorment. Aquest compost sintètic, present en més de 2000 productes herbicides comercials de consum massiu (Klátyik et al., 2023), ha estat classificat com a potencialment cancerigen per l'Agència Internacional per a la Recerca sobre el Càncer (IARC) i el seu ús es troba restringit a diversos països, inclòs Mèxic, que n'ha decretat la prohibició a partir del gener del 2024 (González-Moscoso et al., 2023). Més enllà dels seus efectes sobre la salut humana, diverses investigacions han registrat efectes negatius en la vida silvestre, incloent-hi plantes, microorganismes del sòl, insectes pol·linitzadors, aranyes, cucs de terra, amfibis, rèptils i mamífers (Klátyik et al., 2023). Aquests conseqüències ecotoxicològiques constitueixen un perill directe per a la integritat de la biosfera, evidenciant la connexió entre tots dos límits planetaris objecte d'aquest estudi.

Aquesta recerca cerca analitzar i explorar sistemàticament l'enllaçant entre la Integritat de la Biosfera i les Entitats Noves, utilitzant el glifosat com a cas d'estudi. A través d'una revisió bibliogràfica fonamentada en l'enfocament SALSA³ (Search, Appraisal, Synthesis, Analysis), s'examina la literatura científica existent sobre els processos a través dels quals el glifosat i les seves diferents formulacions comercials impacten la biodiversitat en diferents graus. En general, les troballes científiques assenyalen que els efectes ecològics del glifosat s'estenen molt més enllà de la seva acció herbicida previst, provocant fins i tot conseqüències directes a l'ADN i en el funcionament a nivell fisiològic de les espècies que s'han investigat (Richmond, 2018; Klátyik et al., 2023).

Per tant, l'anàlisi integrada d'aquests dos límits planetaris i de les seves interaccions és fonamental per informar als responsables de les polítiques públiques orientades a restaurar

³ SALSA: acrònim de Search, Appraisal, Synthesis i Analysis; mètode estructurat per a revisions bibliogràfiques sistemàtiques.

aquests processos biofísics a nivells segurs. En concret, aquesta investigació ha explorat una base de dades depurada amb 191 articles científics, on es s'han identificat patrons temporals, geogràfics, temàtics i disciplinaris en l'estudi d'aquesta problemàtica.

En aquest context, aquest estudi busca aportar a una entesa integral de les amenaces i els impactes en la biodiversitat generades per l'aplicació d'entitats noves com el glifosat. Aquesta contribució es duu a terme oferint un conjunt robust de proves científiques sòlides que recolzin i guïin la presa de decisions en temes de regulació ambiental i de transició cap a pràctiques d'agricultura més sostenibles i compatibles amb la conservació dels ecosistemes naturals.

2. Objectiu general

Analitzar com la interacció entre el límit de la integritat de la biosfera i les entitats noves afecta la biodiversitat, a través d'una revisió bibliogràfica sistemàtica prenent com a referència el cas del Glifosat.

3. Objectius específics

- Examinar com es calculen i s'avaluen els límits planetaris de *Biosphere Integrity* i *Novel Entities*.
- Identificar les dinàmiques de retroalimentació entre aquests límits.
- Elaborar un estat de la qüestió a partir d'una recerca bibliogràfica sistemàtica sobre el cas del glifosat com a cas paradigmàtic amb una gran repercussió a escala global i també en el nostre àmbit geogràfic.
- Presentar i valorar les alternatives pràctiques i polítiques de conservació basades en evidència científica que intenten tornar aquests dos límits planetaris a nivells segurs prenent també com a exemple el glifosat.

4. Metodologia

La investigació consisteix en una revisió sistemàtica de literatura científica, estructurada i realitzada a partir de l'enfocament o metodologia SALSA (Search, Appraisal, Synthesis, Analysis), que permet examinar críticament la literatura científica disponible sobre un tema específic i construir una visió descriptiva, estructurada i analítica del conjunt de dades obtingut (Grant & Booth, 2009; Booth et al., 2021). Per tal d'abordar les diferents interaccions que hi hagi entre el glifosat i els límits planetaris, es va emprar particularment els límits d'integritat de la biosfera (*Biosphere Integrity*) i entitats noves (*Novel Entities*), i els seus impactes a la biodiversitat.

4.1 Etapa 1: search

Per identificar literatura científica rellevant o d'interès per al present estudi, es van fer cerques sistemàtiques a dues bases de dades acadèmiques d'alta qualitat: **Scopus (Elsevier)** i **Web of Science (Clarivate Analytics)**, reconegudes per la seva cobertura internacional i rigorosos estàndards d'indexació.

Estratègia de cerca:

Es va dissenyar una equació de cerca integral que abastés simultàniament els conceptes clau dels límits planetaris i el glifosat:

("Biosphere Integrity" OR "Novel Entities" OR "Planetary Boundaries" OR Biodiversity)
AND "glyphosate")

Es van provar prèviament altres combinacions o equacions amb termes i operadors booleans (aparellant els altres termes individualment amb glyphosate), però es va optar per una estratègia consolidada donada la baixa quantitat de resultats en cerques individuals per cada parells de conceptes.

- Criteris i filtres de cerca:

Tot i que la proposta no estableix explícitament una restricció temporal, es va optar per una estratègia de doble filtre en etapes posteriors (Appraisal), mantenint inicialment les cerques sense restricció de dates, per assegurar la recuperació de literatura històrica i seminal. Tot i això, es prioritzaran en l'avaluació els estudis publicats a partir de l'any 2009 (data de la publicació del primer marc de límits planetaris per Rockström et al.).

Idioma: es van incorporar publicacions en anglès i espanyol, encara que la majoria dels resultats rellevants es van trobar en anglès.

Tipus de document: es van incloure publicacions científiques avaluades per parells, informes tècnics i revisions sistemàtiques. Es van excloure comunicacions curtes, editorials i abstracts de congressos.

Disciplina: es van escollir àrees temàtiques relacionades a les ciències ambientals, ecologia, toxicologia, biodiversitat, bioquímica i sostenibilitat. Les que inclouen: Environmental Science, Agricultural and Biological Sciences, Pharmacology, Toxicology, Pharmaceutics, Earth and Planetary Sciences, Biochemistry, Genetics and Molecular Biology, Multidisciplinary, Veterinary, Chemistry.

4.2 Etapa 2: appraisal

En aquesta etapa, es va dur a terme un procediment d'avaluació sistemàtica per filtrar els articles identificats a l'etapa prèvia. Per garantir la transparència i la replicabilitat en el procés de selecció d'estudis, es va aplicar la metodologia PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta- analyses), la qual facilita l'organització i documentació de les diferents fases del procés d'avaluació: identificació, cribatge, elegibilitat i inclusió (Page et al., 2021).

1. **Eliminació de duplicats:** es van consolidar els resultats descarregats de les dues bases de dades, eliminant articles repetits a Mendeley.
2. **Preselecció per títol i resum:** es van descartar estudis sense relació evident amb la pregunta de recerca, en fer lectura tant dels títols com dels resums de cada article.

- 3. Criteris d'inclusió:** els criteris d'inclusió d'articles van ser els següents: i) Articles revisats per parts, ii) En idioma anglès i espanyol, iv) Enfocats en *glyphosate*, i la seva relació amb *biodiversity*, *novel entities*, *planetary boundaries* o *biosphere integrity*.
- 4. Criteris d'exclusió:** els criteris d'exclusió d'articles van ser els següents: i) Documents només tècnics o no científics (resums de conferències, editorials, notes); ii) Investigacions netament moleculars sense lligam clar amb biodiversitat ni límits planetaris; iii) Documents sense anàlisi d'impacte ecològic o de polítiques ambientals.

4.3 Etapa 3: synthesis

Extracció de metadades: es van extreure i organitzar les metadades dels articles seleccionats a les etapes anteriors: any de publicació, país, revista científica, autors principals, paraules clau, nombre de cites, tipus d'estudi, espècies o grups de flora i fauna avaluats.

Anàlisi bibliomètrica descriptiva: es van elaborar taules i gràfics per representar: evolució temporal de publicacions, distribució geogràfica (per país), revistes científiques més rellevants, autors més productius i citats, coocurrència de paraules clau. Es va fer servir Excel per a l'anàlisi descriptiva, i VOSviewer per a la generació de mapes de densitat i xarxes de concurrència de paraules clau.

Classificació temàtica: mitjançant la revisió de títols resums i paraules clau, es van codificar els articles en categories temàtiques, alineades amb els objectius de recerca:

- Estudis sobre límits planetaris i *novel entities*.
- Avaluació toxicològica i eco toxicològica del glifosat.
- Impactes del glifosat a la biodiversitat.
- Avaluacions integrades i enfocaments sistèmics.
- Perspectives polítiques i reguladores de l'ús del glifosat.

Organització de la informació per al seu anàlisi posterior: es va organitzar la informació per posteriorment elaborar gràfics i taules per tal d'analitzar la temporalitat dels articles, els

països de publicació, les principals revistes de publicació i els autors més esmentats. Aquesta sistematització va facilitar la transició cap a la fase d'anàlisi crítica.

4.4 Etapa 4: analysis

Connexió amb marcs conceptuals: es van analitzar les categories temàtiques en relació amb els conceptes de:

- Transgressió dels límits planetaris.
- Integritat de la biosfera, com a sosteniment funcional de la diversitat biològica.
- Entitats noves, com a classe que inclou compostos sintètics com el glifosat.

