



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE BABAHOYO
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS
ESCUELA DE AGRICULTURA, SILVICULTURA, PESCA
Y VETERINARIA

CARRERA DE AGRONOMÍA

TRABAJO DE TITULACIÓN

Componente práctico del examen de carácter Complexivo,
presentado al H. Consejo Directivo de la Facultad, como requisito
previo a la obtención del título de:

INGENIERO AGRÓNOMO

TEMA:

“Dinámica de los herbicidas en el suelo”.

AUTOR:

Julio Humberto Campi Goyes

TUTOR:

Ing. Agro. Dalton Cadena Piedrahita, PhD.

Babahoyo - Los Ríos – Ecuador

2023

RESUMEN

Los herbicidas son fundamentales para aumentar la productividad agrícola, pero presentan desafíos ambientales y de salud. Esta investigación enfatiza comprender su interacción en el suelo y conservar el suelo como recurso clave para una agricultura sostenible, abordando la contaminación del agua y la resistencia en malezas mediante la caracterización de la dinámica de los herbicidas. La investigación se enfoca en comprender la dinámica de los herbicidas en el suelo para minimizar su impacto ambiental y mejorar su eficacia en el control de malezas. Los objetivos específicos abordan la vida media, degradación, influencia en la biodiversidad del suelo y la resistencia de malezas. El marco teórico proporciona información sobre tipos de malezas, su impacto en la agricultura y la composición de herbicidas. Los resultados muestran que las enmiendas orgánicas del suelo afectan de manera diversa la dinámica de los herbicidas, con el carbono orgánico aumentando su persistencia en las capas superficiales y la demanda química de oxígeno (DQO) incrementando su liberación en capas más profundas. Además, la degradación de herbicidas como el 2,4-D y el MCPA es principalmente microbiana en suelos de cultivo de arroz, reduciendo la contaminación del agua subterránea, aunque herbicidas como el glifosato afectan negativamente el microbiota del suelo y organismos beneficiosos como las lombrices, lo que puede impactar la salud y la disponibilidad de nutrientes del suelo.

Palabras claves: Herbicida, Dinámica, Maleza, Suelo, Degradación.

SUMMARY

Herbicides are essential for increasing agricultural productivity, but present environmental and health challenges. This research emphasizes understanding their interaction in the soil and conserving soil as a key resource for sustainable agriculture, addressing water pollution and resistance in weeds by characterizing herbicide dynamics. The research focuses on understanding the dynamics of herbicides in the soil to minimize their environmental impact and improve their effectiveness in weed control. Specific objectives address half-life, degradation, influence on soil biodiversity and weed resistance. The theoretical framework provides information on weed types, their impact on agriculture and herbicide composition. The results show that soil organic amendments diversely affect herbicide dynamics, with organic carbon increasing its persistence in the superficial layers and chemical oxygen demand (COD) increasing its release in deeper layers. Furthermore, the degradation of herbicides such as 2,4-D and MCPA is mainly microbial in rice cultivation soils, reducing groundwater contamination, although herbicides such as glyphosate negatively affect the soil microbiota and beneficial organisms such as earthworms. , which can impact soil health and nutrient availability.

Keywords: Herbicide, Dynamics, Weed, Soil, Degradation.

INDICE

| | |
|--|-----|
| RESUMEN..... | II |
| SUMMARY | III |
| 1. CONTEXTUALIZACIÓN..... | 1 |
| 1.1. INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| 1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA | 2 |
| 2. DESARROLLO..... | 5 |
| 2.1.1. Maleza | 5 |
| 2.1.2. Tipos de malezas..... | 5 |
| 2.1.3. Impacto de las malezas en la agricultura | 6 |
| 2.1.4. Resistencia a los herbicidas | 6 |
| 2.1.5. Tolerancia a los herbicidas..... | 7 |
| 2.1.6. Origen de los herbicidas..... | 7 |
| 2.1.7. ¿Qué son los herbicidas?..... | 7 |
| 2.1.8. Nomenclatura de herbicidas..... | 8 |
| 2.1.9. Tipos de formulaciones | 8 |
| 2.1.10. Familia química | 10 |
| 2.1.11. Modos de acción de los herbicidas | 11 |
| 2.1.12. Tipos de herbicidas | 13 |
| 2.1.13. Importancia de los herbicidas | 16 |
| 2.1.14. Factores medioambientales que afectan la actividad de los herbicidas16 | |
| 2.1.15. Residualidad de los herbicidas en el suelo..... | 17 |
| 2.1.16. Dinámica de los herbicidas en el suelo..... | 17 |
| 2.1.17. Dinámica de los herbicidas en el medio ambiente. | 19 |
| 2.1.18. Tasa de degradación de los herbicidas en el suelo..... | 20 |

| | |
|---|----|
| 2.1.19. Tasa de degradación de los herbicidas en las condiciones ambientales..... | 21 |
| 2.1.20. Impacto de herbicidas en la biodiversidad del suelo. | 21 |
| 2.2. MARCO METODOLOGÍCO..... | 22 |
| 2.3. RESULTADOS..... | 23 |
| 2.4. DISCUSION DE RESULTADOS. | 24 |
| 3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... | 26 |
| 3.2. RECOMENDACIONES..... | 27 |
| 4. REFERENCIAS Y ANEXOS..... | 28 |
| 3.3. ANEXOS | 33 |

1. CONTEXTUALIZACIÓN.

1.1. INTRODUCCIÓN.

Los modelos de producción agrícola actuales se basan en el uso de agroquímicos: fertilizantes, insecticidas, herbicidas, fungicidas y nematocidas, que han demostrado ganancias en productividad, pero su uso excesivo tiene impactos en el medio ambiente y la salud. En cuanto a las llamadas "malezas", se cree que, si no se controlan, pueden perder hasta un 30% de la producción total y, por lo tanto, se controlan principalmente mediante técnicas de cultivo y el uso de herbicidas (González y Fuentes 2022).

Cabe señalar que la mayoría de las moléculas de herbicidas se aplican a través del suelo en alguna etapa del crecimiento del cultivo (2/3 del total), en alguna de las épocas de desarrollo del cultivo. La mitad de esto se usa en preemergencia; el 20% sólo en presembrado y el 30% restante, de ambas formas (Navarro *et al.* 1997).

Los herbicidas son productos químicos que se utilizan para controlar el crecimiento y la propagación de malezas, que son plantas no deseadas en los cultivos y se aplican al suelo para inhibir su crecimiento y de esta forma proteger los cultivos. Al hacer este tipo de aplicación puede adsorberse a las partículas del suelo, lo que reduce su movimiento y lo hace menos disponible para las plantas (Rosales y Sanchez 2006).

Algunos países han sido señalados en informes y estudios por tener un uso significativo y preocupante de herbicidas en comparación con otros países o en términos absolutos. Algunos de estos países incluyen: Estados Unidos, Brasil, Argentina, China, Canadá, Australia y países europeos.

Los herbicidas representan el 45% del mercado de plaguicidas de \$ 35 mil millones. No hay duda de que estos agroquímicos, cuyos primeros representantes fueron el 2,4-D y el MCPA, introducidos a mediados de la década de 1940, revolucionaron el control de malezas y contribuyeron a aumentar el rendimiento de los cultivos y el bienestar general (Lan y Bernan 1967).

Los mismos autores menciona que actualmente, alrededor de 260 ingredientes activos están involucrados en la producción, pertenecientes a 70 familias químicas con alrededor de 13 modos de acción reconocidos. Sin embargo, su uso generalizado y su fuerte dependencia del control de malezas no ha estado exento de problemas, especialmente en la selección de malezas resistentes.

Cabe señalar que, dentro de una misma familia química, pueden existir herbicidas con propiedades de uso práctico muy diferentes, por lo que, en casos especiales, es necesario tener un conocimiento especial del comportamiento de cada ingrediente activo (Anzalone 2007).

La dinámica de los herbicidas es un tema fundamental en la agricultura y la gestión de plagas. Se refiere al estudio de cómo interactúan estos compuestos con el suelo y cómo se desplazan, se degradan y se transforman a lo largo del tiempo. Estos procesos son influenciados por una serie de factores, que incluyen las características químicas del herbicida, las propiedades del suelo, las condiciones ambientales y las prácticas de aplicación.

El suelo es un componente crucial en la agricultura, ya que proporciona nutrientes, agua, soporte físico, intercambio gaseoso, ciclos de nutrientes y materia orgánica, hábitat para la biodiversidad y requiere ser conservado adecuadamente. Reconocer y valorar la importancia del suelo es fundamental para lograr una agricultura sostenible, productiva y respetuosa con el medio ambiente.

