

**Universidad Autónoma de Sinaloa
Colegio de Ciencias Agropecuarias
Facultad de Agronomía
Doctorado en Ciencias Agropecuarias**



TESIS

**HERRAMIENTAS DIGITALES EN LA EVALUACIÓN DE HERBICIDAS
INHIBIDORES DE LA ALS Y ACCasa Y RESISTENCIA DE *Avena fatua* L. EN
TRIGO**

Que para obtener el grado de Doctor en Ciencias Agropecuarias

PRESENTA:

ANDRÉS GONZÁLEZ RUIZ

DIRECTOR DE TESIS:

DR. GUADALUPE ALFONSO LÓPEZ URQUÍDEZ

CODIRECTOR DE TESIS:

DR. CARLOS ENRIQUE AIL CATZIM

Culiacán, Sinaloa, México, diciembre de 2024

**Universidad Autónoma de Sinaloa
Colegio de Ciencias Agropecuarias
Facultad de Agronomía
Doctorado en Ciencias Agropecuarias**



TESIS

**HERRAMIENTAS DIGITALES EN LA EVALUACIÓN DE HERBICIDAS
INHIBIDORES DE LA ALS Y ACCasa Y RESISTENCIA DE *Avena fatua* L.**

Que para obtener el grado de Doctora en Ciencias Agropecuarias

PRESENTA:

ANDRÉS GONZÁLEZ RUIZ

DIRECTOR DE TESIS:

DR. GUADALUPE ALFONSO LÓPEZ URQUÍDEZ

CODIRECTOR DE TESIS:

DR. CARLOS ENRIQUE AIL CATZIM

Culiacán, Sinaloa, México, diciembre de 2024



Dirección General de Bibliotecas
Ciudad Universitaria
Av. de las Américas y Blvd. Universitarios
C. P. 80010 Culiacán, Sinaloa, México.
Tel. (667) 713 78 32 y 712 50 57
dgbuas@uas.edu.mx

UAS- Dirección General de Bibliotecas

Repositorio Institucional

Restricciones de uso

Todo el material contenido en la presente tesis está protegido por la Ley Federal de Derechos de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México). Queda prohibido la reproducción parcial o total de esta tesis. El uso de imágenes, tablas, gráficas, texto y demás material que sea objeto de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente correctamente mencionando al o los autores del presente estudio empírico. Cualquier uso distinto, como el lucro, reproducción, edición o modificación sin autorización expresa de quienes gozan de la propiedad intelectual, será perseguido y sancionado por el Instituto Nacional de Derechos de Autor.

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-Compartir Igual, 4.0 Internacional.



ESTA TESIS FUE REALIZADA POR ANDRÉS GONZÁLEZ RUIZ, BAJO LA DIRECCIÓN DEL CONSEJO PARTICULAR QUE SE INDICA Y HA SIDO APROBADA POR EL MISMO, COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:

DOCTOR EN CIENCIAS AGROPECUARIAS

CONSEJO PARTICULAR

DIRECTOR

DR. GUADALUPE ALFONSO LÓPEZ URQUÍDEZ

CODIRECTOR

DR. CARLOS ENRIQUE AIL CATZIM

ASESOR

DR. CARLOS ALFONSO LÓPEZ ORONA

ASESOR

DRA. MITZI DAYANIRA ESTRADA ACOSTA

ASESOR

DR. RAYMUNDO MEDINA LÓPEZ

CULIACAN, SINALOA, MÉXICO, DICIEMBRE DE 2024

DEDICATORIA

A DIOS

Por estar conmigo en los momentos difíciles y quien me ha dado las fuerzas y salud para poder levantarme y seguir en mi camino.

A MIS PADRES

Por siempre creer en mí y estar a mi lado en los momentos buenos y malos. Les agradezco infinitamente que me hayan dado la vida y la oportunidad de seguir formándome.

A MI ESPOSA

Por estar siempre a mi lado en este proyecto tan importante en mi vida, gracias por tolerar las jornadas extensas de trabajo, estrés y cansancio. Gracias por sacrificar tus sueños por cumplir los míos, realmente admiro tu paciencia y solidaridad.

A MI FAMILIA

Por apoyarme en mis decisiones y motivarme en terminar mis proyectos personales.

AGRADECIMIENTO

Al **Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHACYT)** por la beca otorgada para el desarrollo del programa de Doctorado en Ciencias Agropecuarias, espero retribuir a la sociedad mexicana, su valioso apoyo.

A la **Universidad Autónoma de Sinaloa y la Facultad de Agronomía**, por brindarme una excelente educación.

A la **Universidad Autónoma de Baja California** y al **Instituto de Ciencias Agrícolas** por abrirme las puertas de sus instalaciones para desarrollar las estancias académicas doctorales que contribuyeron enormemente en mi formación profesional.

Al **Dr. Guadalupe Alfonso López Urquidez** por sus buenos consejos, enseñanza y paciencia en mi formación como investigador del área de malezas. Gracias por creer en mí y darme la oportunidad de desarrollarme en la investigación.

Al **Dr. Carlos Enrique Ail Catzim** por todas sus enseñanzas, por apoyarme en mi crecimiento profesional como investigador. Gracias por su paciencia y por mucho trabajo realizado, experiencias buenas, malas en los experimentos realizados y sobre todo por su infinita paciencia.

A la empresa triguera **Agrovizi3n Integradora** por proporcionarme los lotes para el establecimiento de los experimentos de campo y a los ingenieros quienes apoyaron en la parte técnica profesional: Gabriel Andrade Ochoa, Mauro Rivera Solano y Eziquio González

Al Ing. Modesto Días Meza asesor en cultivos básicos y hortícolas, así a como al Ing. Jorge Luis Vázquez Barajas representante de la empresa **Bayer México**, Ing. Cesar Alberto López Mápula representante de la empresa **UPL Agro**, Ing. Ramses Preciado de la Torre asesor técnico promotor de la empresa **Corteva Agriscience de México** y a los Ingenieros José Guillermo Manríquez Salcido y Fidel Edgardo Elizalde G. de la empresa **Syngenta Agro** por sus apoyos al proporcionarnos los herbicidas utilizados en esta investigación.

CONTENIDO

PÁGINA

| | |
|---|----|
| DEDICATORIA..... | i |
| AGRADECIMIENTO..... | ii |
| RESUMEN..... | ix |
| ABSTRACT..... | x |
| CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| 1.1. Hipótesis..... | 4 |
| 1.2. Objetivo general..... | 4 |
| 1.3. Objetivos específicos..... | 4 |
| CAPÍTULO II. REVISIÓN DE LITERATURA..... | 5 |
| 2.1. Importancia económica de <i>Avena fatua</i> L..... | 5 |
| 2.2 Características biológicas de <i>A. fatua</i> | 5 |
| 2.3. Métodos de control de <i>A. fatua</i> en trigo..... | 7 |
| 2.4. Grupos de herbicidas recomendados para el control de maleza en cereales..... | 8 |
| 2.5. Herbicidas inhibidores de la Acetil Coenzima A Carboxilasa (ACCasa)..... | 8 |
| 2.6. Herbicidas inhibidores de la Acetolactato sintasa (ALS)..... | 9 |
| 2.7. Características selectivas del cultivo de trigo a los herbicidas inhibidores de ALS y ACCasa..... | 10 |
| 2.8. Protectores para herbicidas..... | 11 |
| 2.9. Importancia de las buenas prácticas en las aplicaciones de herbicidas en trigo..... | 12 |
| 2.10. Métodos para evaluar la efectividad de los herbicidas en campo..... | 15 |
| 2.11. Herramientas digitales para evaluar la efectividad de herbicidas..... | 15 |
| CAPÍTULO III. HERBICIDAS INHIBIDORES DE ACETOLACTATO SINTASA Y ACETIL CARBOXIL COENZIMA A EN <i>Avena fatua</i> L. (Artículo aceptado por la Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas)..... | 19 |
| 3.1. Introducción..... | 21 |
| 3.2. Materiales y métodos..... | 21 |
| 3.3.1. Efectividad biológica de los herbicidas evaluados..... | 24 |
| 3.3.2. Efecto de los herbicidas sobre la densidad de plantas de avena silvestre..... | 29 |
| 3.3.3. Efecto de los herbicidas evaluados sobre la altura de planta en <i>A. fatua</i> | 32 |