Avaluació de la qualitat i enfocament de l'evidència: es van discutir aspectes com:

- Escales espacials abordades.
- Mètodes predominants (bioassaig, modelització, revisions sistemàtiques, etc.)
- Diversitat d'organismes i ecosistemes avaluats.
- Grau d'integració entre ciència ecològica i enfocament de límits planetaris.

Línies d'anàlisi abordades: s'han identificat articles que vinculen explícitament el glifosat amb les dimensions de *Novel Entities* i *Biosphere Integrity*; i es van identificar buits crítics de recerca (àrees poc estudiades, com a zones tropicals). Això es va realitzar classificant els estudis per tipus de metodologia (bioassaig, estudis de camp, modelat, revisions), i identificant biaixos als grups taxonòmics i a les zones geogràfiques avaluades.

Implicacions per a la sostenibilitat i la governança ambiental: a partir de l'anàlisi, es van discutir possibles alternatives pràctiques i regulatòries, destacant exemples de bones pràctiques i polítiques públiques basades en evidències, orientades a reduir l'ús de glifosat i a mitigar-ne els impactes.

Addicionalment, es van emprar eines basades en IA no generativa, com LanguageTool i DeepL, per a la revisió lingüística i la traducció de fragments, amb l'objectiu de garantir la claredat, la precisió i coherència del text final.

5. Resultats

5.1 Etapa Search i Appraisal

El procés de cerca va produir un total de 341 article únics després de l'eliminació de duplicats entre Scopus i Web of Science. Aquests van ser organitzats en un full de càlcul que va incloure metadades com a títol, autors, any de publicació, revista, tipus de document, paraules clau i DOI (Veure Annex: *Resultats_Search*).

Posteriorment, després d'aplicar els filtres d'inclusió i exclusió, descrits a la metodologia, es va obtenir una base de dades depurada amb 191 articles considerats rellevants per als objectius de l'estudi. Aquesta col·lecció constitueix la mostra final sobre la qual es van executar les etapes de Synthesis i Analysis (Figura 1, Vegeu annex: *Resultats_Appraisal*).

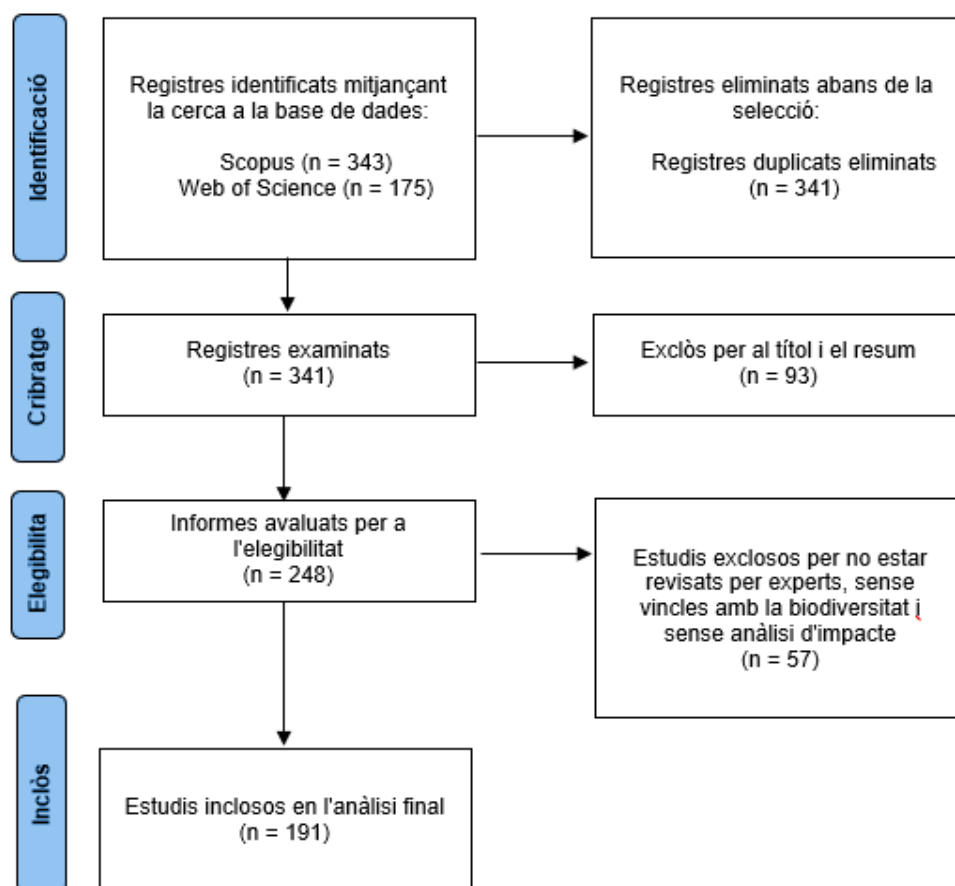


Figura 1. Diagrama de flux PRISMA que mostra el procés de selecció sistemàtica de literatura per a l'estudi. El procés va seguir la metodologia PRISMA i amb enfocament SALSA. **Font.** Elaboració pròpia.

5.2 Synthesis i Appraisal

L'anàlisi temporal de les publicacions revela una tendència clarament ascendent a la producció científica relacionada amb el tema d'estudi (Figura 2). Durant els primers 10 anys (1995-2004), la producció va ser extremadament limitada amb només 11 publicacions representant només el 6% del total (Taula 1). Tot i això, a partir del 2005 s'observa un creixement sostingut que s'accelera progressivament.

El quinquenni 2005-2009 va marcar l'inici d'un interès més sistemàtic amb 21 publicacions (11% del total), seguit per un període de consolidació entre 2010-2014 amb 25 treballs (13%). El veritable ascens va començar el quinquenni 2015-2019, on es va duplicar la producció aconseguint 48 publicacions (25% del total). Aquest creixement va culminar en el període més recent (2020-2025) amb 86 publicacions, representant gairebé la meitat de tota la producció científica acumulada fins a l'actualitat (45%, Taula 1).

Taula 1. Anàlisi quinquennal de la producció científica sobre glifosat i biodiversitat. Es presenta la distribució per rangs d'anys, incloent-hi el nombre total de publicacions i el percentatge respecte del corpus total.

Períodes Quinquennals			
Quinquenni	Anys	Total Publicacions	% del total
1	1995-1999	3	2%
2	2000-2004	8	4%
3	2005-2009	21	11%
4	2010-2014	25	13%
5	2015-2019	48	25%
6	2020-2025	86	45%

Font. Elaboració pròpia.

Tot i aquesta tendència general creixent, s'identifiquen algunes fluctuacions notables. L'any 2022 presenta una caiguda significativa amb només 8 publicacions, interrompent la tendència creixent que havia aconseguit el seu pic el 2021 amb 18 treballs i posteriorment el 2023 amb 22 publicacions (Figura 2). Aquesta variabilitat suggereix que factors externs,

possiblement relacionats amb cicles de finançament, prioritats de recerca o esdeveniments globals com ara la pandèmia, poden influir en la productivitat científica de l'àrea. Les dades del 2025, encara que parcials, mostren 7 publicacions, que podria indicar una estabilització en nivells alts de producció si es projecta l'any complet.

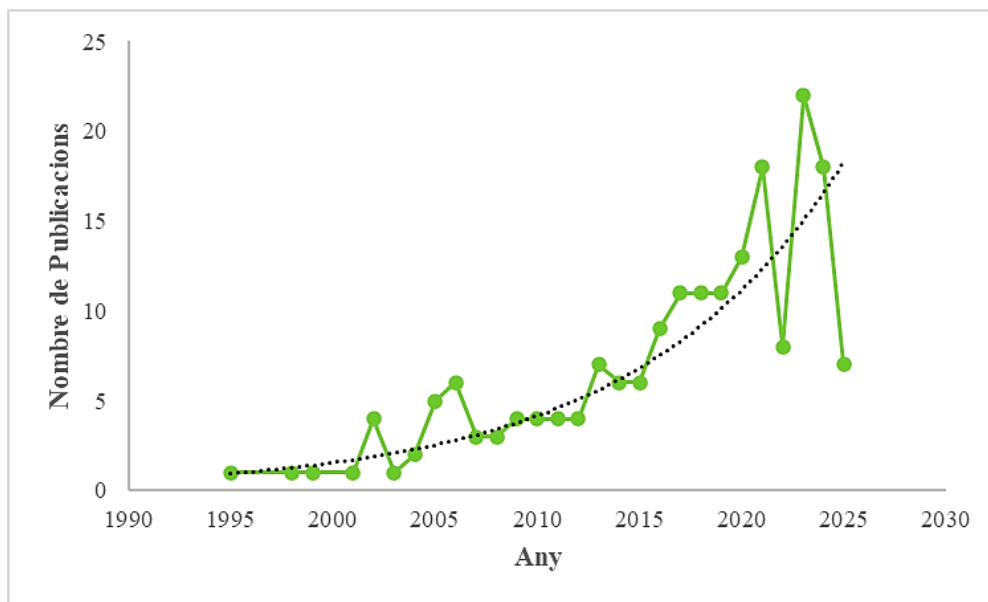


Figura 2. Gràfic de l'evolució temporal de les publicacions científiques des de l'any 1995 fins al 2025.