Con la redacción de este trabajo se pretende caracterizar la dinámica de los herbicidas en el suelo, minimizando los riesgos ambientales y maximizando su eficacia en el control de las malas hierbas.

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La dinámica de los herbicidas en el suelo plantea varios problemas ambientales y agrícolas que deben abordarse de manera cuidadosa. Los herbicidas pueden lixiviarse en el suelo y contaminar las aguas subterráneas o las fuentes de agua superficial. Esto puede afectar negativamente la calidad del

agua potable y de los ecosistemas acuáticos, causando daños a la vida acuática y a los organismos que dependen de estos recursos.

Además, pueden ser volátiles, es decir, pueden evaporarse del suelo a la atmósfera, lo que va aminorar la cantidad de herbicidas disponibles para lograr su objetivo y reducirá su eficacia para controlar las malas hierbas y la vegetación no deseada. Estos procesos pueden depender de la solubilidad y volatilidad del herbicida, así como de las condiciones climáticas y del manejo del suelo.

El uso repetido y continuo de herbicidas en el suelo puede llevar al desarrollo de resistencia en las malas hierbas. Esta acumulación puede afectar negativamente la salud del suelo, disminuir su capacidad de retener agua y nutrientes, y potencialmente dañar los cultivos futuros.

1.3. JUSTIFICACIÓN

El suelo radica en su papel crítico como un recurso agropecuario fundamental para la producción de alimentos, la conservación de la biodiversidad, la captura de carbono y la regulación del ciclo de nutrientes y del agua. La protección y conservación del suelo son esenciales para garantizar una agricultura sostenible y un medio ambiente saludable para las generaciones presentes y futuras. Esto incluye la selección cuidadosa de herbicidas, el uso de dosis apropiadas, la implementación de técnicas de aplicación precisas, la rotación de herbicidas, para garantizar un control eficaz de las malas hierbas y minimizar el daño a los cultivos.

Los herbicidas son una herramienta importante para proteger los cultivos a través del control adecuado de malezas. Su estudio nos permite evaluar y reducir posibles impactos ambientales negativos, como la contaminación del agua y la degradación de los ecosistemas terrestres. Tienen una gran importancia en la agricultura moderna, su uso debe realizarse de manera responsable, siguiendo las recomendaciones de los fabricantes y regulaciones locales, con el objetivo de minimizar los riesgos para la salud humana y el medio ambiente.

Hay que tener en cuenta que hay muchos tipos de herbicidas ampliamente utilizados en la agricultura como por ejemplo el Glifosato, Paraquat, Atrazina,

2,4-D, Dicamba, Imazapic, Metribuzina, Pendimetalina, entre otros y tener conocimientos sobre estos productos pueden tener un impacto significativo en la toma de decisiones agrícolas y en la gestión responsable de los herbicidas, contribuyendo así a un uso más seguro y eficiente de estos productos químicos en la agricultura.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo General

Caracterizar la dinámica de los herbicidas en el suelo, minimizando los riesgos ambientales y maximizando su eficacia en el control de las malas hierbas.

1.4.2. Objetivo Específicos

- Detallar la vida media y la tasa de degradación de diferentes herbicidas en diversos suelos y condiciones ambientales.
- Analizar el impacto de los herbicidas en la biodiversidad macro, meso y microfauna del suelo.

1.5. LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.

El tipo de investigación que se realizará con dominios, líneas y Sublíneas referente a la UTB-FACIAG, haciendo énfasis al trabajo de titulación de componente práctico sobre la dinámica de los herbicidas en el suelo.

Dominio de la Universidad.

- Recursos Agropecuarios, medioambiente, biodiversidad.

Líneas.

- Desarrollo Agropecuario, Agroindustrial, sostenible y sustentable

Sublíneas

- Agricultura sostenible y sustentable
- Conservación de suelo agua

2. DESARROLLO.

2.1. MARCO CONCEPTUAL

2.1.1. Maleza

Las malas hierbas son plantas que crecen de forma silvestre en tierras cultivadas. Al competir por el agua y los nutrientes del suelo, cuando un cultivo encuentra competencia, reduce su tasa de crecimiento, impactando la rentabilidad y generando pérdidas económicas (Esperbent 2015).

2.1.2. Tipos de malezas

Según Venegas y Muñoz (1984) existe tres tipos de malezas que son:

- **Gramíneas:** Son monocotiledóneas anuales, bienales y perennes y se denominan "pajas" o "gramas". Consisten en raíces profundamente agrupadas, tallos interrumpidos a veces por nudos, hojas delgadas y flores en espigas o panículas. Se reproducen por semillas, enredaderas, estolones y rizomas. Exigen mucha luz; algunas especies tienen propiedades inhibitorias del crecimiento de otras plantas porque emiten una sustancia venenosa llamada curamina.
- **Hoja ancha:** Son dicotiledóneas anuales, bienales y perennes. Proviene de diferentes familias y tienen diferentes características morfológicas, como, por ejemplo: diferentes tipos de flores y hojas, con similar largo y ancho. Algunas especies de malezas pertenecientes a las familias de plantas Cucurbitaceae, Amaranthaceae y Malvaceae escapan a los efectos de ciertas aplicaciones de herbicidas preemergentes. Aparecen antes de la cosecha, especialmente en arroz y soja, provocando problemas de maduración de los cultivos por el retraso en la defoliación, lo que dificulta la cosecha, al tiempo que reduce la calidad del grano al mezclarse con las semillas. malezas inmaduras.
- **Cyperaceas:** Son monocotiledóneas anuales o perennes llamadas "coquitos" o "cortaderas". Consisten en raíces profundas (rizomas) distribuidas en cadenas, tallos triangulares, sin nudosidades y pubescencia, hojas delgadas y flores en espigas. Algunas cyperaceas

tienen la propiedad de formar continuamente nódulos en sus raíces, como *C. rotundus* y *C. esculentus*.

2.1.3. Impacto de las malezas en la agricultura

Se sabe que las malezas compiten con las plantas cultivadas por los nutrientes del suelo, el agua y la luz. Estas plantas indeseables son huéspedes de insectos y son perjudiciales para las plantas cultivadas. Sus exudados de radicales y lixiviados foliares son tóxicos para las plantas cultivadas. Las malas hierbas también pueden obstaculizar el proceso de cosecha y aumentar los costos operativos. Además, al ser cosechadas, las semillas pueden contaminar el producto obtenido. De esta manera, la existencia de malezas en las tierras cultivables reduce la eficiencia de la fertilización y el riego, promueve el aumento de otras plagas y finalmente conduce a una grave disminución del rendimiento y la calidad agrícola (Labrada y Parker 1997).

2.1.4. Resistencia a los herbicidas

Según la teoría de la evolución propuesta por Darwin (1859) citado por Vega (2018), las limitaciones impuestas por el medio ambiente, a través de la supervivencia del más fuerte, determinan con qué frecuencia ocurren diferentes variaciones dentro de una determinada especie, concepto conocido como selección natural. Por lo tanto, la variabilidad observada en diferentes poblaciones simplemente proporciona individuos que en algunos casos serán favorecidos y dejarán más descendencia.

El desarrollo de resistencia de las malezas a los herbicidas implica al menos tres mecanismos. La primera es la pérdida de afinidad del herbicida por el correspondiente sitio de acción o resistencia al sitio activo (SA). La segunda es que los herbicidas se metabolizan en sustancias menos fitotóxicas debido a enzimas más degradativas. El tercero es reducir la concentración del herbicida en el sitio de acción reduciendo la absorción, translocación y secuestrando el herbicida (por ejemplo, en la vacuola). Los dos últimos se denominan resistencia de sitio no activo (NSA) (Vega 2018)

2.1.5. Tolerancia a los herbicidas

La tolerancia a los herbicidas no es un problema nuevo, como se ha demostrado desde el inicio del abuso del control químico selectivo del herbicida 2,4 D en cultivos de cereales y está estrechamente relacionada (entre otros factores) con el espectro de acción del herbicida. Así que cuando utilizamos herbicidas solemos ver algunas especies bien controladas y otras no tanto o nada; estas últimas podrán sacar ventaja sobre las especies más susceptibles y florecer, y eventualmente, si se siguen utilizando los mismos principios activos. En los últimos años han surgido algunas malezas que son menos sensibles al glifosato (al menos en las dosis más utilizadas) y tienden a dominar en terrenos frecuentemente tratados con este herbicida; por lo tanto, estas especies se consideran tolerantes al glifosato y ameritan más atención con más profundidad para determinar el grado de tolerancia y posibles métodos de control alternativos (Papa *et al.* 2004).