| | |
|---|-----------|
| 3.3.4. Efecto de la aplicación de herbicidas sobre el rendimiento en grano de trigo..... | 34 |
| 3.4. Conclusiones | 36 |
| 3.5. Literatura citada | 36 |
| CAPÍTULO IV. INSTRUMENTOS DIGITALES PARA EVALUAR LA EFICIENCIA DE HERBICIDAS EN <i>Avena fatua</i> (Este artículo se enviará a la revista Agrociencia) | 39 |
| 4.1. Introducción | 40 |
| 4.2. Materiales y métodos | 42 |
| 4.3. Resultados y discusión..... | 44 |
| 4.3.1. Relación de los equipos digitales en la medición del control sobre <i>A. fatua</i> | 44 |
| 4.3.2. Predicción del daño utilizando instrumentos digitales | 47 |
| 4.4. Conclusiones | 49 |
| 4.5. Referencias..... | 49 |
| CAPÍTULO V. RELACIÓN ENTRE ÍNDICES DE VEGETACIÓN Y TOXICIDAD DE PINOXADEN EN DOS POBLACIONES DE <i>Avena fatua</i> L. (Artículo aceptado por la revista AGROPRODUCTIVIDAD) | 52 |
| 5.1. Introducción | 54 |
| 5.2. Materiales y métodos | 55 |
| 5.2.1. Material Biológico | 55 |
| 5.2.2. Diseño Experimental..... | 55 |
| 5.2.3. Análisis Estadístico..... | 56 |
| 5.3. Resultados y discusión..... | 56 |
| 5.4. Conclusiones | 64 |
| 5.5. Referencias..... | 64 |
| CAPÍTULO VI. RELACIÓN DE NDVI Y CONTENIDO DE CLOROFILA CON FITOTOXICIDAD DE PINOXADEN EN DOS POBLACIONES DE <i>Avena fatua</i> L. EN LABORATORIO | 67 |
| 6.1. Introducción | 67 |
| 6.2. Materiales y métodos | 68 |
| 6.2.1. Ubicación del experimento | 68 |
| 6.2.3. Manejo de material vegetal..... | 69 |
| 6.2.4. Diseño experimental | 69 |
| 6.2.5. Evaluación de tratamientos | 70 |

| | |
|--|-----------|
| 6.3. Resultados y discusión..... | 71 |
| 6.3.1. Toxicidad de herbicida e ICM | 71 |
| 6.3.2. Determinación de índices de vegetación..... | 76 |
| 6.4. Conclusiones | 82 |
| 6.5. Bibliografía | 83 |
| CAPÍTULO VII. RESISTENCIA DE POBLACIONES DE <i>Avena fatua</i> L. A HERBICIDAS INHIBIDORES DE LA ALS Y ACCASA BAJO CONDICIONES DE LABORATORIO | |
| 7.1. Introducción | 86 |
| 7.2. Materiales y métodos | 87 |
| 7.2.1. Sitios de colecta del material vegetal..... | 87 |
| 7.2.2. Condiciones de establecimiento de bioensayos de susceptibilidad y resistencia de <i>A. fatua</i> en laboratorio | 89 |
| 7.2.3. Bioensayos de dosis-respuesta para la población de <i>A. fatua</i> susceptible (Línea base) | 89 |
| 7.2.4. Bioensayos de dosis diagnóstico para confirmar resistencia en poblaciones de <i>A. fatua</i> | 91 |
| 7.3. Resultados y discusión..... | 91 |
| 7.3.1. Bioensayos de susceptibilidad (Línea base) | 91 |
| 7.3.2. Dosis diagnóstica para confirmar resistencia de <i>A. fatua</i> | 92 |
| 7.4. Conclusión | 94 |
| 7.5. Literatura citada | 95 |
| CAPÍTULO VIII. CONCLUSIONES | 97 |
| CAPÍTULO IX. LITERATURA CITADA | 99 |

ÍNDICE DE CUADROS

| CUADRO | TÍTULO | PÁGINA |
|------------|---|--------|
| Cuadro 1. | Herbicidas inhibidores de la ALS y ACCasa evaluados sobre <i>A. fatua</i> . | 23 |
| Cuadro 2. | Porcentaje de plantas de <i>A. fatua</i> dañadas \pm EE en el experimento Ejido República Mexicana. | 26 |
| Cuadro 3. | Porcentaje de plantas de <i>A. fatua</i> dañadas \pm EE en el experimento Ejido Nayarit. | 27 |
| Cuadro 4. | Porcentaje de plantas de <i>A. fatua</i> dañadas \pm el EE en el experimento Ejido Sombrerete. | 28 |
| Cuadro 5. | Eficiencia de los tratamientos (% de control) y densidad de plantas de <i>A. fatua</i> \pm el EE en el experimento Ejido República Mexicana. | 29 |
| Cuadro 6. | Eficiencia de los tratamientos (% de control) y densidad de plantas de <i>A. fatua</i> \pm EE en el experimento Ejido Nayarit. | 30 |
| Cuadro 7. | Eficiencia de los tratamientos (% de control) y densidad de plantas de <i>A. fatua</i> \pm EE en el experimento Ejido Sombrerete. | 31 |
| Cuadro 8. | Altura de plantas de <i>A. fatua</i> (en cm) \pm el EE en el experimento Ejido República Mexicana. | 32 |
| Cuadro 9. | Altura de plantas de <i>A. fatua</i> (en cm) \pm el EE en el experimento Ejido Nayarit. | 33 |
| Cuadro 10. | Altura de plantas de <i>A. fatua</i> (en cm) \pm el EE en el experimento Ejido Sombrerete. | 34 |
| Cuadro 11. | Eficiencia (%) y rendimiento de trigo \pm el error estándar en los experimentos. | 35 |
| Cuadro 1. | Herbicidas aplicados sobre <i>A. fatua</i> . | 43 |
| Cuadro 2. | Correlación entre los diferentes medios para evaluar el daño causado por los herbicidas en <i>A. fatua</i> en trigo por zona en el valle de Mexicali, B.C. | 45 |
| Cuadro 3. | Análisis de correlación entre los diferentes medios para evaluar el nivel de daño causado por los herbicidas sobre <i>A. fatua</i> en el cultivo de trigo considerando los datos de los tres experimentos en su conjunto. | 46 |
| Cuadro 1. | Efecto de tres concentraciones de pinoxaden sobre porcentaje de control en dos poblaciones de <i>Avena fatua</i> durante tres periodos de evaluación después de la aplicación de los tratamientos. | 57 |

| | |
|---|----|
| Cuadro 2. Efecto de tres concentraciones de pinoxaden sobre altura de planta en dos poblaciones de <i>Avena fatua</i> durante tres periodos de evaluación después de la aplicación de los tratamientos..... | 59 |
| Cuadro 3. Efecto de tres concentraciones de pinoxaden sobre el área verde (Índice GA) en dos poblaciones de <i>Avena fatua</i> durante tres periodos de evaluación después de la aplicación de los tratamientos..... | 61 |
| Cuadro 4. Efecto de tres concentraciones de pinoxaden sobre el área más verde (Índice GGA) en dos poblaciones de <i>Avena fatua</i> durante tres periodos de evaluación después de la aplicación de los tratamientos..... | 62 |
| Cuadro 5. Correlación de Pearson entre el porcentaje de control visual y herramientas digitales en dos poblaciones de <i>Avena fatua</i> procedentes del valle de Mexicali. | 63 |
| Cuadro 1. Análisis de varianza de medidas repetidas con arreglo factorial en el tiempo para el porcentaje de control de dos poblaciones de <i>Avena fatua</i> expuestas a tres concentraciones de pinoxaden y un testigo (solo agua). | 71 |
| Cuadro 2. Medias de los mínimos cuadrados para el porcentaje de control de dos poblaciones de <i>Avena fatua</i> expuestas a tres concentraciones de pinoxaden y un testigo. | 73 |
| Cuadro 3. Análisis de varianza con arreglo factorial para peso seco y índice de control de maleza (ICM) de dos poblaciones de <i>Avena fatua</i> expuestas a tres concentraciones de pinoxaden y un testigo (solo agua). | 75 |
| Cuadro 4. Medias de los mínimos cuadrados para peso seco e índice de control de maleza (ICM) de dos poblaciones de <i>Avena fatua</i> expuestas a tres concentraciones de pinoxaden y un testigo. | 76 |
| Cuadro 5. Análisis de varianza de medidas repetidas con arreglo factorial en el tiempo para NDVI, unidades SPAD y temperatura de dos poblaciones de <i>Avena fatua</i> expuestas a tres concentraciones de pinoxaden y un testigo (solo agua). | 78 |
| Cuadro 6. Medias de los mínimos cuadrados para NDVI de dos poblaciones de <i>Avena fatua</i> expuestas a tres concentraciones de pinoxaden y un testigo. | 79 |
| Cuadro 7. Medias de los mínimos cuadrados para contenido de clorofila (Unidades SPAD) de dos poblaciones de <i>Avena fatua</i> expuestas a tres concentraciones de pinoxaden y un testigo. | 80 |
| Cuadro 8. Correlación de Pearson entre el porcentaje de control visual y herramientas digitales en dos poblaciones de <i>A. fatua</i> | 81 |
| Cuadro 1. Ubicación de las localidades muestreadas en valle de Mexicali, B.C. | 88 |
| Cuadro 2. Concentraciones de herbicidas inhibidores de la ALS y ACCasa sobre la población susceptible de <i>A. fatua</i> | 90 |