Font. Elaboració pròpia

D'altra banda, l'anàlisi de les revistes científiques revela una concentració significativa de les publicacions sobre glifosat i biodiversitat en un nombre relativament petit de revistes especialitzades. Les 15 revistes identificades a la Figura 3, representen aquelles amb major nombre de publicacions, concentren en conjunt el 29.8% (57 publicacions) del total de treballs analitzats a l'estudi, mentre que les altres revistes presenten com a màxim 1 o 2 publicacions cadascuna. Aquesta distribució indica una notable dispersió de la literatura científica al camp, d'on les revistes líders "Science of the Total Environment" i "Environmental Toxicology and Chemistry" amb 7 treballs cadascuna, seguides per "Forest Ecology and Management" amb 5 publicacions, i "Agriculture, Ecosystems and Environment" juntament amb "Chemosphere" amb 4 publicacions cadascuna. La concentració temàtica s'orienta, principalment, cap a les ciències ambientals,

l'ecotoxicologia i la gestió forestal, reflectint la naturalesa interdisciplinària de la investigació sobre els efectes del glifosat als límits planetaris d'integritat de la biosfera i noves entitats.

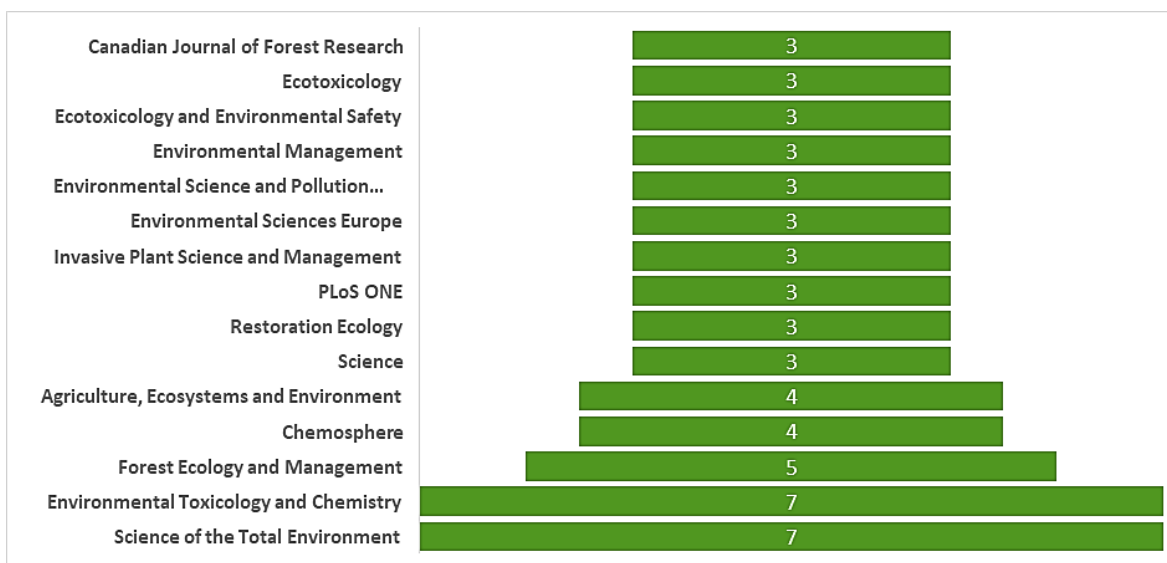


Figura 3. Revistes científiques amb més publicacions sobre glifosat i biodiversitat.

Font. Elaboració pròpia.

Pel que fa a la productivitat per autor, l'anàlisi revela una característica distintiva del camp de recerca sobre glifosat i biodiversitat. Dels 952 autors identificats al corpus total de publicacions, únicament 7 investigadors (els mostrats a la Taula 2) van presentar més de dues publicacions, constituint-se com els més productius en aquesta àrea específica de recerca que connecta les entitats noves amb la integritat de la biosfera. Els autors més prolífics inclouen Strandberg i Costa, amb 4 publicacions cadascun, seguits per Zhang, Jacobo, Relyea, Colbach i Damgaard, amb 3 publicacions cadascun. La distribució assenyala que el 99,3% dels autors fan aportacions ocasionals a l'àrea, mentre que menys de 1% manté una trajectòria de recerca constant, cosa que indica que la investigació sobre els efectes del glifosat als límits planetaris encara està en un procés de formalització com a àrea d'especialització científica. Els autors més destacats aborden diversos temes que es complementen entre ells: control biològic i biodiversitat aquàtica, pastures i serveis

ecosistèmics, comunitats de vegetació i biodiversitat funcional, ecotoxicologia d'amfibis, sistemes agrícoles, dinàmica de comunitats vegetals i bioindicadors vegetals (Taula 2).

La correspondència entre els autors més productius i les revistes principals és parcial però significativa. Una gran quantitat del científic més destacats publiquen a les revistes identificades com a centrals del camp, particularment a “Environmental Toxicology and Chemistry”, “Agriculture, Ecosystems and Environment” i “Environmental Science and Pollution Research”. No obstant això, no es nota una cooperació clara entre els autors més productius, cosa que indica que el camp es distingeix per grups de recerca independents que tracten aspectes complementaris de la temàtica principal. Aquesta organització de la recerca disperses, però temàticament consistent, manifesta la naturalesa interdisciplinària de l'àrea d'estudi, on s'entrellacen l'ecologia, la toxicologia ambiental, l'agricultura sostenible i la conservació de la biodiversitat.

Taula 2. Autors més productius de publicacions sobre glifosat i biodiversitat.

Autors	Nombre de Publicacions	Temàtica	Revista
Zhang, I.	3	Control biològic, agroquímics i biodiversitat aquàtica	Biological Control, Environmental Science and Pollution Research
Jacobo, EX	3	Pastures, glifosat, serveis ecosistèmics i diversitat vegetal	Phyton, Agriculture Ecosystems and Environment, Applied Vegetation Science
Strandberg, B.	4	Glifosat, comunitats vegetals, biodiversitat funcional i agrícola	Environmental Toxicology and Chemistry, Ecological Applications
Relyea, RA	3	Ecotoxicologia, herbicides, biodiversitat aquàtica, amfibis	Environmental Toxicology and Chemistry, Ecological Applications
Colbach, N.	3	Sistemes agrícoles, simulació, biodiversitat i maneig de males herbes	Agriculture Ecosystems & Environment, Agricultural Systems

Damgaard, C.	3	Herbicides, dinàmica de comunitats vegetals ecologia funcional	Environmental Pollution, Agriculture Ecosystems and Environment
Costa, AC	4	Bioindicadors vegetals, glifosat, ecotoxicologia vegetal	Ecological Indicators, Revista Árvore, Brazilian Journal of Biology

Font. Elaboració pròpia.

L'anàlisi geogràfica mostra una notable concentració d'estudis a països de l'hemisferi nord, especialment a Amèrica, amb els Estats Units (USA) liderant amb 39 publicacions, ia continuació Canàda (19), Argentina (15) i Brasil (13) (Figura 4 i 5). Aquesta distribució geogràfica demostra tant les habilitats de recerca d'aquests països com la importància del glifosat en els sistemes d'agricultura. Es destaca la limitada representació de regions tropicals i del continent asiàtic, on països com Tailàndia, Indonèsia, l'Índia i el Japó presenten entre 1 i 2 publicacions cadascun, cosa que assenyala una notable disparitat en la comprensió de les repercussions del glifosat en ecosistemes tropicals i subtropicals (Figura 5). Europa presenta una implicació moderada encapçalada per França (8), Espanya (6) i Alemanya (5) (Figura 4), mentre que països africans com Nigèria, Algèria i Kenya aporten només amb 1 publicació cadascun, cosa que demostra l'escassa investigació en ecosistemes africans on la utilització d'herbicides està en creixement. És important destacar que només es presenten 8 publicacions a nivell mundial, cosa que subratlla la necessitat de dur a terme més investigacions a escala global per incorporar diversos efectes i processos relacionats amb la utilització del glifosat.

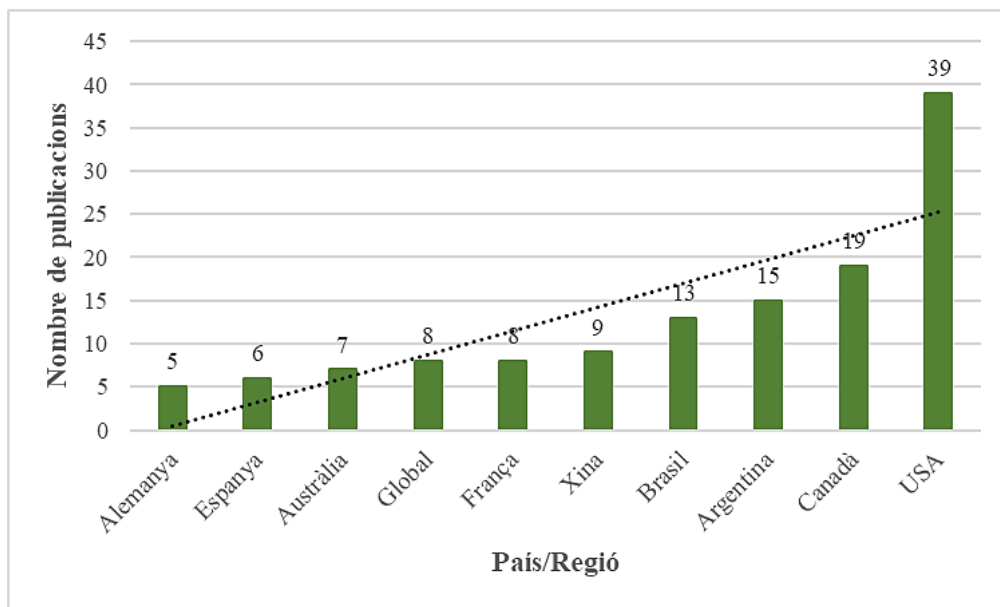


Figura 4. Top 10 dels països/regions amb més publicacions sobre glifosat i biodiversitat.