2.1.6. Origen de los herbicidas.

Desde los comienzos de la agricultura, los seres humanos han utilizado diferentes métodos para proteger los cultivos de las malezas. Con el descubrimiento de las propiedades herbicidas del ácido 2,4-diclorofenoxiacético (2,4-D), y debido a su alta eficiencia y bajo costo, este compuesto y sus análogos que contienen fenoxi son los más utilizados y dominados en el mercado. hasta finales de los años 1960 (Romero *et al.* 2002).

2.1.7. ¿Qué son los herbicidas?

Son productos químicos que al entrar en contacto con las plantas provocan su muerte, inhiben su germinación o impiden su normal crecimiento o desarrollo y provocan deformaciones (Muñoz 2015).

Los herbicidas generalmente se venden en formulaciones líquidas o sólidas, según la solubilidad en agua del ingrediente activo y cómo se aplica. Las formulaciones de herbicidas se indican en la etiqueta del producto y se designan con una o más letras después del nombre comercial. Las etiquetas de los herbicidas también indican el contenido de ingrediente activo, expresado como porcentaje y gramos de ingrediente activo por litro o kilogramo de producto

comercial. La mayoría de los herbicidas comerciales están formulados con un solo ingrediente activo, pero algunos consisten en una mezcla de dos o más ingredientes activos, por lo que es importante conocer sus nombres comunes (Rosales y Sanchez 2006).

2.1.8. Nomenclatura de herbicidas

Según Anzalone (2007), todo herbicida posee diferentes formas de denominación, las cuales se presentan a continuación:

- **Nombre técnico:** Se refiere al ingrediente activo (i.a) contenido en un producto comercial. Los nombres técnicos son nombres aprobados por organismos de normalización reconocidos, siendo el más aceptado ISO (International Standardization Organisation). Durante la fase experimental de desarrollo del herbicida, el nombre técnico puede ser un código de referencia asignado por el fabricante. Su uso es importante para el intercambio de información técnica y científica, por ejemplo, setoxidim.
- **Nombre químico:** Se refiere al nombre de la molécula química del ingrediente activo del herbicida. Sigue las reglas y regulaciones de nomenclatura química para compuestos orgánicos estipuladas por la IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry). Ejemplo : {2-(etoximino-butil)-5-{2-(etiltio)-propil}-3-hidroxi-2-ciclohexeno-1-ona}
- **Nombres o denominaciones comerciales:** En este caso, se hace referencia al nombre del listado aprobado. La designación puede estar sujeta a ciertas reglas de la legislación de cada país. Un mismo ingrediente activo puede tener diferentes nombres comerciales.

2.1.9. Tipos de formulaciones

En general, las formulaciones de herbicidas vienen en dos tipos básicos: líquidas y sólidas. Las formulaciones gaseosas son menos útiles. Cada tipo de formulación suele estar indicado mediante un código o abreviatura (entre paréntesis en las categorías siguientes presentadas a continuación), que puede aparecer o no en el nombre comercial del producto (Anzalone 2007)

Las formulaciones sólidas de herbicidas más comunes son:

- **Polvo humectable (WP ó PM):** A veces, un herbicida nuevo no es lo suficientemente soluble en agua o solventes orgánicos, en cuyo caso se puede moler finamente para formular un polvo humectable. Estos polvos humectables forman suspensiones cuando se disuelven en agua (Cilia *et al.* 1981).
- **Polvo seco (DP):** Fórmula sólida y homogénea, lista para espolvorear. Formulario compuesta de polvo liviano para aplicación en seco (INEN 2012).
- **Gránulo o Tableta dispersable en agua (DF ó WG):** Fácil manipulación con ausencia de polvo, acondicionamiento en seco, pocos riesgos en almacenamiento y aplicables a muchos plaguicidas, excepto los termolábiles. Uno de los inconvenientes es la dificultad de formulación, generalmente no alcanzan la finura de las suspensiones concentradas y son caros (Sánchez 1998).
- **Gránulo (G ó GR):** Estos productos tienen concentraciones más bajas de ingredientes activos, normalmente del 2% al 20%. El material inerte o soporte puede ser harina, arena o material orgánico. Tienen un aspecto de grano más o menos fino, con un tamaño de partícula de 0,2 a 1,5 mm, es decir, durante su preparación, al tamizarse, la mayoría de las partículas pueden pasar por un tamiz de entre 15 y 40 cuadrados por pulgada lineal, a diferencia de los polvos humectables cuyo tamaño está determinado por el tamaño de las partículas que pasan a través de una rejilla de 300 cuadrados por pulgada lineal (Cilia *et al.* 1981)
- **Gránulo o tableta soluble (SG):** son formulaciones químicas que se disuelven en agua antes de su aplicación, y aspectos clave como el contenido de agua, la disolución, la persistencia de la espuma, la fluidez y la pulverulencia son esenciales para garantizar su eficacia y manejo seguro en la agricultura y otras aplicaciones. Controlar estos factores es fundamental para lograr una distribución uniforme y minimizar riesgos para la salud y el medio ambiente (Berrocal y Muñoz 2023).
- **Polvos solubles (SP):** Los herbicidas solubles en agua también pueden formularse como sólidos en polvo que luego se disuelven en agua para su aplicación. son polvos altamente solubles en agua, al mezclarse con

agua se disuelven inmediatamente, a diferencia de los WP no requieren de agitación constante, solo posee riesgo por inhalación (Agroactivo 2021).

Según Cilia *et al.* (1981), las formulaciones líquidas más comunes son:

- **Concentrado soluble (SL):** Una solución es una mezcla físicamente homogénea de dos o más sustancias, que pueden ser líquidos, sólidos o gases. Consta de un soluto, el producto a disolver, y un solvente, la sustancia que disuelve el herbicida, que puede ser agua, alcohol, acetona, etc. El herbicida debe tener al menos un 25% de solubilidad, es decir, aproximadamente 1/4 kg por litro de disolvente, para que pueda venderse en forma de solución.
- **Concentrado emulsionable (EC):** Se caracterizan por la formación de emulsiones al mezclarse con agua, dando a esto un aspecto lechoso. Si los mezclas y luego los agitas, se forman unas pequeñas gotas de aceite suspendidas en agua. Este es el estado físico conocido como emulsión.
- **Suspensión concentrada (SC):** Consiste en ingredientes activos sólidos o líquidos suspendidos en un medio acuoso. Los productos más comunes formulados de esta manera contienen ingredientes activos finamente molidos suspendidos en un líquido. Las formas comerciales de estos productos aparecen como líquidos viscosos que el usuario debe diluir con agua para poder utilizarlos.
- **Suspensión encapsulada (CS):** En este tipo de formulación, parte del ingrediente activo está contenido en microcápsulas y otra parte se disuelve en un solvente. El concentrado se puede diluir con agua y aplicar con un pulverizador normal. Además, con este tipo de formulación se puede reducir la pérdida de producto por volatilización y fotodegradación. El herbicida formulado en forma de cápsula es eptam.

2.1.10. Familia química

Según Anzalone (2007), los herbicidas se han dividido en diferentes familias químicas, que comparten características químicas y moleculares comunes.

Tabla 1: Principales clases de familias químicas de herbicidas.

| Acetamidas | Amidas | Difeniléteres | Glicinas |
|------------------------------|--------------------------|-------------------|----------------------------|
| Ácidos arilaminopropiónicos | Ariloxifenoxipropionatos | Dinitroanilinas | Imidazolinonas |
| Ácidos bencenodicarboxílicos | Benzamidas | Dinitrofenoles | Isoxasoles |
| Ácidos clorocarbónicos | Benzothiadiazinonas | Fenilpirazoles | Isoxazolidinonas |
| Ácidos fenoxicarbónicos | Bipiridilios | Fenil-pyridazinas | N-fenilphthalimididas |
| Ácidos fosfínicos | Carbamatos | Fenil-carbamatos | Nitrilos |
| Ácidos piridincarboxílicos | Ciclohexanodionas | Fosforoamidas | Organoarseniacaless |
| Ácidos quinolincarboxílicos | Cloroacetamidas | Fosforoditioatos | Oxadiazoles |
| Oxazolidinedionas | Oxyacetamidas | Piridinas | Pyrazoles |
| Pyridazinonas | Pyridinecarboxamidadas | Pyrimidindionas | Pyrimidinyl(thio)benzoatos |
| Sulfonilureas | Tetrazolinonas | Thiocarbamatos | Tiadiazoles |
| Triazinas | Triazinonas | Triazoles | Triazolinonas |
| Triazolocarboxamidadas | Triazolopyrimidinas | Triketonas | Ureas |

Fuente: (Anzalone 2007)

2.1.11. Modos de acción de los herbicidas

Según Kappler y Namuth (2004), existen 8 tipos de modo de acción las cuales existe uno sin conocer pero a continuación mencionamos los 7 modos de acción conocidos:

- **Inhibidores de la síntesis de aminoácidos.**

El modo de acción que inhibe la síntesis de aminoácidos incluye herbicidas de las siguientes familias químicas: sulfonilureas, imidazolinonas, triazolopirimidinas, inhibidores de la epsp sintetasa, e inhibidores de la glutamina sintetasa.