| | |
|---|----|
| Cuadro 3. Concentración letal 50 y 90 de los herbicidas inhibidores de la ALS y ACCasa en <i>A. fatua</i> susceptible..... | 92 |
| Cuadro 4. Respuesta de <i>A. fatua</i> a concentraciones diagnóstico de herbicidas inhibidores de la ALS y ACCasa en la población Ej. Republica del valle de Mexicali..... | 93 |
| Cuadro 5. Respuesta de <i>A. fatua</i> a concentraciones diagnóstico de herbicidas inhibidores de la ALS y ACCasa en la población Ej. Nayarit del valle de Mexicali..... | 93 |
| Cuadro 6. Respuesta de <i>A. fatua</i> a concentraciones diagnóstico de herbicidas inhibidores de la ALS y ACCasa en la población Ej. Sombreroete del valle de Mexicali. | 94 |

RESUMEN

HERRAMIENTAS DIGITALES EN LA EVALUACIÓN DE HERBICIDAS INHIBIDORES DE LA ALS Y ACCasa Y RESISTENCIA DE *Avena fatua* L.

Andrés González Ruiz

La avena silvestre (*Avena fatua*) es una maleza importante en el cultivo de trigo a nivel mundial. En el Valle de Mexicali, B.C. es la principal maleza que causa pérdidas económicas en este cultivo y para su control se utilizan herbicidas inhibidores de Acetolactato Sintasa (ALS) y de la Acetil Carboxil Coenzima A (ACCasa). El objetivo de esta investigación fue evaluar las herramientas digitales en la efectividad de los herbicidas inhibidores de la ALS y ACCasa y confirmar la resistencia de *A. fatua*. Los experimentos se realizaron durante el ciclo otoño-invierno 2021-2022 en tres ejidos de dicho Valle (República Mexicana, Nayarit y Sombrerete). Los experimentos incluyeron herbicidas representativos de cada grupo. ALS estuvo compuesto por iodosulfuron, flucarbozone y pyroxsulam; ACCasa se integró por fenoxaprop y pinoxaden. Los experimentos se dispusieron en bloques completos al azar con cuatro repeticiones. Se realizó un análisis de varianza para control, densidad de malezas y rendimiento del cultivo; se estimó la eficiencia del control de malezas y el índice de maleza; para los instrumentos digitales se calculó la correlación con los valores registrados por los instrumentos de medición, incluida la observación visual. También se realizó un análisis de regresión lineal simple para inferir el valor de control visual a partir de los valores en los instrumentos digitales. En laboratorio se realizó un ensayo con dos poblaciones *A. fatua*, una procedente de campos de alfalfa y otra de trigo para conocer la susceptibilidad de estas poblaciones al herbicida pinoxaden con herramientas digitales y tres concentraciones de herbicida pinoxaden. Una vez finalizado los ensayos de campo, se recolectaron semillas de *A. fatua* que sobrevivieron a la dosis de campo para realizar ensayos de susceptibilidad y resistencia mediante dosis-respuesta y dosis diagnóstico. Los resultados de campo indicaron que el mejor grupo de herbicidas fue ACCasa. En el Ej. República y Nayarit, se obtuvieron resultados significativos en índice SPAD, NDVI, altura, densidad de plantas, porcentaje de control visual con los herbicidas fenoxaprop-p-etil y pinoxaden. En laboratorio se presentó mayor porcentaje de control, altura de planta, índice GA y índice GGA en la población de *A. fatua* proveniente de alfalfa en comparación con la población de trigo, indicando que pinoxaden tiene mayor fitotoxicidad para población de alfalfa. Los índices de vegetación para la población de alfalfa fueron inferiores en comparación con la población de trigo desde el 3 al 21 DDA y los valores de SPAD disminuyeron en ambas poblaciones. En los ensayos de resistencia la mayoría de las poblaciones presentaron resistencia a los herbicidas inhibidores de la ALS, pinoxaden a excepción del fenoxaprop-etil que no fue resistente en el Ej. Sombrerete.

Palabras clave: control de maleza, ALS, ACCasa, herramientas digitales, resistencia

ABSTRACT

DIGITAL TOOLS FOR EVALUATING ALS AND ACCase INHIBITOR HERBICIDES AND CONFIRMING RESISTANCE IN *Avena fatua* L.

Andrés González Ruiz

Wild oats (*Avena fatua*) are an important weed in wheat cultivation worldwide. In the Mexicali Valley, B.C., it is the main weed that causes economic losses in this crop and herbicides that inhibit Acetolactate Synthase (ALS) and Acetyl Carboxyl Coenzyme A (ACCase) are used to control it. The objective of this research was to evaluate digital tools in the effectiveness of ALS and ACCase inhibitor herbicides and confirm the resistance of *A. fatua*. The experiments were carried out during the fall-winter 2021-2022 cycle in three ejidos of said Valley (Mexican Republic, Nayarit and Sombrerete). The experiments included representative herbicides of each group. ALS was composed of iodosulfuron, flucarbozone and pyroxsulam; ACCase was composed of fenoxaprop and pinoxaden. The experiments were arranged in randomized complete blocks with four replications. An analysis of variance was performed for control, weed density and crop yield; weed control efficiency and weed index were estimated; for digital instruments, the correlation was calculated with the values recorded by the measuring instruments, including visual observation. A simple linear regression analysis was also performed to infer the visual control value from the values on the digital instruments. In the laboratory, a test was carried out with two *A. fatua* populations, one from alfalfa fields and another from wheat fields, to determine the susceptibility of these populations to the herbicide pinoxaden using digital tools and three concentrations of pinoxaden herbicide. Once the field tests were completed, *A. fatua* seeds that survived the field dose were collected to perform susceptibility and resistance tests using dose-response and diagnostic doses. The field results indicated that the best group of herbicides was ACCase. In the Republic and Nayarit exemplars, significant results were obtained in the SPAD index, NDVI, height, plant density, and percentage of visual control with the herbicides fenoxaprop-p-ethyl and pinoxaden. In the laboratory, a higher percentage of control, plant height, GA index, and GGA index were present in the *A. fatua* population from alfalfa compared to the wheat population, indicating that pinoxaden has greater phytotoxicity

for the alfalfa population. The vegetation indices for the alfalfa population were lower compared to the wheat population from 3 to 21 DAA, and SPAD values decreased in both populations. In the resistance tests, most of the populations were resistant to the ALS-inhibiting herbicides, pinoxaden, except for fenoxaprop-ethyl, which was not resistant in the Sombrerete exemplar.

Key words: weed control, ALS, ACCasa, digital tools, resistance

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

El trigo (*Triticum durum* L.) es uno de los cultivos económicamente más importantes para la región de Mexicali, Baja California, ocupando una superficie de siembra de 40,881 ha, con un rendimiento promedio de 6.33 t ha⁻¹ y un valor de producción de 2,140,819.60 millones de pesos durante el ciclo otoño invierno 2022 (SIAP, 2023).