Font. Elaboració pròpia.

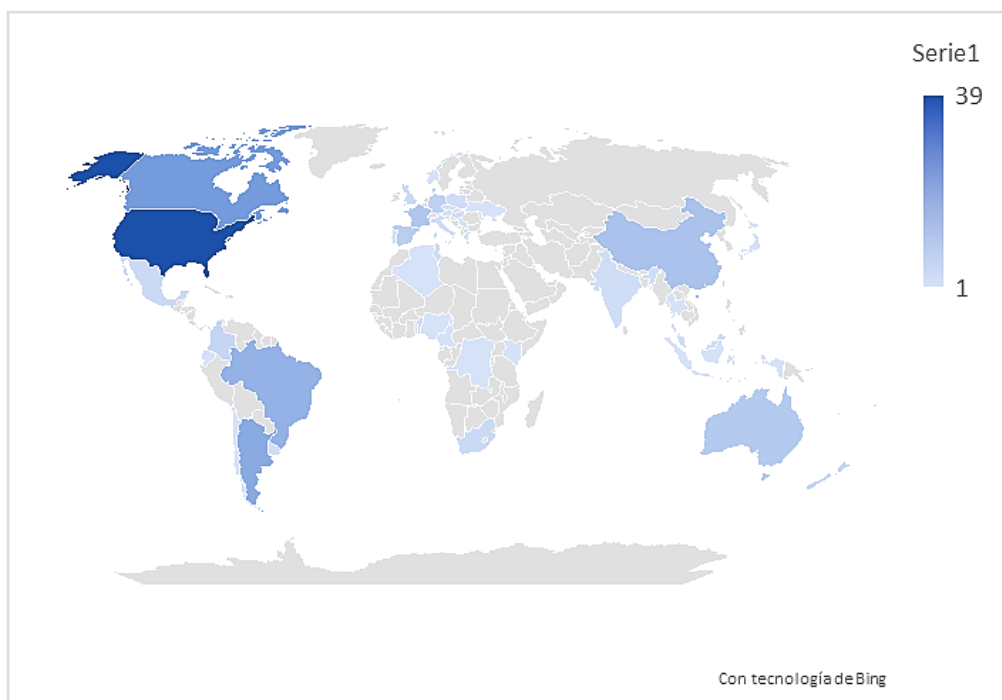


Figura 5. Mapa de la distribució de les publicacions sobre glifosat i biodiversitat.

Font. Elaboració pròpia, a partir de Bing.

La classificació temàtica dels 191 articles avaluats mostra cinc categories fonamentals que representen diferents punts de vista en l'anàlisi de la connexió entre el glifosat i la biodiversitat. El camp està clarament dominat per la categoria “Impactes en biodiversitat” amb 86 publicacions (45,03%), centrant-se en estudis sobre impactes en fauna i flora, seguida per “Enfocaments sistèmics i integrats” amb 61 treballs (31,94%) que tracten estudis multidisciplinaris (Taula 3). La “Toxicologia i ecotoxicologia” compta amb 36 publicacions (18,85%) centrades en investigacions de dosi-resposta i mecanismes, mentre que “Límits planetaris i entitats noves” només posseeix 7 estudis (3,66%) que adopten perspectives teòric-conceptuals. La categoria menys desenvolupada és “Polítiques i regulació” amb només 1 publicació (0,52%), cosa que assenyala una notable falta en l'estudi de regulacions i en la valoració crítica de les polítiques públiques vinculades a l'ús i la limitació del glifosat (vegeu Taula 3).

Taula 3. Classificació temàtica dels 191 articles inclosos en l'estudi.

Categories	Enfocament	Nombre de publicacions	Percentatge
Impactes en biodiversitat	Estudis sobre efectes en fauna/flora	86	45,03
Toxicologia i ecotoxicologia	Estudis de dosi-resposta, mecanismes	36	18,85
Límits planetaris i novel entitats	Estudis teóricoconceptuals	7	3,66
Polítiques i regulació	Anàlisi de normatives, prohibicions	1	0,52
Enfocaments sistèmics i integrats	Estudis multidisciplinaris	61	31,94

Font. Elaboració pròpia.

Els articles més citats per categoria temàtica revelen treballs seminals que han definit la recerca en cada àrea. En “Impactes en biodiversitat”, l’estudi més influent és *“The impact of insecticides and herbicides on the biodiversity and productivity of aquatic communities”* amb 481 cites, seguit per treballs sobre control de plantes invasores (261 cites) i efectes en abelles (175 cites) (Taula 4). En “Toxicologia i ecotoxicologia”, destaca *“The toxicity of roundup original max” to 13 species of larval amphibians”* amb 251 cites, mentre que en “Límits planetaris i entitats noves”, el treball més citat assolix 409 cites amb *“The impact of human activities and lifestyles on the interlinked microbiota and health of humans and of ecosystems”*. L’única publicació en “Polítiques i regulació” té 50 cites, i en “Enfocaments sistèmics i integrats” sobresurt *“Controlling invasive plant species in ecological restoration: A global review”* amb 391 cites (Taula 4).

Taula 4. Publicacions més citades per categoria temàtica.

Categoria	Publicacions més citades per categoria	Nombre de Cites
Impactes en biodiversitat	The impact of insecticides and herbicides on the biodiversity and productivity of aquatic communities	481
	Common reed Phragmites australis: Control and effects upon biodiversity in freshwater nontidal wetlands	261
	The Herbicide Glyphosate Negatively Affects Midgut Bacterial Communities and Survival of Honey Bee during Larvae Reared in Vitro	175
Toxicologia i ecotoxicologia	The toxicity of roundup original max to 13 species of larval amphibians	251
	Pesticides are the dominant stressors for vulnerable insects in lowland streams	204

	Growth and survival of five amphibian species exposed to combinations of pesticides	194
Límits planetaris i novel entitats	The impact of human activities and lifestyles on the interlinked microbiota and health of humans and of ecosystems	409
	A comprehensive review on environmental and human health impacts of chemical pesticide usage	127
Polítiques i regulació	Support Austria's glyphosate ban	50
Enfocaments sistèmics i integrats	Controlling invasive plant species in ecological restoration: A global review	391
	Managing tree-of-heaven (<i>Ailanthus altissima</i>) in parks and protected areas: A case study of Rondeau Provincial Park (Ontario, Canada)	88
	Herbicides, weeds and endangered species: Management of bitou bush (<i>Chrysanthemoides monilifera</i> ssp. <i>rotundata</i>) with glyphosate and impacts on the endangered shrub, <i>Pimelea spicata</i>	78

Font. Elaboració pròpia.

Per la seva banda, l'anàlisi metodològica demostra un predomini clar dels estudis de camp, que representen 119 publicacions (62,30%), reflectint la preferència per investigacions en condicions naturals per avaluar els efectes del glifosat sobre la biodiversitat (Figura 6). Els bioassaigs de laboratori constitueixen la segona metodologia més emprada amb 39 estudis (20,42%), permetent condicions controlades per establir relacions causa-efecte. Les revisions sistemàtiques representen 19 treballs (9,95%), indicant esforços per sintetitzar el coneixement acumulat, mentre que la modelització ecològica està menys desenvolupada amb només 10 publicacions (5,24%). Els estudis mixtos i altres metodologies representen

una proporció mínima (4 publicacions, 2,09%), suggerint oportunitats per a enfocaments metodològics més innovadors (Figura 6).

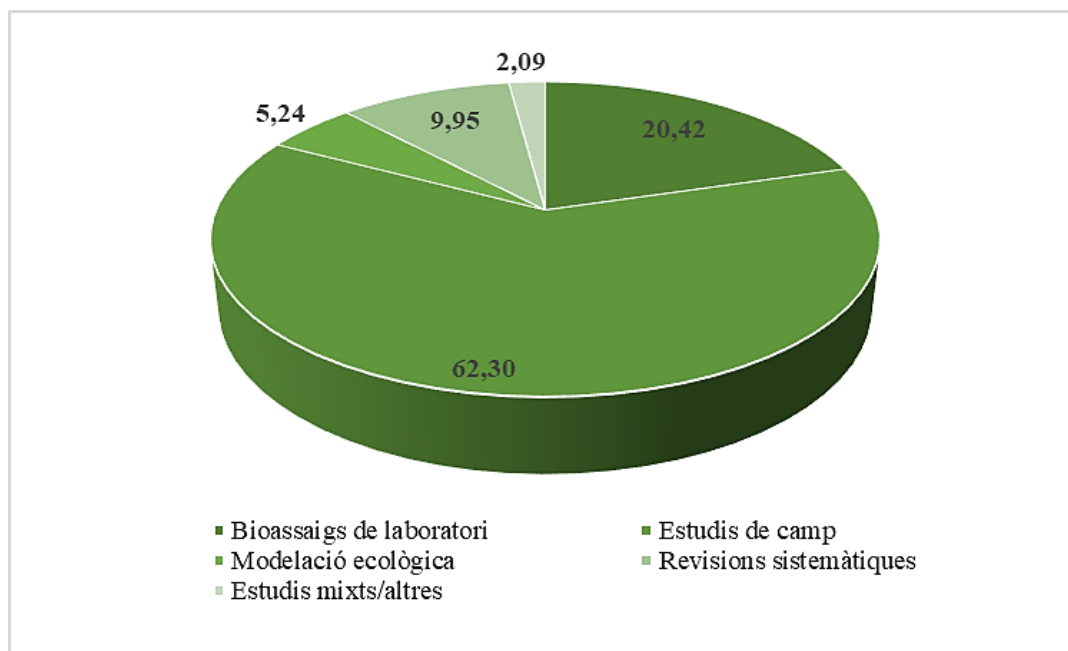


Figura 6. Tipologia d'estudis de les publicacions sobre glifosat i biodiversitat segons l'anàlisi metodològica (les dades mostren el % respecte el total d'articles analitzats).