- **Inhibidores del crecimiento de las plántulas.**

El modo de acción inhibitor del crecimiento de las plántulas interrumpe el crecimiento y desarrollo de nuevas plantas. Los herbicidas con este modo de acción deben aplicarse al suelo e inhiben el crecimiento de las raíces o la aparición de plántulas. Los carbamatos, acetamidas y dinitroanilinas constituyen la familia química bajo este modo de acción.

- **Reguladores del crecimiento.**

Los reguladores del crecimiento a menudo se denominan auxinas porque estos herbicidas imitan la acción de las auxinas naturales de la planta, lo que resulta en un crecimiento rápido y descontrolado. Se cree que el sitio de acción es el receptor hormonal intracelular, pero se desconoce el sitio de acción completo. Las familias de herbicidas con este modo de acción incluyen los ácidos fenoxi, benzoico, carboxílico y picolínico.

- **Inhibidores de la fotosíntesis.**

Los inhibidores de la fotosíntesis son uno de los principales modos de acción que siguen a los reguladores del crecimiento. Con este modo de acción inhiben uno de varios sitios de unión en el proceso de la fotosíntesis. Sin la fotosíntesis, las plantas no pueden producir alimento. Esta familia de modos de acción incluye triazinas, uracilos, fenilureas, benzotiadiazoles, nitrilos y piridazinas.

- **Inhibidores de la síntesis de lípidos.**

Inhiben la síntesis de lípidos en las plantas. Si los lípidos no se producen en la planta, la producción de membranas celulares no continúa, por lo que se

detiene el nuevo crecimiento. Los ariloxifenoxipropionatos y las ciclohexanodionas son dos familias con este modo de acción.

- **Rompen membranas celulares.**

Estos herbicidas normalmente no se transportan, por lo que sólo afectan las zonas de la planta con las que entran en contacto, aunque después de penetrar en las células de esas zonas. Las familias de herbicidas con este modo de acción incluyen: éteres de difenilo, ariltiazolinonas, feniltalamidas y bupiridinas.

- **Inhibidores de pigmentos.**

Actúa impidiendo la producción de compuestos que protegen a las plantas del daño de la clorofila. El tejido ya no es verde, sino blanco. Los herbicidas con este modo de acción generalmente se usan en preemergencia; sin embargo, algunos también tienen actividad en postemergencia. Las isoxazolidinonas, isoxazoles y piridazinonas forman una familia con este modo de acción.

2.1.12. Tipos de herbicidas

Su modo de acción y selectividad:

- **Selectivos** Son aquellas o sustancias cuya aplicación en determinadas dosis y formas elimina o inhibe el crecimiento de determinadas plantas sin causar daños u otros (Cárdenas *et al.* 1979). Se refiere a una sustancia que mata algunas plantas sin dañar significativamente a otras en ciertas dosis, formas y momento de aplicación; por ejemplo, la atrazina es un herbicida selectivo para el maíz y el sorgo (Rosales y Sanchez 2006).
- **No selectivos:** Son tóxicos para una variedad de vegetación y deben usarse en terrenos no cultivados o mantenerse fuera de contacto con plantas cultivadas. El glifosato es un ejemplo de herbicida no selectivo (Rosales y Sanchez 2006).

Modo de acción.

Herbicidas de Contacto:

- Tienen transporte limitado dentro de las plantas y ejercen efectos fitotóxicos donde se absorben (Diez 2013). Sólo actúan sobre el tejido con el que entran en contacto. Ejemplos: DNBP (Premerge) es selectivo para el trigo, pero es tóxico para ciertas malezas de hoja ancha como *Amaranthus spp* y *Chenopodium panulatum*; por otro lado, el propanil es selectivo para el arroz, pero es tóxico para muchas malezas. El pasto no es selectivo. Pasto y malezas hoja ancha.
- Los herbicidas sólo matan la parte de la planta con la que entran en contacto, por lo que se requiere una buena cobertura de malezas para controlar las malezas y tener un transporte limitado dentro de la planta, por lo que se recomiendan para el control de malezas anual. Algunos ejemplos de herbicidas de contacto son el paraquat y el bromoxinil (Rosales y Sanchez 2006).
- **Herbicidas sistémicos o traslocables:** Después de su absorción, se transfieren al resto de la planta a través de simplastos y/o apoplastos (Diez 2013). Se aplican a las hojas o al suelo y se absorben y distribuyen por toda la planta. Su toxicidad actúa sobre determinadas plantas. Por ejemplo: los herbicidas hormonales como el 2,4-D y el piclorom (Tordón) son selectivos para las gramíneas (trigo) pero no para las malezas de hoja ancha (bledo y bototilla (*Ipomoea, spp.*), mientras que Dalapon es selectivo para algunos cultivos de hoja ancha (alfalfa) y no selectivos a las gramíneas (*kikuyu, Pennisetum clandestinum*)(Cárdenas et al. 1979).

Herbicidas que se aplican al suelo o al follaje y se absorben y transportan por toda la planta, incluidas sus raíces y otros órganos subterráneos. Por las razones anteriores, se utilizan herbicidas sistémicos para controlar las malezas perennes. Algunos ejemplos de herbicidas sistémicos incluyen 2,4-D y probesulfurón (Rosales y Sanchez 2006).

Según la época de aplicación.

De acuerdo a su época de aplicación los herbicidas pueden clasificarse en:

- **Presiembra;** se aplican después de la siembra, pero antes de que emerjan la maleza y el cultivo. Los herbicidas PRE requieren de un riego o precipitación pluvial para su incorporación en los primeros 5 cm de profundidad del suelo, donde germina la mayoría de las semillas de maleza. Este tipo de herbicidas elimina a las malas hierbas durante la germinación o recién emergidas, lo que evita la competencia temprana con el cultivo.(Rosales y Sanchez 2006).
- **Al follaje:** Los aplicados al follaje que se movilizan dentro de la planta del punto de absorción al sitio o punto de acción son conocidos como Herbicidas Sistémicos. Ej.: 2,4-D, ácido Picolinico y Glifosato; mientras que aquellos que solo afectan la parte tratada son los Herbicidas de Contacto (Rodriguez 2021).
- **Al suelo:** Se aplican antes de la siembra de cultivos y suelen requerir una incorporación mecánica al suelo hasta cierta profundidad y evitar la fotodegradación o volatilización. La absorción de herbicidas por las plantas ocurre a través de tres procesos: flujo de masas (transporte con agua), contacto (raíces y brotes) y difusión (movimiento de moléculas). La mayoría de herbicidas en el suelo no se mueven en fase gaseosa, excepto los fumigantes como el bromuro de metilo (Plant & Soll Sciences eLibrary 2023).
- **Presiembra incorporado:** La aplicación de herbicidas pre-siembra incorporados al suelo implica la aplicación de herbicidas al final del proceso de preparación del suelo, antes de la última pasada de nivelación. Luego, estos herbicidas se incorporan inmediatamente al suelo a una profundidad de aproximadamente 10 cm, en ocasiones, se combina la aplicación y la incorporación en un solo paso para optimizar la eficacia. Este enfoque ayuda a controlar las malas hierbas y facilita la siembra en un lecho de suelo libre de competidores no deseados (Espinoza et al. 2018).
- **Preemergente:** según (Gleba Ambiental 2020) los herbicidas pre-emergentes (PRE) controlan malezas en los primeros estados del ciclo de

vida, específicamente durante la germinación de las semillas (aparición de radícula) y emergencia de las plántulas desde el suelo

- **Emergente:** Se aplican cuando los cultivos y/o malezas estén emergiendo del suelo. Ejemplos: 2,4-D en maíz; atrazina (Gesaprim) más aceite en maíz y DNBP (Premerge) en soya (Cárdenas *et al.* 1979).
- **Postemergente:** se aplican directamente a las malezas, siendo más efectivos en etapas tempranas de crecimiento. La eficacia se reduce en malezas estresadas, mientras que, para malezas perennes grandes, se recomienda aplicar herbicidas que se transloquen en verano u otoño. El período de resistencia al lavado por lluvia varía según el herbicida y formulación, por lo que es crucial seguir las indicaciones de la etiqueta para evitar que se lave antes de ser absorbido (Campoverde *et al.* 2016).
- **No Dirigido y dirigidos:** El uso indiscriminado de herbicidas implica aplicarlos sin distinguir entre cultivos y malezas, ejemplificado por el uso de propanil en arroz y 2,4-D en potreros y sorgo (Cárdenas *et al.*, 1979). En contraste, el enfoque dirigido busca minimizar el contacto con el cultivo y maximizar la interacción con las malezas o lograr una distribución uniforme en el suelo, como se observa en la aplicación de DSMA y Diurón en algodón (Cárdenas *et al.* 1979).