La producción del cultivo de trigo en el valle de Mexicali se ve amenazada por malezas de hoja angosta: avena (*Avena fatua* L.), alpiste silvestre (*Phalaris minor* Retz.), sorgo voluntario (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) y los zacates Johnson (*Sorghum halepense* (L.) Pers.), zacate salado (*Distichlis spicata* (L.) Greene), zacate de agua (*Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv), zacate pinto (*Echinochloa colona* (L.) Link) y zacate grama (*Cynodon dactylon* (L.) Pers) (Herrera *et al.*, 2010).

La avena silvestre (*A. fatua*) es considerada una de las especies de malezas que afectan a los cultivos de invierno a nivel mundial (Alshallash, 2018; Tidemann, 2021) y en la región del valle de Mexicali es el principal factor que disminuye el rendimiento del cultivo de trigo (Herrera *et al.*, 2010). En estudios realizados en valle de Mexicali sobre periodos críticos de competencia de malezas en trigo, se reportó pérdidas del 90 % del rendimiento en grano si la competencia de avena silvestre se mantiene durante todo el ciclo de producción (Cruz *et al.*, 2004).

Debido al impacto de *A. fatua* en la economía de los agricultores de la región del valle de Mexicali, Baja California (Cruz *et al.*, 2004), los productores para el control de esta maleza utilizan herbicidas químicos, principalmente herbicidas postemergentes inhibidores de la Acetolactato Sintasa (ALS) y Acetil Coenzima A Carboxilasa (ACCase) (Qasem, 2007; Travlos *et al.*, 2011).

En consecuencia, al uso frecuente de los herbicidas inhibidores de ALS y ACCase para el control de *A. fatua* en el valle de Mexicali, es necesario evaluar la eficacia de estos herbicidas (Baghestani *et al.*, 2008; Qazizada *et al.*, 2022), para esto, por lo general se utiliza la escala propuesta por la Sociedad Europea de Investigación en Maleza (EWRS). Esto, debido a su facilidad de interpretación, bajo costo, su versatilidad en malezas y cultivos. Dicha escala

maneja tanto valores cualitativos como cuantitativos porcentuales que se pueden someter a análisis no paramétricos y paramétricos (Burril *et al.*, 1977). Existen varios estudios relacionados con el uso de dicha escala en varios cultivos y diferentes malezas (Travlos *et al.*, 2011; Bolaños *et al.*, 2018). Aunado a la escala visual cualitativa, existen otras alternativas que pueden ser útiles para medir los efectos causados por herbicidas, las cuales se pueden manejar como variables cuantitativas, tales son: altura de planta, producción de materia seca, densidad de plantas y el rendimiento en caso de tener cultivo infestado con maleza (Burril *et al.*, 1977; Scursoni *et al.*, 2011). Además de estas metodologías, existen tecnologías que pueden medir los efectos causados por este tipo herbicidas, como por ejemplo, el uso de imágenes termográficas, sensor GreenSeeker, sensor SPAD e imágenes tomadas con cámaras digitales, que pueden ser otras alternativas para medir la efectividad biológica de herbicidas en campo, pues tienen una amplia gama de aplicaciones enfocadas a trastornos fisiológicos causadas por agentes bióticos y abióticos (Lasa *et al.*, 2005; González-Torres *et al.*, 2009; Sankaran *et al.*, 2010; Gutiérrez-Soto *et al.*, 2011; Ishimwe *et al.*, 2014; De Almeida *et al.*, 2014; Da cunha *et al.*, 2015; Velasco-López *et al.*, 2019).

Una vez observada la falta de eficacia en campo, el siguiente paso es la cuantificación por medio de los ensayos dosis-respuesta, para el cálculo de la dosis efectiva (ED₅₀) (Brain y Cousens, 1989; Seber y Wild, 1989; Chism *et al.*, 1992; Streibig *et al.*, 1993). Así mismo, es necesario estudiar los mecanismos de resistencia implicados en la resistencia de malezas a herbicidas que incluyen los aspectos bioquímicos y moleculares, que son la base para elaborar un plan de manejo eficiente en campo (Cruz-Hipolito, 2010).

En el valle de Mexicali se han llevado a cabo este tipo de estudios, como por ejemplo las investigaciones realizadas por Tovar *et al.* (2008) quienes detectaron poblaciones resistentes de *A. fatua* para herbicidas inhibidores de ACCasa debido a la mutación de la ACCasa en esta maleza., la cual fue provocada por la sustitución de isoleucina por asparagina. Por otra parte, Tafoya *et al.* (2004) evaluaron seis poblaciones resistentes de *A. fatua* en la región Noroeste del País (valle de Mexicali, valle de Hermosillo y valle del Yaqui) encontraron que los biotipos correspondientes a Baja California y Sonora presentaron un alto Índice de Resistencia (IR) para el herbicida Clodinafop.

Actualmente *A. fatua* se ha convertido en uno de los problemas importantes para los agricultores del valle de Mexicali, Baja California por sus efectos sobre los rendimientos del cultivo de trigo, lo cual se sospecha que se relaciona principalmente a la falta de eficacia de los herbicidas inhibidores ALS y ACCasa utilizados para su control, por lo cual se justifica realizar estudios para corroborar este hecho y confirmar si existen poblaciones resistentes a estos herbicidas, así también incorporar herramientas digitales para como alternativas para la evaluación de la eficacia de herbicidas a nivel laboratorio y campo.

1.1. Hipótesis

1. Utilizar herramientas digitales podría representar alternativas para la evaluación de herbicidas inhibidores de la ALS y ACCasa en *A. fatua*.
2. Debido a la alta presión de selección impuesta por herbicidas inhibidores de la ALS y ACCasa en *A. fatua*, en el valle de Mexicali es posible que esta especie haya adquirido resistencia.

1.2. Objetivo general

Evaluar las herramientas digitales en la efectividad biológica de los herbicidas inhibidores de la ALS y ACCasa y confirmar los niveles de resistencia de *A. fatua*.

1.3. Objetivos específicos

1. Evaluar el efecto de los herbicidas inhibidores de ALS y ACCasa sobre *A. fatua* en trigo en el valle de Mexicali, B. C.
2. Evaluar el uso de las herramientas digitales en la medición de los efectos producidos por los herbicidas postemergentes inhibidores de la ALS y ACCasa sobre *A. fatua* en trigo.
3. Evaluar la efectividad biológica del herbicida pinoxaden sobre dos poblaciones de *A. fatua* mediante herramientas digitales a nivel de laboratorio.
4. Confirmar la resistencia a herbicidas inhibidores de ALS y ACCasa en tres poblaciones de *A. fatua* recolectadas en el valle de Mexicali, Baja California.

CAPÍTULO II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Importancia económica de *Avena fatua* L.

A. fatua es una de las más importantes malezas en cultivos de invierno incluida en una de las 10 peores malezas del mundo con pérdidas del rendimiento de hasta el 70 % en cereales (Mahajan y Chauhan 2022). En México esta maleza ha representado un factor limitante en la producción de trigo debido a las afectaciones que produce y a los casos de resistencia en los que está asociada (Cruz-Hipólito *et al.*, 2011). En el valle de Mexicali, Baja California *A. fatua* es el principal problema que afecta la producción de trigo con pérdidas del 90 % de rendimiento por efecto de competencia durante todo el ciclo productivo (Cruz *et al.*, 2004).