Font : Elaboració pròpia.

La diversitat d'organismes estudiats reflecteix un biaix marcat cap a certs grups taxonòmics, amb la flora representant el 41.4% dels estudis (79 publicacions), seguida per artròpodes (32 publicacions, 16.8%) i estudis ambientals generals (24 publicacions, 12.6%) (Figura 7). Els amfibis, grup particularment sensible a contaminants, apareixen en 17 estudis (8.9%), mentre que l'agricultura com a sistema integral s'aborda en 13 treballs (6.8%). Altres grups com rèptils (9 estudis), bacteris (5), mamífers i nematodes (3 cadascun) reben menor atenció (Figura 7). Resulta notable l'escassa representació de grups com anèl·lids, fongs, microbiota i zooplàncton (1 publicació cadascun), així com aus, invertebrats, macro invertebrats, mol·luscos i peixos (2 publicacions cadascun), suggerint importants buits en el coneixement sobre els efectes del glifosat en aquests components de la biodiversitat (Figura 7).

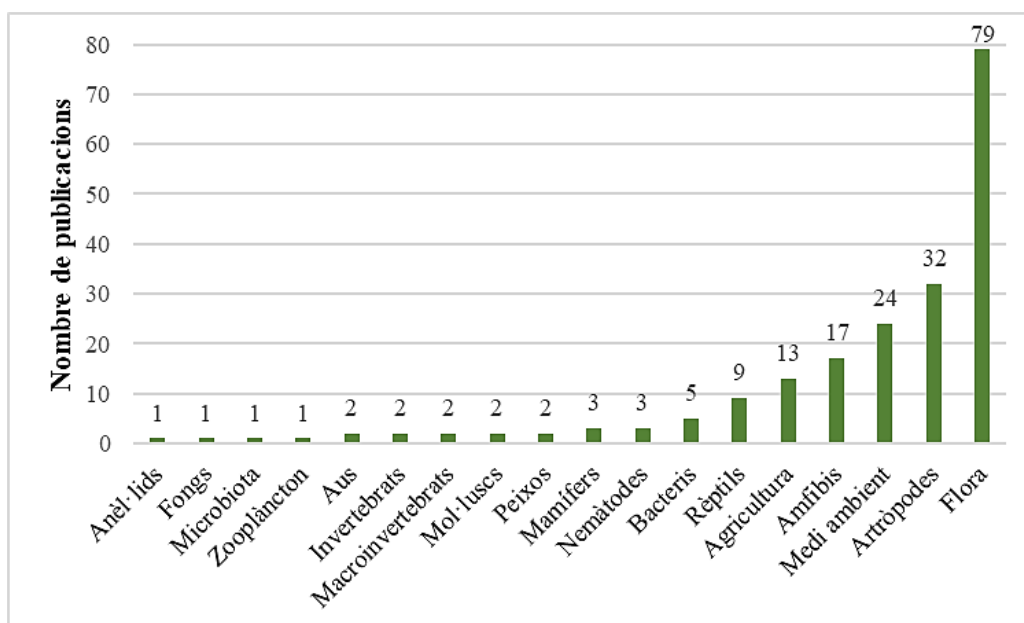


Figura 7. Diversitat d'organismes estudiats en les publicacions sobre glifosat i biodiversitat.

Font. Elaboració pròpia.

L'anàlisi bibliomètrica efectuada a través de VOSviewer va generar dues il·lustracions complementàries que faciliten la comprensió de les relacions temàtiques en la literatura científica sobre glifosat i biodiversitat (Figura 8 i 9). Al mapa de densitat s'identifiquen àrees de gran concentració semàntica al voltant de paraules clau com “glyphosate”, “biodiversity” i “herbicide”, indicant-ne la seva rellevància temàtica i la seva elevada incidència d'ocurrència (Figura 9). Aquestes paraules no només presenten un increment en la densitat visual, sinó també elevats valors de concurrència: glyphosate (110 ocurrences, força total d'enllaç 1053), biodiversity (85 ocurrences, força d'enllaç 1016) i, herbicide (67 ocurrences, força d'enllaç 725), totes agrupades al clúster 1, sent el clúster més dens i destacat (Figura 8). La visualització de nodes ressalta l'organització temàtica en diferents clústers, i el clúster 1 és el més dens i prominent, relacionat amb impactes ecològics, diversitat d'espècies i control químic de males herbes. Paraules com “herbicides”, “species

diversity” i “weed control” també pertanyen a aquest grup i en reforcen la coherència temàtica. Altres nodes rellevants, encara que menys centrals, com ara *ecosystems* (clúster 4) i *environmental monitoring* (clúster 4), indiquen connexions amb estudis de seguiment ambiental i efectes ecosistèmics del glifosat. Aquestes visualitzacions permeten evidències no només la forta associació del glifosat amb la pèrdua de biodiversitat i l'ús d'herbicides, sinó també la connexió amb processos de monitoratge ambiental i avaluació d'impactes a nivell d'ecosistemes, reflectint la complexitat de les interaccions entre aquesta entitat nova i integritat de la biosfera en el context dels límits planetaris.

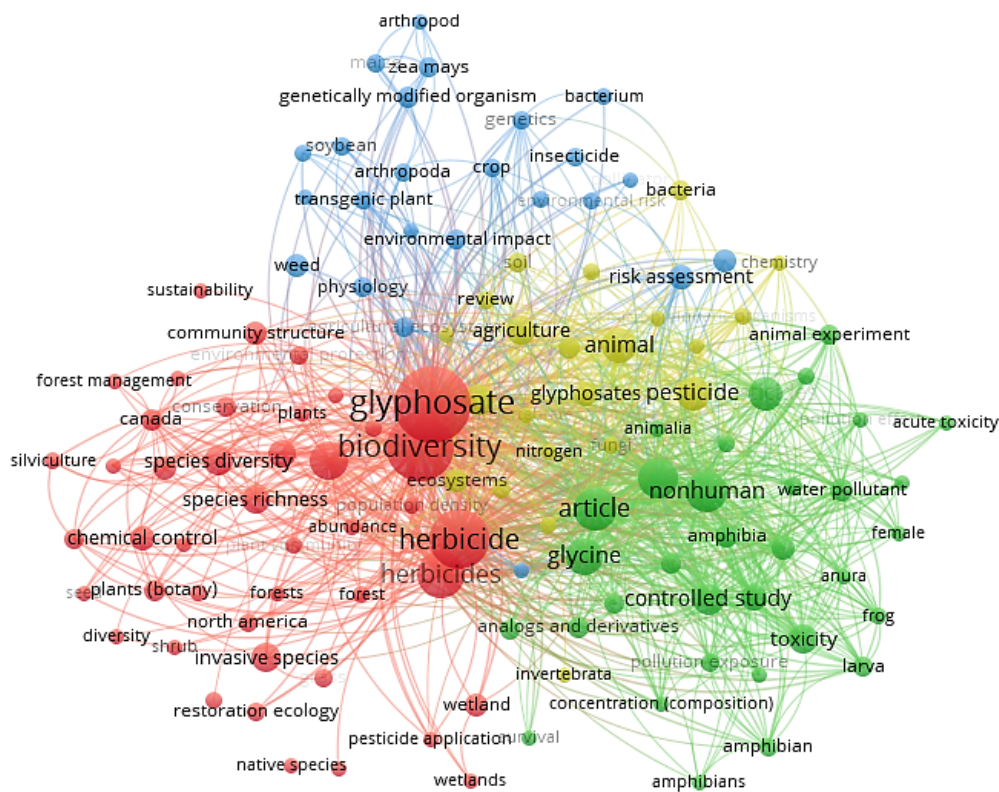


Figura 8. Diagrama de concurrència de paraules clau de les publicacions sobre glifosat i biodiversitat.

Font. Elaboració pròpia a VOSviewer.