2.1.13. Importancia de los herbicidas

El herbicida puede contribuir en gran medida a mejorar las prácticas agrícolas y avanzar hacia un sector más sostenible. Los herbicidas son productos que deben utilizarse bajo estricta supervisión técnica y control fitosanitario. En este sentido, el tratamiento herbicida no tiene efectos fitotóxicos. El tratamiento con herbicidas de cultivos en zonas costeras puede lograr beneficios económicos del 125% al 305% (Guillen *et al.* 2019).

2.1.14. Factores medioambientales que afectan la actividad de los herbicidas

La eficacia puede variar dependiendo de muchos factores, incluidas las propiedades del suelo (acidez, textura, contenido de materia orgánica), propiedades del herbicida (volatilidad, pKa, pKb, solubilidad), condiciones

ambientales (temperatura, precipitaciones, viento), etc. . Una vez aplicados, la mayoría de ellos sufren procesos de degradación química y/o biológica que conducen a la formación de nuevos productos, a veces más fluidos, persistentes y/o más tóxicos que el compuesto original. Como resultado, el uso excesivo de herbicidas sintéticos en la agricultura se ha convertido en un problema ambiental, afectando la flora y fauna de los ecosistemas y la salud humana (Muñoz 2015)

2.1.15. Residualidad de los herbicidas en el suelo

Los que se utilizan únicamente para eliminar las malezas de la raíz de las plantas se denominan herbicidas residuales. Se aplican directamente al suelo formando una película que provoca la muerte de las malezas. En principio no afecta a las malas hierbas ya existentes, sino a las que están a punto de brotar. No se suele utilizar en jardines pero sí en cultivos frutales (Guillen *et al.* 2019).

2.1.16. Dinámica de los herbicidas en el suelo

Los herbicidas utilizados en campos agrícolas se dispersan o distribuyen en diferentes etapas del medio ambiente: agua, aire, suelo y biota. Estos herbicidas interactúan con cada fase de una manera muy compleja a través de múltiples reacciones físicas, químicas o biológicas, que a menudo ocurren simultáneamente. Una vez que el herbicida entra en contacto con el suelo, comienza a transferirse a otros sistemas o a degradarse en su estructura original, dependiendo del tiempo (Barba 2015).

El comportamiento de los herbicidas en el suelo es un proceso complejo que depende de la interacción de factores como el herbicida, el suelo y las condiciones ambientales. Las principales reacciones que ocurren en la matriz del suelo se pueden dividir en aquellas que conducen a transformación (biótica o abiótica), retención (adsorción a coloides) y transporte (principalmente lixiviación) (Bedmar *et al.* 2022).

La persistencia de los herbicidas en el suelo es un aspecto crítico en su uso agrícola, ya que influye en la duración de su efectividad y en su potencial impacto ambiental. Los herbicidas deben permanecer activos el tiempo suficiente para controlar las malezas, pero no tanto como para afectar los cultivos posteriores o contaminar el agua subterránea. Varios factores, como las

características del suelo, las condiciones climáticas y las propiedades del herbicida, influyen en su persistencia. La comprensión de estos factores es esencial para una aplicación efectiva y responsable de herbicidas en la agricultura, minimizando los riesgos ambientales (Ozuna 2020).

Los herbicidas pueden penetrar en el suelo a través de aplicaciones directas, acumulación en restos de cultivos o dispersión atmosférica debido a lluvias o vientos. Una vez en el suelo, experimentan procesos de transferencia y transformación. Los procesos de transferencia involucran la transferencia de los herbicidas entre diferentes sistemas, como suelo-agua o suelo-aire, y pueden incluir adsorción-desorción, lixiviación, escorrentía y volatilización, entre otros. Estos procesos tienen un impacto significativo en la movilidad y persistencia de los herbicidas en el medio ambiente (Alfaro 2013).

Los herbicidas aplicados al suelo se ponen en contacto con las plantas a través de tres procesos: flujo de masas, contacto y difusión. El flujo de masas implica que las moléculas de herbicida se transportan con la humedad del suelo a medida que las plantas absorben agua. El proceso de contacto se refiere al contacto directo entre las plantas y los herbicidas a través de sus raíces o brotes. La difusión involucra el movimiento de moléculas desde áreas de alta concentración a áreas de baja concentración y ocurre en medios líquidos o gaseosos, aunque la mayoría de los herbicidas en el suelo tienen una movilidad limitada en la fase gaseosa (Martin y Namuth 2017).

El glifosato tiene una vida media de 2 a 215 días antes de ser metabolizado a AMPA, y una vida media acuática de 2 a 91 días. La tasa de biodegradación del glifosato en el suelo depende del tipo de suelo, pH, concentración de fosfato, principalmente del O₂ disuelto en el agua, microorganismos asociados al proceso y condiciones ambientales (González y Fuentes 2022)

El paraquat (dicloruro de 1,1'-dimetil-4,4'-bipiridina) se utiliza como herbicida de amonio cuaternario y es uno de los herbicidas más utilizados en la actualidad. Es un herbicida no selectivo de amplio espectro que actúa por acción de contacto, es decir, no desaloja, sino que afecta los órganos verdes de la superficie a pulverizar. Muy tóxico para los humanos si se ingiere. Otros

miembros de esta clase de herbicidas incluyen diquat, cetraquat, etc., todos los cuales se reducen a iones de radicales libres para generar radicales superóxido que reaccionan con las membranas lipídicas insaturadas de los organismos (Gutiérrez *et al.* 2019).

Existen debates contradictorios sobre la movilidad del paraquat en el suelo. Algunos estudios informan que el herbicida es muy persistente y completamente inactivado cuando entra en contacto con el suelo donde se puede almacenar. Otros estudios han demostrado que el herbicida tiene una alta solubilidad en agua y una alta afinidad por la materia orgánica, lo que conduce a una movilidad limitada del compuesto en el suelo. Esta movilidad de los herbicidas se produce a través de la escorrentía de los ríos y su penetración en cuerpos de agua cercanos (Gil *et al.* 2021).

Se encontró que la atrazina era más persistente en el suelo loésico, con vidas medias que oscilaban entre 21 y 154 días. En el perfil aluvial la variación es de 12 a 57 días. Sin embargo, la cantidad de atrazina que se puede extraer permite estimar la curva de efectividad del producto e inferir el riesgo potencial de contaminación en el transporte (Hang y Nassetta 2003).

En el suelo, el Glufosinato se clasifica como no persistente. Es estable a la fotólisis y la hidrólisis, se comporta como una molécula móvil en el suelo, pero tiene una textura media. En los sistemas acuáticos es persistente hasta biodegradarse, estabilizándose mediante hidrólisis y fotólisis acuática. El Glufosinato de amonio no tiene potencial volátil y su vida media en el aire es de 0,52 días (MONTANA S.A 2020).

Según Bedmar *et al.* (2022) La siguiente tabla muestra la persistencia de los principales herbicidas con efecto residual en suelos de laboratorio y campo por familia y MOA.

2.1.17. Dinámica de los herbicidas en el medio ambiente.

Para comprender y estimar el comportamiento de los herbicidas en el agua, la atmósfera, el suelo, así como en la flora y la fauna, por un lado, es importante comprender la posible distribución de los herbicidas en los diferentes

componentes ambientales, ya que estas plantas que proporcionan un mayor sustrato están contaminadas con herbicidas. Por tanto, es importante considerar que el agua es el 99,58% del ambiente, la atmósfera y el suelo el 0,41%, y finalmente la flora y fauna el 0,01% (Alfaro 2013).