2.2 Características biológicas de *A. fatua*

La avena silvestre es una gramínea que posee una serie de características biológicas que hacen de ella una mala hierba altamente competitiva, en especial en los cereales de invierno. Dentro de las características descritas por Aibar (1987), se pueden destacar las siguientes:

a) La capacidad de **autoenterramiento** que poseen las semillas de avena silvestre. Esta característica es muy importante en suelos muy arcillosos, que suelen presentar frecuentes grietas, ya que la semilla, por sí misma, es capaz de alcanzar profundidades de hasta 25 cm, evitando accidentes que pudiera sufrir si estuviera en la superficie.

b) **Su capacidad de latencia.** La semilla de avena silvestre puede ser viable, en el suelo, hasta 8 años. Los factores por los que la semilla sale de su letargo son variables (humedad, temperatura, aporte de N, edad de la semilla, colocación a una profundidad adecuada, etc.) Esto obliga a plantear alternativas a largo plazo contra la avena silvestre, ya que aun consiguiendo evitar la reinfestación año tras año, la reserva de semillas que existe en el suelo puede mantener la infestación varios años (Aibar, 1987).

c) La latencia origina una germinación discontinua. La germinación de la avena silvestre no se produce de forma agrupada a lo largo del tiempo. Este escalonamiento provoca con frecuencia bajas eficacias en los tratamientos de herbicidas, ya que, si se aplican en fechas tempranas, aun

empleando herbicidas residuales, las semillas de avena que germinen posteriormente no serán afectadas por tal tratamiento, y si se efectúan en fechas tardías, las avenas que germinaron primero están muy desarrolladas, siendo lo suficientemente fuertes para resistir el tratamiento herbicida, aumentando además el riesgo de que el tratamiento afecte al cereal.

d) Otra característica importante que tiene *A. fatua* es la sensibilidad a la luz en la germinación de las semillas, es decir, se considera una especie **fotoblástica positiva** porque requiere luz para la germinación (Orozco, 1989; Lang, 2013),

e) La **similitud morfológica con cereales**. La cual dificulta la obtención de herbicidas selectivos con alta eficiencia. Por otro lado, el ciclo de *A. fatua* coincide con el de los cereales, por lo que los daños se producen desde los estados iniciales del cultivo. Por otra parte, la madurez de la semilla ocurre con algo de antelación a la de los cereales, por lo que parte de la semilla cae al suelo antes de la cosecha del cereal.

d) **Anatomía de las hojas**. la venación paralela facilita que las gotas de la solución aplicada resbalen en tanto que la disposición reticulada de las nervaduras ayuda a la retención de la solución. Así mismo las hojas colgantes de las gramíneas también facilitan la caída de la solución (Rojas, 1980).

e) **Similitud fisiológica con cereales**. Las características fisiológicas pueden afectar sin lugar a duda la capacidad de competencia maleza-cultivo, es decir, la ruta metabólica que presenta *A. fatua* es C3 por lo que los requerimientos metabólicos son muy similares a los del cultivo de trigo, cebada, centeno etc., y se vuelve una lucha intensiva por la obtención de agua, nutrientes, espacio y luz. Esta ruta metabólica implica mayores tasas de fotorrespiración, lo que provoca una demanda energética para ambas especies y, por tal situación, la competencia de los factores antes mencionados se vuelve crítica (Rojas, 1980; Giménez y Ríos 1992; Carril, 2011).

Las características biológicas de *A. fatua*, la hacen altamente competitiva contra cultivos de trigo y cebada, por ejemplo, en ausencia de competencia se pueden desarrollarse plantas muy grandes con una alta capacidad reproductiva (de 5 a 12 tallos y de 400 a 800 semillas por planta). Así mismo, las semillas de esta maleza pueden ser trasladadas a grandes distancias mediante diversas actividades realizadas por el hombre; por ejemplo, a través de semillas de cultivos para la siembra y para la alimentación para el ganado, con la maquinaria agrícola, en sacos, paja, heno o ensilado.

La avena silvestre puede causar serias reducciones del rendimiento cuando se encuentra alrededor del estadio de 3- 4 hojas verdaderas en los cultivos de cebada y trigo (García, 1996). Por otro lado *A. sterilis* es otra especie que se encuentra muy distribuida en campos de trigo y cebada, en algunos países como Grecia se ha considerado un problema grave, pues su frecuencia oscila en 83 a 91 % (Travlos *et al.*, 2008). Las afectaciones en cultivos antes citados son similares, sin embargo, en un estudio reportado por Dhima *et al.* (2010) mencionan que *A. sterilis* en competencia con diferentes cultivares de cebada sembrados en seis y dos hileras afecta la capacidad de amacollamiento y la producción de materia fresca de un 21 y 28 %, respectivamente. Este mismo autor señala que la competencia de *A. sterilis* y *A. procumbens* puede afectar el rendimiento en un 26 y 65 %.

2.3. Métodos de control de *A. fatua* en trigo

Para el control de *A. fatua* en trigo se tienen diversos métodos para su manejo dentro de los cuales se distingue:

Métodos preventivos: Una de las estrategias más importantes en el manejo de malezas es la prevención de la introducción y propagación. Los métodos preventivos implican todos los medios posibles que restringen la entrada y el establecimiento de malezas (Mahajan *et al.* 2016).

Métodos culturales: Las rotaciones de cultivos se pueden utilizar como un objetivo para minimizar el costo y aumentar la eficiencia del control de malezas al intercalar cultivos en los que se puede lograr el control. Cada cultivo permite que una maleza particular establezca su asociación. Estas malezas particulares se encuentran en diferentes rotaciones y se controlan rotando los cultivos que tienen diferentes hábitos culturales y ciclos de vida (Kumar *et al.*, 2017).

Métodos químicos: El control químico de malezas generalmente se considera la herramienta más importante, rápida y rentable para el control de *Avena* spp. (Beckie *et al.*, 2002). Generalmente se utilizan herbicidas inhibidores de la ACCasa (grupo 1) y ALS (grupo 2). Sin embargo, la excesiva dependencia a dicho herbicidas, las especies de avena silvestre han desarrollado resistencia en ambos mecanismos de acción antes mencionados (Cruz-Hipólito *et al.*, 2011; Beckie *et al.*, 2012).

Alelopatía: es un fenómeno que ocurre naturalmente en los ecosistemas agrícolas y que se ha destacado como una alternativa potencial al manejo químico de malezas. Los aleloquímicos retardan el crecimiento de las plantas al suprimir sus funciones fisiológicas cuando se aplican en

altas concentraciones. La supresión del crecimiento de las malezas es causada por la actividad fitotóxica de los aleloquímicos (Farooq *et al.*, 2013). En estudios realizados por Bajwa *et al.* (2013) informaron sobre la supresión de la germinación y el crecimiento de avena silvestre con la aplicación de extractos de agua de algunas malezas y plantas arbóreas, aplicados individualmente o en combinación.

2.4. Grupos de herbicidas recomendados para el control de maleza en cereales

Los herbicidas más comunes y usados a nivel mundial en cultivos cereales de invierno se encuentran representados por solo dos mecanismos de acción conocidos como inhibidores de la ACCasa y ALS (Cobb y Reade, 2010).

2.5. Herbicidas inhibidores de la Acetil Coenzima A Carboxilasa (ACCasa)

Los Ariloxifenoxipropionatos (APPs), las Ciclohexanodionas (CHDs) y los Dens son tres de los más importantes grupos de herbicidas utilizados en post-emergencia para controlar gramíneas en cultivos de cereales y dicotiledóneas (Crop Protection, 2004; Hoffer *et al.*, 2006 y Raffel *et al.*, 2006). Las tres familias de herbicidas son graminicidas selectivos; esta selectividad ha sido encontrada en estudios de la incorporación de ¹⁴C-acetato a nivel de cloroplastos y en los hechos a nivel de ACCasa. Sin embargo, aunque se conoce que la ACCasa de las dicotiledóneas son insensibles a estos herbicidas y que la de gramíneas son generalmente muy sensibles, la ACCasa de diferentes plantas no muestra el mismo grado de sensibilidad. Esta diferencia en la sensibilidad de la enzima es un mecanismo interesante en la selectividad de los herbicidas, muy diferente al mecanismo más común de tolerancia que es debida a la detoxificación del herbicida. Además, no todos los tejidos de una especie de planta son igualmente sensibles a dichos herbicidas. Los estudios llevados a cabo en este respecto concluyen que la ACCasa se encuentra presente en células en división y en cloroplastos activos (Délye, 2005; Ashton *et al.*, 1994; Kobek *et al.*, 1998). De acuerdo con esto, los síntomas provocados por la acción del herbicida son observados más fuerte y más rápidamente en regiones meristemáticas y en cloroplastos.

Los efectos secundarios de la acción del herbicida, a nivel molecular, incluyen clorosis (inhibición de la biosíntesis de clorofila y de carotenoides), alteración en la distribución de ácidos grasos de cadena larga en el cloroplasto (disminución de C-18 e incremento de £ C-16) e inhibición de la

síntesis de ADN y de la mitosis a nivel celular. Este daño a nivel de cloroplasto podría ser seguido por una perturbación en la membrana (Cobb y Reade, 2010). La pérdida de la función de la membrana da lugar a una “mezcla intracelular” donde las enzimas catabólicas y sus sustratos, que normalmente están separados en distintos compartimentos en el interior celular, entren en contacto (Alvarado, 2007). La estructura de estos dos grupos de herbicidas es diferente, pero las similitudes en su actividad tanto a nivel de planta entera como a niveles fisiológicos y bioquímicos sugiere que deben compartir algunas estructuras responsables de su actividad herbicida (Cobb y Reade, 2010).