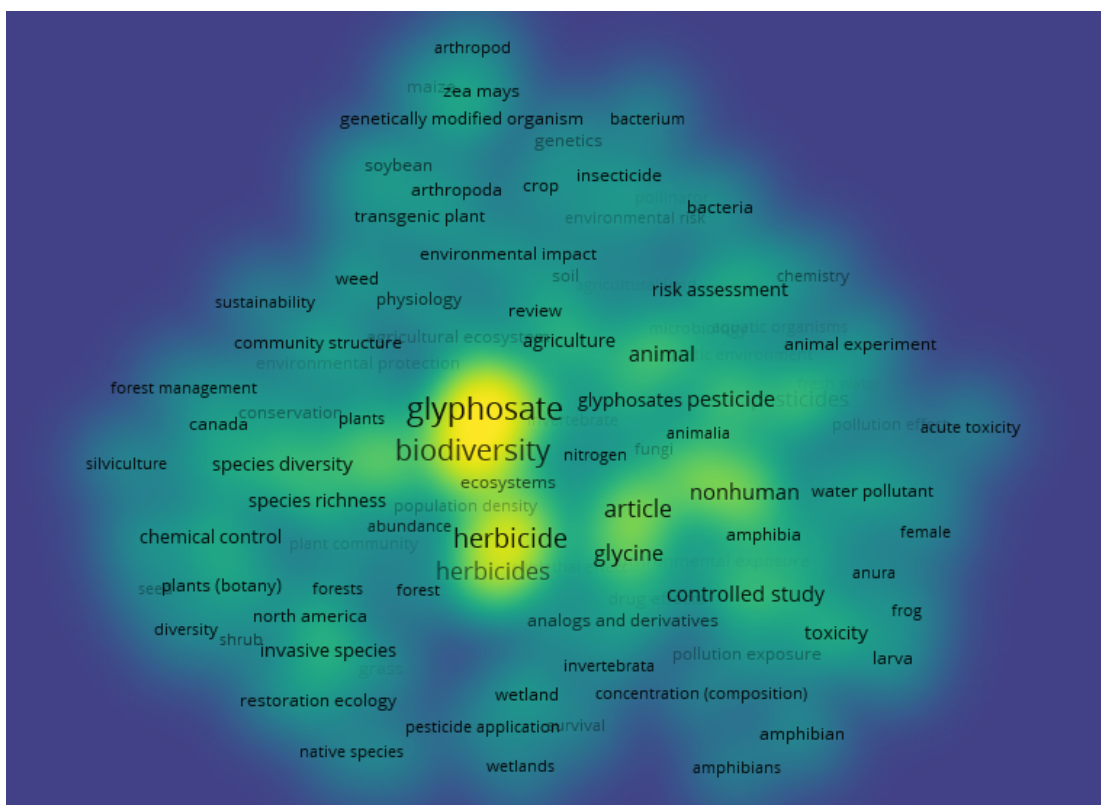


Figura 9. Mapa de densitat de paraules clau de les publicacions sobre glifosat i biodiversitat.

Font. Elaboració pròpia a VOSviewer.

Finalment, l'anàlisi conceptual va revelar les connexions sistemàtiques entre el glifosat com a entitat nova i la transgressió del límit planetari d'integritat de la biosfera. El mapeig va identificar quatre vies principals d'impactes documentades a la literatura: efectes letals i subletals en pol·linitzadors (particularment mortalitat en abelles), toxicitat aguda i crònica en fauna aquàtica (especialment amfibis), alteracions significatives en la microbiota del sòl amb reducció de la diversitat funcional, i efectes de deriva sobre vegetació no objectiu que modifiquen la composició florística dels ecosistemes nadius (Figura 10). Aquests impactes directes s'amplifiquen mitjançant efectes sinèrgics que inclouen interaccions amb múltiples pesticides, potenciació per factors del canvi climàtic, sinergia amb la pèrdua d'hàbitat, i processos acumulatius transgeneracionals.

La convergència d'aquests impactes directes i sinèrgics genera la transgressió del límit d'integritat biosfèrica a través de tres mecanismes crítics: pèrdua accelerada de biodiversitat

que excedeix les taxes naturals d'extinció, col·lapse de serveis ecosistèmics essencials com la pol·linització i el control biològic, i fragmentació de xarxes ecològiques que interromp fluxos gènics i la connectivitat poblacional. El diagrama evidencia l'existència de retroalimentacions negatives que creen punts de no retorn i pèrdua de resiliència ecosistèmica, establint cicles de deteriorament que perpetuen i agreugen la transgressió del límit planetari, confirmant el paper del glifosat com una entitat nova que compromet l'estabilitat de la biosfera global (Figura 10).

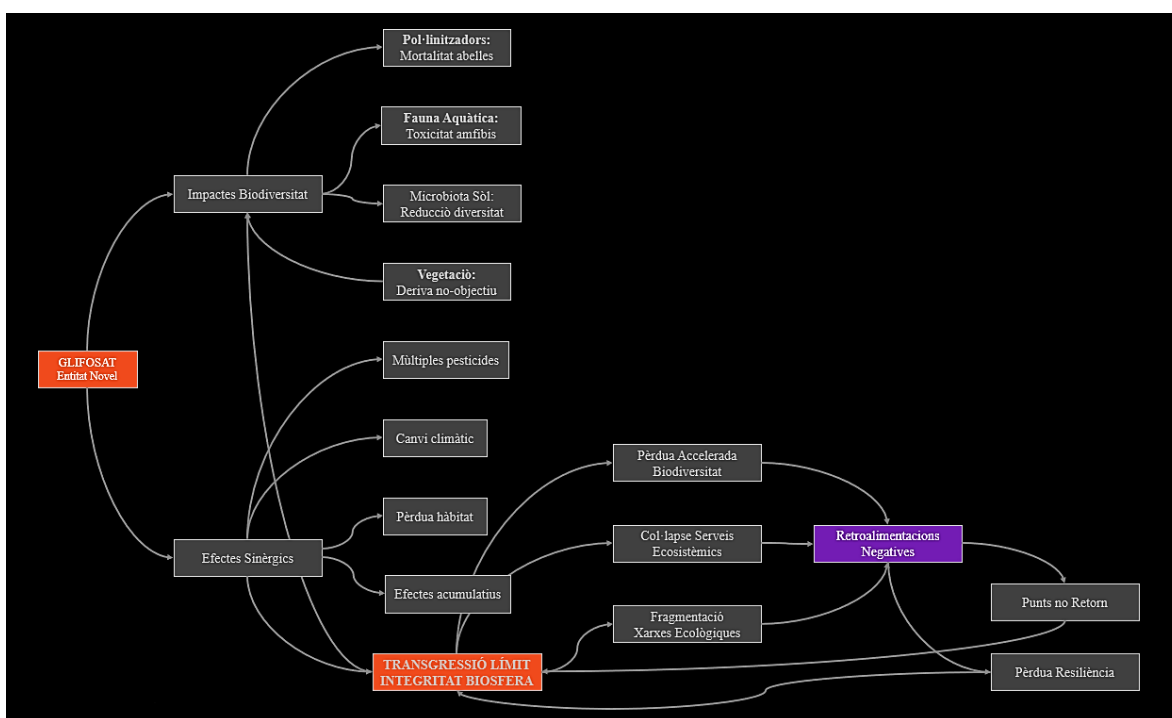


Figura 10. Mapa conceptual de les connexions entre el glifosat com a entitat nova i la transgressió del límit planetari d'integritat de la biosfera.

Font. Elaboració pròpia.

6. Discussió

Els resultats d'aquesta revisió sistemàtica revelen un panorama científic en evolució que confirma l'estreta interconnexió entre les entitats noves i la integritat de la biosfera, utilitzant el glifosat com a cas paradigmàtic. El creixement exponencial de publicacions, particularment a partir del 2015, coincideix amb el període posterior a l'actualització del marc de límits planetaris per Steffen et al. (2015) i reflecteix una creixent consciència científica sobre els riscos que representen les substàncies sintètiques per a l'estabilitat dels ecosistemes globals. Aquest patró temporal suggereix que la comunitat científica ha començat a reconèixer la necessitat urgent d'abordar la transgressió simultània de múltiples límits planetaris, particularment quan l'evidència acumulada indica que estem operant fora de l'espai operatiu segur en sis dels nou límits identificats (Richardson et al., 2023).

La concentració geogràfica de la recerca en països de l'hemisferi nord, particularment els Estats Units, el Canadà i l'Argentina, reflecteix tant les capacitats d'investigació d'aquestes nacions com la rellevància econòmica i ambiental del glifosat en els seus sistemes agrícoles intensius (Scursoni et al., 2006; Lasier et al., 2016; Krimsky, 2021). Tanmateix, aquesta distribució evidencia una esgerda crítica en el coneixement sobre els efectes del glifosat en ecosistemes tropicals i subtropicals, on la biodiversitat és especialment alta i vulnerable. L'escassa representació d'estudis a l'Àfrica, l'Àsia tropical i Amèrica Central suggereix que els impactes del glifosat sobre la integritat de la biosfera podrien estar subestimats a escala global, particularment en regions on els efectes sinèrgics amb altres factors d'estrès ambiental, com el canvi climàtic i la desforestació, podrien amplificar les conseqüències sobre la biodiversitat (González-Moscoso et al., 2023).