En el ambiente se distribuirá según sus propiedades fisicoquímicas y las del suelo, iniciándose inmediatamente el proceso de contaminación remota por movimiento y acumulación. La contaminación remota se produce de dos formas: aire y agua, siendo la primera el proceso de volatilización y difusión del producto y posterior transmisión eólica (contaminación atmosférica). A través del agua, los herbicidas se distribuyen sobre las superficies tratadas (suelo-plantas), se mueven inicialmente por lavado (agua de lluvia, riego) y luego por infiltración y adsorción en los coloides del suelo, que posteriormente pueden contaminar las aguas subterráneas (Alfaro 2013).

2.1.18. Tasa de degradación de los herbicidas en el suelo.

La tasa de degradación química de triazinas y sulfonilureas disminuye a medida que aumenta el pH, especialmente por encima de 6,0-7,0. Por el contrario, el pH bajo del suelo aumenta la persistencia de imidazolinonas como imazaquin e imazetapir. A valores de pH inferiores a 6,0, la imazaquina y el imazetapir se adsorben fuertemente a las partículas del suelo, reduciendo su disponibilidad para los microorganismos, que es su principal mecanismo de degradación (Bedmar *et al.* 2022)

El coeficiente de absorción (K_{oc}) indica qué tan bien se retiene el herbicida en el suelo: cuanto menor es el valor, menor es el porcentaje de herbicida retenido y por tanto mayor es el riesgo de residuos. Algunos ejemplos: Clopiralid (5), Dicamba (2), 2,4 D (20), Metsulfuron (35), Metribuzin (38), Picloram (16), etc. Por otro lado, herbicidas como Flumioxazin tienen una K_{oc} elevada (889), lo que indica una fuerte retención en coloides, como es el caso del glifosato ($K_{oc}=16631$) y el paraquat (1000000) (Bedmar *et al.* 2022).

2.1.19. Tasa de degradación de los herbicidas en las condiciones ambientales

Las variables climáticas involucradas en la degradación de los herbicidas son la temperatura, las precipitaciones, la humedad y la luz solar. La luz solar es a veces un factor importante en la degradación de los herbicidas. La absorción de energía luminosa aumenta el nivel de energía de la molécula, lo que provoca un cambio en su estructura; sin embargo, para la mayoría de los herbicidas más persistentes en el suelo, hay poca pérdida debido a la fotólisis (Bedmar *et al.* 2022).

Además del clima, otras variables típicas del entorno en el que se utilizan los herbicidas pueden afectar la disipación de los herbicidas, afectando así los efectos de los residuos y el período de espera para plantar cultivos sensibles. Se podrá hacer mención del sistema de labranza, la cobertura vegetal o residuos de la aplicación del herbicida y el tipo de cultivos y/o cultivares de los mismos cultivados en la rotación (Bedmar *et al.* 2022)

Se puede considerar que el diurón y el glifosato son los pesticidas más dañinos para el medio ambiente y la salud humana porque son los más tóxicos, los menos biodegradables y los más persistentes en el medio ambiente (Barba y Becerra 2011).

Los herbicidas Ácido Fluazifop, Glifosato, Diurón, Ametrina, Terbutrina y 2,4 D no fueron biodegradables en el reactor aeróbico debido a sus efectos tóxicos sobre los microorganismos del lodo inoculado. Ninguno de los pesticidas fue biodegradable en un 70% en 28 días (Barba y Becerra 2011).

2.1.20. Impacto de herbicidas en la biodiversidad del suelo.

En los suelos agrícolas existe una amplia variedad de microorganismos (bacterias, hongos y microalgas) y los productos químicos aplicados al suelo inevitablemente no interfieren con sus actividades funcionales. La acción de los microorganismos del suelo sobre los pesticidas puede ser el mecanismo de descomposición más importante. Los microorganismos del suelo, como bacterias, algas y hongos, descomponen estos compuestos orgánicos para obtener los alimentos y la energía que necesitan para crecer, especialmente

cuando carecen de estas fuentes (García 1986).

En general, la aplicación de herbicidas tiene ventajas sobre los métodos mecánicos de deshierbe en las regiones tropicales, especialmente durante la temporada de lluvias. En este punto, debido a la humedad y la intensidad de la radiación solar, comienza a desarrollarse una parte importante del microbioma del suelo, como son las algas autótrofas. Estos microbios aportan la mayor parte de la materia orgánica producida en el suelo. La mayoría de los herbicidas tienen efectos adversos, reduciendo significativamente la producción de materia orgánica y sin duda afectando negativamente la fertilidad del suelo (García 1986).

La aplicación repetida de herbicidas durante varios años puede tener diferentes efectos sobre los microorganismos del suelo. En general, los cambios resultantes fueron decisivos, pero también se informaron cambios persistentes en la composición de la comunidad microbiana. La aplicación regular de atrazina a residuos vegetales redujo algunas bacterias celulósicas. Por otro lado, se ha informado que el uso continuo de paraquat puede aumentar las poblaciones de bacterias aeróbicas, celulobacterias y actinomicetos, pero perjudica las poblaciones de hongos (García 1986).

2.2. MARCO METODOLÓGICO

Método.

La redacción para este trabajo se tomó en cuenta un tipo de investigación explorativa, descriptiva, bibliográfica dependiendo la naturaleza del estudio y alcanzar los objetivos planteados. Se recopiló información de textos actualizados de tesis, artículos, revistas de institutos agrícolas, contribuyendo con datos reales que aportarán con el desarrollo del trabajo de componente práctico de titulación.

La información obtenida será sintetizada, parafraseada y citada con el fin de dar a conocer información relevante de fuentes verídicas y actualizadas sobre la dinámica de los herbicidas en el suelo.

Metodología.

El tipo de investigación que se utilizara para dar a conocer este trabajo de componente practico son los siguientes:

- **Exploratoria:** Permite familiarizarse con el tema o problema en cuestión, lo que puede implicar la revisión de la literatura existente, la identificación de conceptos clave y la comprensión de las teorías relacionadas, de esta forma nos ayuda a generar ideas y posibles hipótesis que puedan ser expuestas en el tema de estudio.
- **Explicativa:** En este tipo de investigación, se trata de identificar y comprender las causas, efectos y relación de las variables de estudio del componente practico, así como las relaciones de causalidad que pueden existir entre las variables involucradas con otros trabajos realizados respecto al tema de estudio.

2.3. RESULTADOS.

El contenido de carbono orgánico (CO) y la demanda química de oxígeno (DQO) aportados por enmiendas orgánicas en el suelo puede tener efectos contradictorios en la dinámica de los herbicidas. El CO tiende a aumentar la adsorción y persistencia de los herbicidas en las capas superficiales del suelo, limitando su movilidad, mientras que la DQO incrementa la biodisponibilidad de los herbicidas, facilitando su degradación y liberación a capas más profundas del suelo, con patrones observados en suelos específicos como el CTL.

En los suelos de cultivo de arroz estudiados, el proceso de degradación de los herbicidas 2,4-D y MCPA fue dominante y de naturaleza principalmente microbiana. Esta degradación contribuyó significativamente a reducir el riesgo de contaminación del agua subterránea con estos herbicidas. Estos hallazgos resaltan la importancia de comprender y gestionar los procesos de degradación de herbicidas en suelos agrícolas, especialmente en cultivos como el arroz, donde se utilizan estos compuestos para el control de malezas.

La exposición al glifosato tuvo impactos diversos en la biomasa bacteriana, influenciando aspectos genéticos, fisiológicos y poblacionales.

Algunas bacterias experimentaron un crecimiento mejorado en suelos con glifosato, mientras que este herbicida inhibió la actividad micorrízica de los hongos, afectando la nutrición de las plantas y la rizosfera. Además, los estudios indican que el glifosato es tóxico para las lombrices, lo que podría comprometer la calidad del suelo y el desarrollo de las plantas.

Las formulaciones comerciales de glifosato tienen efectos adversos en las bacterias fijadoras de nitrógeno de la soja, atribuidos a los aditivos presentes en los herbicidas. Los herbicidas 2,4-D, ametryn y rituron provocaron disminuciones notables en las poblaciones de hongos del suelo, similares a las de las bacterias a los 15 días después de la aplicación. Aunque los hongos del suelo son sensibles a concentraciones elevadas de herbicidas, se observó una recuperación de sus poblaciones debido a ajustes metabólicos o la disminución de los efectos residuales de los herbicidas con el tiempo.