Los APPs se caracterizan por tener dos grupos arilo, uno de los cuales está invariablemente sustituido con un grupo isopropilo en posición 1. Este grupo contiene un grupo quiral, lo que se traduce en la presencia de dos enantiómeros R (+) y S (-). De estos dos isómeros ópticos, solo el R (+) es activo como herbicida (Gerwick *et al.*, 1988), aunque el S (-) posee cierta actividad biológica (Shimabukuro, 1990). El segundo grupo arilo presenta una gran variabilidad química, tanto en la estructura del anillo (grupos fenoxi, benzoxazoliloxi, quinoxaliniloxi o piridiniloxi) como en los sustituyentes del mismo (cloro o trifluorometilo). Esta variabilidad en la estructura resulta en una amplia gama de herbicidas con diferente actividad biológica y selectividad.

Los APPs son generalmente aplicados en postemergencia. Para facilitar su penetración a través de la cutícula foliar, suelen formularse como ésteres de sus correspondientes ácidos. Si bien los ésteres de APPs tienen cierta actividad fitotóxica, son considerados como pro-herbicidas. Estos son rápidamente activados a su forma ácida por hidrólisis mediante esterasas una vez dentro del tejido vegetal (Shimabukuro *et al.*, 1979). Las formas ácidas de los APPs son ácidos débiles, sin embargo, no poseen la gran movilidad vía floema que presentan los ácidos débiles con actividad herbicida (Devine y Shimabukuro, 1994) debido a su carácter generalmente lipofílico. Una vez activados, los APPs son translocados a las regiones meristemáticas, donde ejercen su función herbicida (Brezeanu *et al.*, 1976; Duke y Kenyon, 1988; Walker *et al.*, 1989; Hoppe, 1989), siendo sus síntomas fitotóxicos más visibles la clorosis de las hojas en desarrollo, la parada del crecimiento y la necrosis de los meristemas en tallos y hojas (Brezeanu *et al.*, 1976; Duke y Kenyon, 1988).

2.6. Herbicidas inhibidores de la Acetolactato sintasa (ALS)

Las sulfonilureas como potentes inhibidores de la ALS se describieron por científicos de Dupont a mediados de los 70 (Levitt, 1978). Desde entonces cientos de compuestos han sido identificados

como inhibidores de esta enzima. En la década de los 80, American Cyanamid desarrolló una serie de herbicidas con estructura de imidazolinona que también inhibían la ALS (Shaner *et al.*, 1984) Se conoce que esta enzima es el sitio de acción de varias familias de herbicidas de gran importancia en la agricultura moderna, entre los que se incluyen, además de las sulfonilureas y las imidazolinonas, las triazolopirimidinas, los pirimidiniltiobenzoatos y sulfonilaminocarboniltriiazolinonas (Kishore y Shah, 1988; Hawkes, 1989; Devine y Eberlein, 1997; Devine y Eberlein, 1997; HRAC, 2002).

Los herbicidas que inhiben la ALS han tenido un gran éxito dentro de la agricultura moderna, no solo por su alta eficacia, sino también por su baja toxicidad en mamíferos y su bajo impacto ambiental, así como una amplia selectividad de cultivos y gran número de formulaciones indicadas tanto para pre- como para post-emergencia. Así, en la actualidad este es el grupo con mayor número de ventas en el mercado (Heap, 2010).

Las sulfonilureas pueden usarse tanto en pre como en post-emergencia en una amplia variedad de cultivos (Beyer *et al.*, 1988), siendo rápidamente absorbidos tanto por la raíz como por las hojas y traslocados vía floema y xilema. Su estructura básica consiste en X-SO₂-NH-CO-NH-Y, donde X es normalmente un grupo fenilo e Y es un anillo pirimidina o triazina. La actividad biológica de estos herbicidas es muy alta, con dosis de campo que pueden llegar a ser de 2g ha⁻¹. Esta alta eficacia en campo también se refleja *in vitro* en donde la actividad ALS requiere concentraciones del rango nano molar para su inhibición. En contraste, su toxicidad en animales es muy baja (ej. el clorsulfuron en ratas tiene un LD50 de aproximadamente 6 g por kg de peso). Estos inhibidores se unen con una cinética lenta y en un lugar fuera de los sitios de unión de los sustratos, por lo que deben actuar como factores alostéricos (Schloss *et al.*, 1988; Ibdah *et al.*, 1996). En algunos casos se ha encontrado que estas mutaciones afectan a la afinidad por el sustrato o a la sensibilidad por la regulación feedback por los aminoácidos producto de esta ruta (Devine y Shukla, 2000).

2.7. Características selectivas del cultivo de trigo a los herbicidas inhibidores de ALS y ACCasa

El cultivo de trigo, al igual que otras gramíneas como el arroz o la cebada, posee características fisiológicas que lo hacen selectivo de forma natural a ciertos herbicidas. Dicha selectividad se le atribuye a procesos fisiológicos y metabólicos que involucran sistemas enzimáticos que permiten

degradar a los herbicidas. En el caso específico de los herbicidas utilizados para el control de malezas de hoja angosta, como es el caso de los inhibidores de la Acetolactato Sintasa (sulfonilureas [SU]), imidazolinonas [IMI], triazolopirimidinas [TP], pirimidinil-benzoatos [PYB], y sulfonilamino-cabonil-triazolinonas [SCT]), la selectividad se debe a una capacidad de metabolización diferencial entre el cultivo y la maleza. Mientras que los herbicidas inhibidores de la Acetil Coenzima A Carboxilasa (ariloxifenoxipropionatos, ciclohexanodionas, y fenilpirazolinas) la selectividad entre el trigo tolerante y *Avena fatua* puede ser una función de su colocación en la planta y la tasa de metabolismo del herbicida, pero, la capacidad del trigo para desintoxicar el herbicida mediante hidroxilación de arilo, es el factor selectivo primario (Shimabukuro *et al.*, 1979). El metabolismo del ácido de estos herbicidas en el trigo es catalizado por la hidroxilasa dependiente del citocromo P450, mediante una metabolización tipo conjugación (Cobb y Reade, 2010).

2.8. Protectores para herbicidas

Los protectores de herbicidas, también denominados antídotos, son sustancias químicas que, cuando se aplican antes o con herbicidas, aumentan la tolerancia del herbicida en los cereales. Esta actividad se conoce desde la década de 1970 y el efecto protector no se ve en las malezas. Como algunos protectores pueden mostrar homología estructural con herbicidas, anteriormente se pensaba que competían con la molécula de herbicida por el sitio objetivo (Cobb y Reade, 2010). Ahora se sabe que su efecto protector resulta de una mejora general de los procesos de desintoxicación, incluida la inducción de:

- ✓ P450 oxigenasas
- ✓ Glutación S - transferasas
- ✓ Glucosiltransferasas
- ✓ Transporte al vacío
- ✓ Síntesis de glutación
- ✓ Peróxido de glutation
- ✓ Asimilación de sulfato

Dado que un cultivo tiene que mostrar cierto grado de tolerancia al herbicida para que este sea seguro, parecería que el proceso es un mecanismo de "recarga" para las rutas de desintoxicación

que ya están operativas. A pesar del considerable interés en los protectores, sus actividades se han demostrado principalmente en gramíneas, especialmente maíz, trigo, sorgo y arroz (Cobb y Reade, 2010).