L'anàlisi bibliomètrica revela que la recerca s'ha concentrat predominantment en estudis d'impacte directe sobre la biodiversitat (45,03%), mentre que la integració conceptual amb el marc de límits planetaris roman poc desenvolupada (3,66%). Aquesta disparitat suggereix que, tot i que existeix una sòlida evidència sobre els efectes ecotoxicològics del

glifosat, la comunitat científica encara no ha desenvolupat completament enfocaments sistèmics que permetin avaluar com aquests impactes contribueixen específicament a la transgressió dels límits planetaris. L'escassetat d'estudis sobre polítiques i regulació (0,52%) resulta particularment preocupant, considerant que països com Mèxic han implementat prohibicions del glifosat basades en evidència científica, però sense un marc conceptual clar que vinculi aquestes decisions amb la restauració dels límits planetaris a nivells segurs (Peng et al., 2020; González-MoscOSO et al., 2023). Així doncs aquesta absència d'estudis centrats en la governança ambiental resulta especialment preocupant a escala global si es considera la rellevància creixent dels marcs regulatoris en la transició cap a sistemes agroalimentaris més sostenibles i compatibles amb els límits planetaris. Totes aquestes dades obtingudes, indiquen i suggereixen una oportunitat i una necessitat de futures investigacions tant per avaluar normatives com per suggerir-ne de noves.

La diversitat metodològica identificada, amb un predomini dels estudis de camp (62,30%), proporciona una evidència robusta sobre els efectes del glifosat en condicions naturals, però revela limitacions importants en l'ús d'enfocaments de modelització ecològica (5,24%) que podrien permetre projeccions a escala planetària. Els bioassaigs de laboratori (20,42%), tot i ser essencials per establir relacions causa-efecte, presenten limitacions inherents per captar la complexitat de les interaccions ecosistèmiques que caracteritzen la transgressió dels límits planetaris. Aquesta situació suggereix la necessitat de desenvolupar metodologies innovadores que integrin múltiples escales espacials i temporals, així com enfocaments transdisciplinaris que combinin l'ecologia, la toxicologia ambiental i les ciències del sistema Terra (Siroski et al., 2016; Lim et al., 2019; Persson et al., 2022).

El biaix taxonòmic identificat, amb un predomini d'estudis en flora (41,4%) i artròpodes (16,8%), mentre que grups com anèl·lids, fongs, microbiota i zooplàncton romanen subrepresentats, limita la nostra comprensió integral dels efectes del glifosat sobre la integritat de la biosfera (Newmaster & Bell, 2002; Liess et al., 2021; Weidlich et al., 2020). Aquesta situació és particularment problemàtica si es considera que la microbiota del sòl i els microorganismes aquàtics exerceixen funcions ecosistèmiques crítiques per al

manteniment de l'estabilitat biogeoquímica planetària. Els estudis sobre amfibis (8,9%), tot i que proporcionen una evidència valuosa sobre la vulnerabilitat d'aquest grup altament sensible, resulten insuficients per caracteritzar completament els efectes sobre la diversitat funcional dels ecosistemes aquàtics, especialment considerant el seu paper com a bioindicadors de la salut ecosistèmica (Relyea, 2004; Relyea & Jones, 2009).

La concentració de publicacions en revistes especialitzades en ciències ambientals i ecotoxicologia, tot i que reflecteix la rellevància temàtica, també suggereix una integració interdisciplinària limitada que podria estar restringint el diàleg entre diferents comunitats científiques (Relyea, 2004; Relyea & Jones, 2009; Flandroy et al., 2018). L'absència de publicacions significatives en revistes de ciències del sistema Terra, sostenibilitat global o polítiques ambientals indica que la recerca sobre el glifosat encara no s'ha integrat completament amb els marcs conceptuals més amplis dels límits planetaris i la governança de la sostenibilitat global. Aquesta fragmentació disciplinària limita el desenvolupament d'enfocaments sistèmics necessaris per abordar la complexitat de les interaccions entre entitats noves i la integritat de la biosfera.

L'anàlisi de concurrència de paraules clau confirma la centralitat de conceptes com "glyphosate", "biodiversity" i "herbicide", però revela una connexió limitada amb termes específics del marc de límits planetaris com "planetary boundaries", "novel entities" o "biosphere integrity". Aquesta desconexió semàntica suggereix que, tot i que l'evidència sobre els impactes del glifosat en la biodiversitat és abundant, la integració conceptual amb el marc teòric de límits planetaris requereix un esforç deliberat de síntesi que transcendeixi les fronteres disciplinàries tradicionals. La identificació de clústers temàtics relacionats amb "environmental monitoring" i "ecosystems" indica oportunitats per desenvolupar enfocaments de monitoratge que avaluin específicament la contribució del glifosat a la transgressió dels límits planetaris (Flandroy et al., 2018; Rezende-Silva et al., 2019; Utaile et al., 2023).

Els mecanismes d'impacte identificats en el mapa conceptual —efectes letals i subletals en pol·linitzadors, toxicitat en fauna aquàtica i efectes de deriva sobre vegetació nativa— proporcionen una evidència clara de com el glifosat, com a entitat nova, contribueix a la transgressió del límit d'integritat de la biosfera (Sullivan & Sullivan, 2003; Relyea, 2005; Crall, 2022). Tanmateix, la comprensió dels efectes sinèrgics i de les retroalimentacions que caracteritzen la transgressió dels límits planetaris requereix una recerca addicional que integri múltiples escales espacials i temporals. Els punts de no retorn i la pèrdua de resiliència ecosistèmica identificats suggereixen que els impactes del glifosat podrien tenir conseqüències irreversibles per a l'estabilitat de la biosfera, especialment quan es combinen amb altres factors d'estrès ambiental com el canvi climàtic i la pèrdua d'hàbitat (Folke, 2013).

Finalment, l'evidència acumulada en aquesta revisió suggereix que el glifosat representa un cas paradigmàtic de com les entitats noves poden comprometre la integritat de la biosfera a múltiples escales. La transgressió simultània d'aquests límits planetaris requereix respostes polítiques i de gestió ambiental que transcendeixin els enfocaments tradicionals de regulació de pesticides, integrant perspectives de sostenibilitat planetària que reconeixin la interconnexió fonamental entre la salut dels ecosistemes i l'estabilitat del sistema Terra. Seguint l'enfocament One Health, entès com un marc interdisciplinari que analitza i gestiona de manera integrada la salut humana, la salut animal i la salut ambiental, es planteja la necessitat d'incorporar aquesta perspectiva en el disseny de polítiques públiques per abordar els efectes acumulatius i sistèmics derivats de l'ús de substàncies com el glifosat.

L'enfocament One Health ofereix doncs un marc operatiu i integrador que permet connectar la gestió de contaminants com el glifosat amb els objectius globals de conservació de la biodiversitat i seguretat planetària. Aquesta aproximació és especialment útil per desenvolupar polítiques públiques transformadores, orientades a mantenir-nos dins dels llindars segurs per al funcionament del sistema Terra.

El desenvolupament d'alternatives sostenibles al glifosat, com les identificades a Mèxic i altres països, s'ha d'emmarcar dins d'estratègies més àmplies de transició cap a sistemes agroalimentaris, com potser l'enfocament One Health, que operin dins de l'espai operatiu segur dels límits planetaris, contribuint així a la construcció d'un futur sostenible per a la humanitat i la biosfera (Gómez-Lee, 2019).

7. Conclusions

Aquesta revisió sistemàtica, sustentada en prop de dues-centes publicacions científiques, confirma que el glifosat s'ha convertit en un cas paradigmàtic per entendre com les entitats noves poden erosionar la integritat de la biosfera en múltiples escales espacials i temporals. Les evidències convergeixen a mostrar que els efectes del compost transcendeixen la seva funció herbicida i desencadenen alteracions sistèmiques —des de la microbiota del sòl fins a la xarxa tròfica aquàtica— que acaben debilitant la resiliència ecosistèmica global.

Malgrat la rellevància del marc dels límits planetaris, la revisió ha evidenciat la manca d'estudis que abordin de manera clara els indicadors, metodologies i criteris utilitzats per quantificar els llindars específics associats a les Novel Entities i a la Integritat de la Biosfera. Aquesta absència dificulta la integració efectiva del marc teòric en les polítiques ambientals i l'avaluació de riscos.

Tot i la gran quantitat de proves els impactes directes del glifosat en la biodiversitat, continua existint un desajust entre la investigació ecotoxicològica i el marc conceptual de les límits planetaris, a més d'una notable manca d'investigacions dels ecosistemes tropicals i subtropicals on la biodiversitat és particularment susceptible. L'anàlisi bibliomètrica revela tres esculls que continuen limitant una comprensió completa del problema. Primer, un biaix metodològic: gairebé dues tercers parts dels estudis se centren en observacions de camp, mentre que la modelització i la experimentació predictiva continuen sent

minoritàries. Segon, un biaix geogràfic: la recerca es concentra als hemisferis nord i sud-americà, deixant poc explorats els ecosistemes tropicals i subtropicals, on la biodiversitat és especialment sensible a la interacció entre canvi climàtic, pèrdua d'hàbitat i contaminants. Tercer, un biaix conceptual: només una fracció reduïda de la literatura vincula explícitament els resultats ecotoxicològics amb el marc de límits planetaris, fet que dificulta quantificar la contribució real del glifosat a la transgressió d'aquests llindars. Tot i que s'han identificat efectes del glifosat que comprometen tant la biodiversitat com el funcionament biogeoquímic dels ecosistemes, es requereixen més estudis per comprendre com aquestes alteracions poden reforçar dinàmiques de retroalimentació negativa. Aquestes interaccions podrien contribuir a una transgressió simultània o accelerada de diversos límits planetaris, fet que accentua la importància d'enfocaments sistèmics i interdisciplinaris.