2.4. DISCUSION DE RESULTADOS.

Según Alfaro (2013) se encontró que en la caña de azúcar en Brasil, los herbicidas 2,4-D, Hexazinona, Atrazina y Metribuzin tenían la mayor probabilidad de bioacumularse, seguidos por Acetoclor, Terbutiuron y Simazina. Por otro lado, González y Fuentes (2022) señalaron que el herbicida 2-4-D tuvo un impacto negativo significativo en las bacterias del suelo, mientras que la actividad de los microorganismos solventes de fosfato inorgánico (Pi) no se vio afectada negativamente por los herbicidas y, de hecho, se estimuló en presencia de metribuzin.

Según Barba (2015) se encontraron herbicidas en el suelo con o sin riego, y su disipación redujo la población bacteriana. Aunque la aplicación de herbicidas no afectó significativamente las bacterias Gram negativas y positivas, aumentó la abundancia relativa de Actinomycetes en todos los suelos tratados. Además, Soto et al. (2010) señalan que la exposición al glifosato afecta de manera diversa a la biomasa bacteriana, con algunos efectos genéticos, fisiológicos y poblacionales, y también inhibe la actividad micorrízica en hongos, influyendo en la nutrición de las plantas y la rizosfera.

Según González y Fuentes (2022) indican que los herbicidas afectan negativamente la capacidad micorrízica de los hongos arbusculares, desregulan la expresión de genes y reducen la actividad de lombrices del suelo en el reciclaje de materia orgánica, destacando la necesidad de investigar alternativas agrícolas sin pesticidas tóxicos. Por otro lado, Bedmar *et al.* (2022) señalan que los herbicidas pueden acumularse en suelos durante sequías o en suelos con ciertas características, como bajo contenido de materia orgánica y alto contenido de arena, dependiendo del pH del suelo y su interacción con compuestos coloidales.

3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.1. CONCLUSIONES

Al caracterizar la dinámica de los herbicidas en el suelo, el objetivo es comprender cómo se comportan estos químicos después de su aplicación en el campo. Esto incluye su movilidad, degradación, persistencia y capacidad de llegar a otras áreas mediante lixiviación o escorrentía. Esto se puede lograr desarrollando técnicas de aplicación más eficientes, como la pulverización dirigida o la implementación de sistemas de agricultura de precisión.

Al conocer la vida media de diferentes herbicidas en condiciones ambientales y del suelo, se pueden tomar decisiones más informadas sobre su uso seguro y eficaz en la agricultura. La tasa de degradación es otro aspecto importante que este objetivo busca abordar. Saber qué tan rápido se descomponen los herbicidas en el suelo le permite evaluar su persistencia y determinar cuánto tiempo después de su aplicación al medio ambiente.

Microorganismos como bacterias y hongos desempeñan un papel importante en la destrucción de la materia orgánica y la liberación de nutrientes esenciales para las plantas. Los insectos y las lombrices de tierra también desempeñan un papel importante en la estructura y aireación del suelo. Los herbicidas pueden ser tóxicos para la microbiota del suelo, lo que puede afectar negativamente su función y diversidad. A su vez, esto cambia la salud general del suelo y la disponibilidad de nutrientes para las plantas.

3.2. RECOMENDACIONES

- Promover el uso de técnicas de aplicación selectivas y precisas para minimizar el uso de herbicidas y reducir la exposición innecesaria a otros organismos.
- Realizar estudios sobre los impactos en la biodiversidad del suelo, centrándose en la microbiota y los animales beneficiosos para proteger la salud y el funcionamiento del suelo.
- Fomentar la rotación de herbicidas con diferentes mecanismos de acción para prevenir la resistencia de las malezas y mantener la eficacia a largo plazo.

4. REFERENCIAS Y ANEXOS

4.1. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

Agroactivo. 2021. Formulación de los productos fitosanitarios. :1-5. <https://agroactivocol.com/manejo-integrado-y-preventivo-de-plagas/formulacion-de-los-productos-fitosanitarios/>.

Alfaro, R. 2013. Herbicidas Asociados a la Caña de Azúcar y su Potencial de Contaminación del Medio Ambiente. Gulf Hypoxia and Local Water Quality Concerns Workshop September 26-28, 2005, Ames, IA 39(6):17. <https://servicios.laica.co.cr/laica-cv-biblioteca/index.php/Library/download/LBApEJpBqNOsCPeXEpSrxydFmiaJmftl>

Anzalone, A. 2007. Herbicidas. Modos y mecanismos de acción. Journal of Chemical Information and Modeling 53(9):1689-1699. DOI: https://www.researchgate.net/publication/259175751_Herbicidas_Modos_y_mecanismos_de_accion_en_plantas.

Barba, LE; Becerra, D. 2011. Biodegradabilidad y toxicidad de herbicidas utilizados en el cultivo de caña de azúcar. Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente (10):11-19. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=231122666001>.

Barba, V. 2015. Disipación de herbicidas en un suelo enmendado con residuos orgánicos: ensayos en campo e impacto en las comunidades microbianas del suelo. CSIC - Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Salamanca (IRNASA) 3(April):49-58. <https://digital.csic.es/handle/10261/197568>.

Bedmar, F; Gianelli, V; Panaggio, H. 2022. Herbicidas en el suelo en sistemas de siembra directa. :1-40. <https://www.aapresid.org.ar/blog/herbicidas-suelo-sistemas-siembra-directa>.

Berrocal, G; Muñoz, K. 2023. Guía para la realización y presentación de estudios de estabilidad de productos plaguicidas de uso sanitario y doméstico. :1-13. https://www.ispch.cl/wp-content/uploads/2023/03/Guia-EPT-de-productos-plaguicidas-v.2_0.pdf.

Campoverde, V; Marble, C; Norcini, J. 2016. Herbicidas Postemergentes para

Uso en Ornamentales. :4. <https://edis.ifas.ufl.edu/publication/EP533>

Cárdenas, J; Doll, J; Romero, C. 1979. Clasificación de herbicidas. ICA-CIAT :33 p. <http://hdl.handle.net/20.500.12324/23580>.

Cilia, L; Piedrahíta, F; Doll, J; Romero, C; Sierra, J. 1981. Formulaciones de herbicidas. Ciat segunda ed:42.http://ciat-library.ciat.cgiar.org/Articulos_Ciat/Digital/AV_SB951.4_F6_1981_GUIA_C.3_Formulaciones_de_herbicidas.pdf.

Diez, P. 2013. Manejo de malezas problema. Modos de acción herbicida. Red de conocimiento de malezas resistentes. REM-AAPRESID, Rosario 5342:127. https://www.aapresid.org.ar/wp-content/uploads/sites/3/AAP167289/AAP-Manual_Rem_Herbicidas.pdf.

Esperbent, C. 2015. Malezas: el desafío para el agro que viene. Revista de Investigaciones Agropecuarias 41(3):235-240. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=86443147004>.

Espinoza, G; López, K; Ortiz, A; Reyes, A; Molina, I; Rosales, E; Fuentes, O. 2018. Efectividad De Herbicidas Aplicados En Pre-Siembra Incorporado (Ppi) Para Malezas De Difícil Control En El Cultivo De Caña De Azúcar (*Saccharum spp*). (Departamento de Investigación y producción.):410-427. <https://cengicana.org/files/20180919091709602.pdf>.

Gil, D; Navarrete, G; Refugio, M del; Galaviz, I; Sosa, C. 2021. Paraquat's herbicide acute toxicity in *Oreochromis niloticus* (Cichlidae) and *Macrobrachium olfersii* (Palaemonidae). *Acta Biologica Colombiana* 26(2):178-185. <http://www.scielo.org.co/pdf/abc/v26n2/0120-548X-abc-26-02-178.pdf>

Gleba Ambiental. 2020. Herbicidas preemergentes ¿Son una buena opción para el control de malezas? :1-2. <https://gleba.com.ar/herbicidas-preemergentes-son-una-buena-opcion-para-el-control-de-malezas/>.

González, E; Fuentes, M. 2022. Dynamics of glyphosate in soil and its effects on microbiota. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental* 38:127-144. <https://www.scielo.org.mx/pdf/rica/v38/0188-4999-rica-38-54197.pdf>

Guillen, E; Díaz, O; Mayorga, D. 2019. Use of Herbicides in Controlling Weeds . Importance of Your. 11:3. <https://opuntiabrava.ult.edu.cu/index.php/opuntiabrava/article/view/712>.