2.9. Importancia de las buenas prácticas en las aplicaciones de herbicidas en trigo

El éxito en las aplicaciones de herbicidas en cualquier cultivo radica principalmente en tomar en cuenta todas las consideraciones, recomendaciones, características y propiedades que las empresas ofrecen para el buen uso de dichos productos, con la finalidad de tener el máximo provecho de su acción, ya que, por ser compuestos químicos que producen un impacto ambiental, se debe justificar su rentabilidad a dicho impacto (Arias *et al.*, 2019). Por otra parte, la falta de conocimiento y capacitación en la implementación de los métodos correctos de aplicación de herbicidas pueden traer consigo, la falta de eficacia y efectividad biológica de estos productos por lo que consecuentemente se tienen pérdidas económicas y aumento en los costos de producción del cultivo a producir (Palacio y Urriola, 2013). Abramoff (2018) afirma que la efectividad de un producto es influenciada en un porcentaje cercano al 70 % por la correcta aplicación. La eficiencia es la relación que existe entre la cantidad de producto que efectivamente llega al objetivo (producto depositado) y la cantidad de caldo (producto más agua) aplicado; se expresa en porcentaje y cuanto más cercana a 1 (uno) sea esta relación, mayor será la eficiencia lograda. En el período que va desde la preparación del producto hasta que ejerce su acción en las plagas, hay una serie de pérdidas y transformaciones que impactan en forma negativa en la efectividad de los productos fitosanitarios y también sobre la salud humana y el agroecosistema. Es así que la eficiencia del herbicida es afectada por una cadena de factores o variables que interactúan y que se pueden agrupar en: momento oportuno (desde el punto de vista tanto de la plaga como del cultivo), producto adecuado, condiciones meteorológicas, maquinaria (tecnología de aplicación) y capacitación del operario (encargado de hacer la aplicación).

A continuación, se describen en forma más detallada las variables o factores que condicionan la eficiencia en la aplicación de los productos fitosanitarios reportados por Abramoff, (2018):

1. Momento oportuno: Está relacionado tanto con el cultivo como con la plaga. Es imprescindible hacer la aplicación en el momento oportuno (Jalil Maluf *et al.*, 2015) y que el producto sea distribuido lo más uniformemente posible sobre la superficie a tratar. En cuanto al cultivo, para

decidir el momento más apropiado de aplicación, es necesario conocer su fisiología, disposición de las hojas, volumen del dosel y el estado fenológico, En referencia a la/s plaga/s, es preciso conocer las características y estado de desarrollo de ella, su localización, su momento de mayor vulnerabilidad y los umbrales y niveles de daño económico (UDE y NDE). Errores de diagnóstico en los UDE, falta de conocimiento del momento de mayor vulnerabilidad de las plagas y momento adecuado del cultivo pueden inducir a graves errores. En este sentido, una ayuda clave y de la cual no se puede ni debe prescindir, es el monitoreo.

2. Producto: La cantidad de sustancia activa requerida por unidad de superficie es muy pequeña en la mayoría de los casos, por lo tanto, resultaría casi imposible, en la práctica, lograr una distribución adecuada; es por eso que los productos se diluyen. Hay que tener en cuenta:

- ✓ Tipo y composición del agroquímico en cuanto a sus activos y aditivos.
- ✓ Dosis adecuada según recomendaciones: sub dosificación o sobre dosificación conllevan problemas como un control deficiente y resistencia de las plagas en el primer caso, y fitotoxicidad, desequilibrios en el agroecosistema y una relación inadecuada costo-beneficio en el segundo.
- ✓ Rotación de principios activos y modos de acción.
- ✓ Fecha de vencimiento.
- ✓ Otras características como: banda toxicológica, residualidad, compatibilidad, etc.

3. Condiciones meteorológicas: Las condiciones imperantes en el momento de hacer la aplicación son fundamentales, sobre todo cuando son extremas, como, por ejemplo, si se aplica con altas temperaturas y baja humedad relativa. El viento, las lluvias y la inversión térmica también afectan la efectividad.

4. Capacitación del operario: La maquinaria está estrechamente vinculada con la capacitación del operario, ya que cuanto mayor sea el conocimiento mayor será la responsabilidad e idoneidad para aplicar el tratamiento y, como consecuencia, disminuirán los posibles errores que afectarían la eficiencia. Asimismo, cuando se va a hacer una aplicación, es necesaria la supervisión por parte de un ingeniero agrónomo, situación que en la mayoría de los casos no se cumple.

5. Maquinaria: El proceso de aplicación de un producto implica una amplia cadena de aspectos técnicos, que van desde la limpieza del tanque, a la mezcla de los productos que aplicarán, la

aplicación, el transporte hasta el blanco, el ingreso al blanco del producto (impactos o número de gotas cm^{-2}) y, finalmente, la acción biológica de los productos. Con relación a la maquinaria, se debe considerar un conjunto de factores para lograr que una pulverización sea eficiente. Entre los más significativas se puede nombrar a los siguientes:

- ✓ Pulverizadora y técnica de aplicación adecuada según el producto y cultivo a tratar.
- ✓ Control y preparación del equipo: estado general, revisión de todos los componentes, filtros en buen estado y limpios, limpieza del tanque, correcta elección de las pastillas, control del caudal que arrojan y de la presión efectiva que llega al pico.
- ✓ Calibración del equipo: es necesario calcular cuánto gasta el equipo (volumen/ha o kg/ha) en cada situación particular.
- ✓ Calidad del agua. No se le suele dar la suficiente importancia por ser un elemento barato y abundante, pero si no se tienen en cuenta los valores de dureza, pH y turbidez, la efectividad de un producto fitosanitario puede afectarse.
- ✓ Mezcla de productos fitosanitarios: la mayoría de los productos se desarrollaron para ser aplicados solos y no combinados con otros. Sin embargo, se empezaron a utilizar las mezclas por diferentes razones: para ampliar el espectro de control, para bajar el número de aplicaciones, lo cual baja los costos (mezclando un fungicida con un herbicida y un insecticida), para obtener sinergismo en algunos productos o para lograr mayor residualidad.
- ✓ Tamaño y uniformidad de gotas: Según estudios realizados por equipos técnicos del INTA, una de las variables que más afecta los resultados de una aplicación es la regulación del tamaño de gotas, sobre todo en los casos de alto caudal (Cricco, 2010). Al aplicar el producto normalmente llega al lugar preciso mediante la gota pulverizada. Y es precisamente ese momento de formación de esta gota donde comienza el proceso de pérdidas, ya que no se forman todas gotas de tamaño uniforme, y las más pequeñas (de los 10 a 20 μ) no son manejables, produciendo efectos de deriva.
- ✓ Uso de coadyuvantes: Independientemente de los coadyuvantes que forman parte integrante de las formulaciones de productos fitosanitarios.
- ✓ Mínimas derivas: existen muchas definiciones, pero la deriva se puede explicar diciendo que es el movimiento de gotas que, por diferentes factores, caen fuera del área a tratar o dentro del área, pero no en el blanco, provocando daño a la vegetación en algunos casos, al

hombre, a la vida silvestre como también al ecosistema y disminuyendo la eficiencia del control.

2.10. Métodos para evaluar la efectividad de los herbicidas en campo

En la mayoría de las evaluaciones de efectividad biológica de herbicidas en campo, es muy utilizada la escala propuesta por la Sociedad Europea de Investigación en Maleza (EWRS), por su facilidad de interpretación, bajo costo, versatilidad en malezas y cultivos. Dicha escala es de valores cualitativos y cuantitativos porcentuales, que se pueden someter análisis no paramétricos y paramétricos. Aunado a esta escala visual, existen otras variables como son: altura de planta, producción de materia fresca, seca, densidad de plantas m^{-2} y finalmente el rendimiento en caso de tener cultivo infestado con maleza, que pueden ser útiles para medir los efectos causados por herbicidas (Burril *et al.*, 1977).

2.11. Herramientas digitales para evaluar la efectividad de herbicidas

Existen estudios que reportan uso de diferentes tecnologías para medir estrés causado por factores bióticos y abióticos, dentro de estos destacan, el uso de imágenes termográficas, sensor GreenSeeker, sensor SPAD e imágenes tomadas con cámaras digitales que pueden ser otras alternativas para medir la efectividad biológica de herbicidas en campo, pues tienen una amplia gama de aplicaciones en la actualidad. Una de ellas es la utilización del sensor GreenSeeker para diferenciar plantas sanas de aquellas que presentan algún tipo de desorden fisiológico causado por algún estrés en campo mediante un índice numérico (NDVI), ya que las plantas sanas y vigorosas absorben más luz roja y reflejan más luz infrarroja que aquellas con problemas de este tipo, lo cual es captado por dicho instrumento (Gutiérrez-Soto *et al.*, 2011).