A aquests tres esculls se n'hi afegeix un quart: la quasi absència d'estudis sobre polítiques i regulació —només una publicació, l'equivalent al 0,52 % del total (Taula 3)—, mancança que impedeix disposar d'evidència robusta per orientar la governança d'aquest herbicida en el context dels límits planetaris. Al mateix temps, aquesta llacuna suggereix una oportunitat i una necessitat clares per a futures recerques orientades tant a avaluar l'eficàcia de les normatives vigents com a dissenyar-ne de noves, coherents amb les restriccions biofísiques globals.

Superar aquests buits exigeix integrar mètodes de Earth-system science que connectin mecanismes locals amb projeccions globals, establir programes de monitoratge de llarg abast en regions molt diverses i fomentar sinergies interdisciplinàries que combinin ecotoxologia, biogeoquímica, estadística de grans dades i governança ambiental. Només així es podran generar indicadors operatius capaços de rastrejar, en temps gairebé real, la pressió acumulativa de les entitats noves sobre la biodiversitat.

El cas del glifosat posa de manifest la necessitat d'un marc regulador que vagi més enllà de la gestió tradicional de pesticides i s'alineï amb el principi de precaució planetària. A curt termini, això implica incorporar els límits planetaris en les avaluacions de risc químic, promoure incentius per a pràctiques agroecològiques lliures de glifosat i establir fulls de ruta internacionals que facilitin la transició cap a sistemes agroalimentaris que operin dins de l'espai segur de la biosfera. A mitjà i llarg termini, la prioritat ha de ser construir polítiques públiques que, d'acord amb l'enfocament One Health, integrin la salut humana, la salut animal i ambiental, la conservació i el desenvolupament socioeconòmic, de manera que la preservació de la biodiversitat esdevingui el pilar sobre el qual se sosté l'estabilitat del sistema Terra.

Aquestes troballes ressalten la necessitat imperiosa d'elaborar estratègies de governança ambiental que incorporin visions de sostenibilitat planetària, fomentant la transició cap a sistemes agroalimentaris que funcionin dins l'espai d'operació segur dels límits planetaris i assegurin la preservació de la biodiversitat per a les properes generacions.

8. Bibliografía

- Booth, A., Martyn-St James, M., Clowes, M., & Sutton, A. (2021). Systematic approaches to a successful literature review.
- Crall, J. (2022). Glyphosate impairs bee thermoregulation. *Science*, 376(6597), 1051-1052. DOI: 10.1126/science.abq5554
- Flandroy, L., Poutahidis, T., Berg, G., Clarke, G., Dao, M. C., Decaestecker, E., ... & Rook, G. (2018). The impact of human activities and lifestyles on the interlinked microbiota and health of humans and of ecosystems. *Science of the total environment*, 627, 1018-1038. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.288>
- Folke, C. (2013). Respetar los límites del planeta y recuperar la conexión con la biosfera. *Worldwatch Institute, The State of the World*.
- Gómez-Lee, M. I. (2019). Agenda 2030 de desarrollo sostenible: comunidad epistémica de los límites planetarios y cambio climático. *Revista opera*, (24), 69-93. <https://doi.org/10.18601/16578651.n24.05>
- González-Moscoso, M., Meza-Figueroa, D., Martínez-Villegas, N. V., & Pedroza-Montero, M. R. (2023). GLYPHOSATE IMPACT on human health and the environment: Sustainable alternatives to replace it in Mexico. *Chemosphere*, 340, 139810. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139810>
- Grant, M. J., & Booth, A. (2009). A typology of reviews: an analysis of 14 review types and associated methodologies. *Health information & libraries journal*, 26(2), 91-108.
- Klátyik, S., Simon, G., Oláh, M., Mesnage, R., Antoniou, M. N., Zaller, J. G., & Székács, A. (2023). Terrestrial ecotoxicity of glyphosate, its formulations, and co-formulants: evidence from 2010–2023. *Environmental Sciences Europe*, 35(1), 1-29. <https://doi.org/10.1186/s12302-023-00758-9>
- Krimsky, S. (2021). Can glyphosate-based herbicides contribute to sustainable agriculture?. *Sustainability*, 13(4), 2337. <https://doi.org/10.3390/su13042337>
- Lasier, P. J., Urich, M. L., Hassan, S. M., Jacobs, W. N., Bringolf, R. B., & Owens, K. M. (2016). Changing agricultural practices: potential consequences to aquatic

- organisms. *Environmental monitoring and assessment*, 188, 672. <https://doi.org/10.1007/s10661-016-5691-7>
- Liess, M., Liebmann, L., Vormeier, P., Weisner, O., Altenburger, R., Borchardt, D., ... & Reemtsma, T. (2021). Pesticides are the dominant stressors for vulnerable insects in lowland streams. *Water research*, 201, 117262. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117262>
- Lim, X. E., Koksong, L., Koksong, L., Liew, H. J., Loh, J. Y., & Loh, J. Y. (2019). Acute toxicity of glyphosate on various life stages of calanoid copepod, *Pseudodiaptomus annandalei*. *Asia Pac. J. Mol. Biol. Biotechnol*, 27, 24-31.
- Newmaster, S. G., & Bell, F. W. (2002). The effects of silvicultural disturbances on cryptogam diversity in the boreal-mixedwood forest. *Canadian journal of forest research*, 32(1), 38-51. <https://doi.org/10.1139/x01-163>
- Organització Mundial de la Salut. (2022). *One Health*. Organització Mundial de la Salut. <https://www.who.int/news-room/questions-and-answers/item/one-health>
- Page, M. J., Moher, D., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., ... & McKenzie, J. E. (2021). PRISMA 2020 explanation and elaboration: updated guidance and exemplars for reporting systematic reviews. *bmj*, 372.
- Peng, W., Lam, S. S., & Sonne, C. (2020). Support Austria's glyphosate ban. *Science*, 367(6475), 257-258. DOI: 10.1126/science.aba5642
- Persson, L., Carney Almroth, B. M., Collins, C. D., Cornell, S., De Wit, C. A., Diamond, M. L., ... & Hauschild, M. Z. (2022). Outside the safe operating space of the planetary boundary for novel entities. *Environmental science & technology*, 56(3), 1510-1521.
- Relyea, R. A. (2004). Growth and survival of five amphibian species exposed to combinations of pesticides. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 23(7), 1737-1742. <https://doi.org/10.1897/03-493>
- Relyea, R. A. (2005). The impact of insecticides and herbicides on the biodiversity and productivity of aquatic communities. *Ecological applications*, 15(2), 618-627. <https://doi.org/10.1890/03-5342>

- Relyea, R. A., & Jones, D. K. (2009). The toxicity of Roundup Original Max® to 13 species of larval amphibians. *Environmental toxicology and chemistry*, 28(9), 2004-2008. <https://doi.org/10.1897/09-021.1>
- Rezende-Silva, S. L., Costa, A. C., Dyszy, F. H., Batista, P. F., Crispim-Filho, A. J., Nascimento, K. J. T., & da Silva, A. A. (2019). Pouteria torta is a remarkable native plant for biomonitoring the glyphosate effects on Cerrado vegetation. *Ecological indicators*, 102, 497-506. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.03.003>
- Richardson, K., Steffen, W., Lucht, W., Bendtsen, J., Cornell, S. E., Donges, J. F., ... & Rockström, J. (2023). Earth beyond six of nine planetary boundaries. *Science advances*, 9(37), eadh2458.
- Richmond, M. E. (2018). Glyphosate: A review of its global use, environmental impact, and potential health effects on humans and other species. *Journal of Environmental Studies and Sciences*, 8, 416-434.
- Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin, F. S., Lambin, E. F., ... & Foley, J. A. (2009). A safe operating space for humanity. *nature*, 461(7263), 472-475.
- Scursoni, J., Forcella, F., Gunsolus, J., Owen, M., Oliver, R., Smeda, R., & Vidrine, R. (2006). Weed diversity and soybean yield with glyphosate management along a north–south transect in the United States. *Weed Science*, 54(4), 713-719. <https://doi.org/10.1614/WS-06-004R.1>
- Siroski, P. A., Poletta, G. L., Latorre, M. A., Merchant, M. E., Ortega, H. H., & Mudry, M. D. (2016). Immunotoxicity of commercial-mixed glyphosate in broad snouted caiman (Caiman latirostris). *Chemico-biological interactions*, 244, 64-70. <https://doi.org/10.1016/j.cbi.2015.11.031>
- Steffen, W., Richardson, K., Rockström, J., Cornell, S. E., Fetzer, I., Bennett, E. M., ... & Sörlin, S. (2015). Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *science*, 347(6223), 1259855.

- Sullivan, T. P., & Sullivan, D. S. (2003). Vegetation management and ecosystem disturbance: impact of glyphosate herbicide on plant and animal diversity in terrestrial systems. *Environmental Reviews*, 11(1), 37-59. <https://doi.org/10.1139/a03-005>
- Utaile, Y. U., Honnay, O., Cheche, S. S., & Helsen, K. (2023). Assessing removal methods for controlling *Dichrostachys cinerea* encroachment and their impacts on plant communities in an East-African savannah ecosystem. *Applied Vegetation Science*, 26(1), e12720. <https://doi.org/10.1111/avsc.12720>
- Weidlich, E. W., Flórido, F. G., Sorrini, T. B., & Brancalion, P. H. (2020). Controlling invasive plant species in ecological restoration: A global review. *Journal of Applied Ecology*, 57(9), 1806-1817. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13656>