Gutiérrez, J; Quarless, C; Mela, Y. 2019. Efecto Del Herbicida Paraquat (Ion De Piridilo 1,1-Dimetil-4,4) En Poblaciones De Familias De Collembola, En Ecosistema De Pastizales, En Ollas Arriba, Capira, Provincia De Panamá Oeste. Revista Científica Universitaria 8(núm.2):1-20. <http://portal.amelica.org/ameli/jatsRepo/228/228986003/html/>.

Hang, S; Nassetta, M. 2003. Evolución de la degradación de atrazina en dos perfiles de suelo de la provincia de Córdoba. Revista de Investigaciones Agropecuarias 32(núm 1):1-14. <https://www.redalyc.org/pdf/864/86432106.pdf>.

Ian, M; Bernan, E. 1967. El Estado Actual De La Resistencia A Herbicidas En El mundo. Angewandte Chemie International Edition, 6(11), 951–952. (Mi):5-24. <https://biblioteca.inia.cl/bitstream/handle/20.500.14001/8571/NR36351.pdf?sequence=7&isAllowed=y>.

INEN. 2012. Plaguicidas y productos afines. Definiciones y clasificación. Instituto Ecuatoriano de Normalización :1-12. DOI: <https://doi.org/https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/1338-3.pdf>.

Kappler, B; Namuth, D. 2004. Introducción a la clasificación de los herbicidas Resúmen : Objetivos : s.l., s.e. 3-4 p. DOI: <https://passel2.unl.edu/view/lesson/c6f27ffb3c0a/1>.

Labrada, R; Parker, C. 1997. El control químico en el contexto del manejo integrado de plagas. En: 7a Jornadas sobre Cultivos Protegidos.UEEA INTA Gran Buenos Aires - FCAyF.UNLP 5p. :3-8. <https://www.fao.org/3/t1147s/t1147s05.htm>.

Martin, A; Namuth, D. 2017. Introducción a las aplicaciones prácticas de la fisiología de los herbicidas en las plantas. :1-10. <https://passel-old.unl.edu/pages/printinformationmodule.php?idinformationmodule=1130447070>.

MONTANA S.A. 2020. Garrote Herbicida Agrícola. (511):0-2.

https://www.corpmontana.com/wp-content/uploads/2021/06/Ficha_Tecnica-Garrote.pdf.

Muñoz, G. 2015. Comportamiento en suelos agrícolas de alcaloides indólicos, de origen natural, con propiedades herbicidas. s.l., s.e. 1-106 p. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/188048>.

Navarro, S; Barba, A; Escolar, P; Cámara, MA; Oliva, J. 1997. Persistencia del herbicida isoxaben en el suelo. (May 2015):557-564. https://www.mapa.gob.es/ministerio/pags/Biblioteca/Revistas/pdf_plagas%2FB SVP-23-04-557-564.pdf.

Ozuna, PD. 2020. Residualidad de un herbicida Persistencia o residualidad de herbicidas Factores que afectan la residualidad de los herbicidas. :1-7. <https://www.rainbowagrolatam.com/ec/detalle-de-residualidad-de-un-herbicida-194#:~:text=02%20de%20Abril%202020%20Residualidad%20de%20un%20herbicida&text=La%20invasi%C3%B3n%20de%20la%20Conyza,problem%C3%A1tica%20del%20campo%20productivo%20paraguayo>.

Papa, J; Felizia, J; Esteban, A. 2004. Tolerancia y resistencia a herbicidas. Sitio Argentino de Producción Animal (1):1-6. https://www.produccion-animal.com.ar/produccion_y_manejo_pasturas/pasturas_combate_de_plagas_y_malezas/25-tolerancia_y_resistencia_a_herbicidas.pdf.

Plant & Soll Sciences eLibrary. 2023. Herbicidas aplicados al suelo. :3-5. <https://passel2.unl.edu/view/lesson/74de2447a06a/3>.

Rodriguez, E. 2021. Herbicidas: Clasificación – Modo de uso. QUIFUCA,C.A. :1-6. <https://www.quifuca.com/ve/2021/05/09/herbicidas-clasificacion-modo-de-uso/>.

Romero, A; James, G; Haro, J. 2002. Tendencias en la síntesis de herbicidas. Revista de la Sociedad Química de México 46(1):54-63. <https://www.scielo.org.mx/pdf/rsqm/v46n1/v46n1a10.pdf>.

Rosales, E; Sanchez, R. 2006. Clasificación y usos de herbicidas, modos de acción, importancia. Inifap (35). <https://www.compucampo.com/tecnicos/clasificacionherbs.pdf>.

Sánchez, F. 1998. Características de los formulados comerciales de plaguicidas. Influencia sobre los residuos encontrados en alimentos. s.l., s.e. [https://www.dipalme.org/Servicios/Anexos/anexosiea.nsf/VAnexos/IEA-RP96-c7/\\$File/RP96-c7.pdf](https://www.dipalme.org/Servicios/Anexos/anexosiea.nsf/VAnexos/IEA-RP96-c7/$File/RP96-c7.pdf).

Soto, J; Andrade, M; Mestas, P; Motta, M; Soto, H. 2010. Impacto de herbicidas sobre microorganismos disolventes de fosfatos en suelo rizosférico de plantas de *Solanum tuberosum*. Teoría y praxis investigativa 5(2):11-20. <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/3702389.pdf>.

Vega, M de la. 2018. Resistencia de malezas a herbicidas. Agronomía Forestal UC. Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal. Pontificia Universidad Católica de Chile. (13):29-34. https://www.aapresid.org.ar/wp-content/uploads/sites/3/2013/02/REMSD12_005.pdf.

Venegas, F; Muñoz, R. 1984. Malezas tropicales del litoral ecuatoriano. Estación Experimental «Pichilingue» (9):1-20. <https://repositorio.iniap.gob.ec/bitstream/41000/1599/1/Comunicaci%C3%B3n%20T%C3%A9cnica%20N%C2%BA%209.pdf>.

3.3. ANEXOS

| Mecanismo / Modo de acción ² | Grupo químico | Herbicidas | Presión de vapor ³ | Fotólisis | Degradación microbiana | Degradación química |
|---|--------------------|----------------|-------------------------------|--------------------|------------------------|---------------------|
| ALS | Sulfonilureas | Metsulfuron | B | B | B - M | M - A |
| | | Clorimuron | B | B | B - M | M - A |
| | | Clorsulfuron | B | B | B - M | M - A |
| | | Iodosulfuron | B | B | B - M | M - A |
| | | Sulfometuron | B | B | B - M | M - A |
| | Imidazolinonas | Imazapir | B | B | A | B |
| | | Imazetapir | B | B | A | B |
| | Triazolpirimidinas | Diclosulam | B | B | A | B |
| FII | Triazinas | Atrazina | B | B | M - A | B - M - A |
| | Triazinonas | Metribuzin | B | B | M - A | B |
| | Ureas | Diuron | B | B | A | B |
| PPO | Difeniléteres | Fomesafen | B | B | A | B |
| | Feniltalimidas | Flumioxazin | B | B | A | B |
| | Triazolinonas | Sulfentrazone | B | B | A | B |
| Mimetizan Auxinas | Hormonales | 2,4-D | B ⁴ | B | A | B |
| | | Clopiralid | B - M | B | A | B |
| | | Dicamba | B - M | B | A | B |
| | | Picloram | B | B - M ⁶ | A | B |
| Síntesis de carotenos | Triketonas | Mesotrione | B | B | A | B |
| | | Biciclopirona | B | M | A | B |
| | Pyrazoles | Topramezone | B | B | A | B |
| | Isoxazolidinonas | Clomazone | A | B | A | B |
| | Fenil heterociclos | Flurocloridona | B | B | A | B |
| Síntesis AGCML | Cloroacetamidas | Acetoclor | B | B | A | B |
| | | S-Metolaclo | B - M ⁵ | B - M ⁵ | A | B |
| | Isoxazolinonas | Pyroxasulfone | B | B | A | B |
| ACCASA | Ariloxi-fenoxi | Haloxifop | B | B | A | B - M |
| | Ciclohexanodionas | Cletodim | | | | |

Anexo 1. Presión de vapor, fotólisis y tipos de degradación en el suelo de los principales herbicidas con efecto residual según familia y mecanismo/modo de acción (MOA)¹ (B=baja, M=moderada, A= alta)

Fuente: (Bedmar *et al.* 2022).