Por otra parte, se han utilizado imágenes térmicas infrarrojas para diagnosticar el estrés hídrico, evaluar la calidad de semillas, detección de enfermedades en plantas. Dicha tecnología podría emplearse para evaluar los daños causados por herbicidas postemergentes, pues se fundamenta en medir daños físicos, trastornos fisiológicos, así como el proceso de crecimiento de semillas, plántulas y plantas en el interior de los viveros e invernaderos (Ishimwe *et al.*, 2014; Sankaran *et al.*, 2010; Vargas, 2015). En el mismo sentido, los medidores del índice relativo de clorofila (SPAD), son muy utilizados para diagnosticar la nutrición nitrogenada en muchos cultivos (Figuroa, 2013; Lasa *et al.*, 2005; Da cunha *et al.*, 2015; Sorbet, 2013), se han utilizado para

determinar el estrés hídrico a partir de la pigmentación fotosintética en diferentes cultivares de caña de azúcar (De Almeida *et al.*, 2014), por lo que podrían ser empleados en la medición de estrés causado por herbicidas, es decir, al medir de forma indirecta el contenido relativo de clorofila en las plantas, este puede detectar a su vez la ausencia de dicho pigmento por los efectos que causan los herbicidas inhibidores de la ALS y ACCasa (Cobb y Reade, 2010).

Finalmente, el uso de cámaras digitales en la actualidad podría representar una alternativa adicional a las anteriores mencionadas. Esta tecnología determina índices de vegetación GA (Green Area= Área verde) y GGA (Green Great Area= Área muy verde) a partir de fotos con cámaras convencionales utilizando un software Breedpix® 0.1, de esta manera se estimaría el control de maleza a partir del incremento o disminución de la vegetación (Velasco-López *et al.*, 2019).

2.12. Niveles de resistencia y mecanismos de resistencia de *A. fatua* para los herbicidas ALS y ACCasa

Existen muchos reportes de casos de resistencia a los herbicidas con mecanismos de acción ACCasa y ALS en una gran variedad de especies de maleza, dentro de ellos se pueden destacar los mencionados por Cruz-Hipólito *et al.* (2011), quienes confirmaron el carácter resistente de *P. paradoxa* a las familias de herbicidas ariloxifenoxipropionato (APP), ciclohexanodiona (CHD) y fenilpirazolina (PPZ), en este estudio sugiere que dicha especie confirió resistencia cruzada a las familias de herbicidas antes mencionadas. Por otra parte, este mismo autor evaluó dos biotipos de *A. fatua*, uno procedente de México y otro de Chile, ambos biotipos presentaron diferencias en cuanto a resistencia entre familias. El biotipo de *A. fatua* procedente de México fue altamente resistente a los herbicidas APP y CHD, pero susceptible al pinoxaden, siendo la concentración letal 50 similar al del biotipo susceptible. Así mismo, el biotipo procedente de Chile, solo fue resistente a fenilpirazolina.

Tovar *et al.* (2008) evaluaron poblaciones de *A. fatua* en el Valle de Mexicali, Baja California sospechosas y sensibles a herbicidas inhibidores de la ACCasa (Fenoxaprop y Clodinafop). En dicho estudio se determinó a oligonucleótidos VRDICGM, VRDITRGM, ACVRG1GM y ACVRG1RGM responsables en la mutación de la ACCasa en *A. fatua.*, que origina la sustitución de isoleucina por asparagina mediante estudios moleculares.

Vigna *et al.* (2011) evaluaron los herbicidas inhibidores de la ACCasa (clodinafop-propargil, diclofop-metil, fenoxaprop-p-etil y pinoxaden +cloquintocet –mexil), en distintas poblaciones de

A. fatua en diferentes localidades. Los autores indican que las poblaciones distantes geográficamente mostraron tolerancia a herbicidas inhibidores de la ACCasa, sin embargo, las poblaciones resistentes y sensibles evaluadas eran de sitios adyacentes. Finalmente, todas mostraron un nivel de resistencia muy alto a Diclofop, pero varió para los otros herbicidas según las poblaciones. La resistencia se manifestó a herbicidas del grupo de los inhibidores de la enzima ACCasa, sin embargo, se observaron diferencias de actividad entre los ariloxifenoxipropiónicos y el derivado fenilpirazolinona. En otra investigación realizada por Beckie *et al.* (2012) en Canadá se evaluaron 16 poblaciones de *A. fatua* con la finalidad de describir los sitios objetivos y no objetivos que confieren resistencia a los inhibidores de la ACCasa y ALS. En dicha investigación se utilizaron los herbicidas inhibidores de ACCasa: fenoxaprop, clodinafop, quizalofop (ariloxifenoxipropionato [APP]), sethoxidim, tralkoxydim, clethodim (ciclohexanodiona [CHD]) y pinoxaden (fenilpirazolinona [PPZ]); y los inhibidores de ALS imazamethabenz, imazamox (imidazolinona [IMI]) y flucarbazona (sulfonilaminocarboniltriazolinona [SCT]) y encontraron poblaciones con mutaciones en un solo sitio objetivo (ACC1) para ACCasa, las cuales fueron: Ile1781Leu, Asp2078Gly, Trp2027Cys, Cys2088Arg, Gly2096Ser, Trp1999Cys y Ile2041Asn. Papapanagiotou *et al.* (2015) en un estudio sobre mutaciones de la ACCasa, revelaron resistencia cruzada de 24 poblaciones de *A. sterilis* a los herbicidas inhibidores de ACCasa, dichas mutaciones fueron: Ile-1781-Leu, Trp-1999-Cys, Trp-2027-Cys, Ile-2041-Asn, Cys -2088Arg y Asp-2078-Gly sustituciones de aminoácidos en la enzima ACCasa. Uludag *et al.* (2007) encontraron siete de 20 poblaciones examinadas de *A. sterilis*, las cuales se consideraron resistentes a fenoxaprop con un rango de índice de resistencia entre 2.41 y mayor a 8. En otro estudio descrito por Hassanpourbourkheili *et al.* (2021) confirmaron la resistencia, mecanismos y patrones de resistencia de 22 poblaciones de *A. sterilis* al herbicida haloxyfop-R-methyl, en este trabajo solo cinco poblaciones resultaron resistentes a dicho herbicida en los ensayos de dosis-respuesta, mientras que en los ensayos moleculares el resultado del PCR indicó cinco puntos de mutación de 1781, 1999, 2027, 2041 y 2078, el cual demostró que en todos los biotipos resistentes se amplificó el fragmento asociado con la mutación Ile-2041-Asn, lo que sugiere la presencia del alelo Ile-2041-Asn. Dado que no se observaron otras bandas en otros puntos estudiados, Ile-2041-Asn es la única mutación conocida que confiere resistencia en los biotipos estudiados.

En el caso de los inhibidores de la ALS, se encontraron solo dos poblaciones con mutaciones en Ser653Thr y Ser653Asn, por lo que se considera el primer reporte de mutaciones en el sitio ALS

de especies de avena. Por parte, de los sitios no objetivo (metabolismo), los resultados de este experimento sugieren que el metabolismo por las monooxigenasas del citocromo P450 desempeña un papel en la resistencia de estas poblaciones de *A. fatua* a los inhibidores de ACC y ALS. En otra investigación, se reportaron estudios que mencionan sustituciones o mutaciones en el sitio de acción para los mecanismos ALS (Ser-653-Asn/Thr) y ACCasa (Ile-1781-Leu, Trp-1999-Cys, Trp-2027Cys, Ile-2041-Asn, Asp-2078-Gly, Cys-2088-Arg, Gly-2096-Ser) en *A. fatua*. (Vrbničanin *et al.*, 2017; Cruz-Hipólito *et al.*, 2011).

CAPÍTULO III. HERBICIDAS INHIBIDORES DE ACETOLACTATO SINTASA Y ACETIL CARBOXIL COENZIMA A EN *Avena fatua* L. (Artículo aceptado por la Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas)

Andrés González-Ruiz¹, Carlos Enrique Ail-Catzim², Carlos Alfonso López-Orona¹, Raymundo Medina-López¹, Mitzi Dayanira Estrada-Acosta¹, Guadalupe Alfonso López-Urquidez^{1, §}

¹Universidad Autónoma de Sinaloa, Facultad de Agronomía. Carretera Culiacán-Eldorado km. 17.5, CP. 80398, Culiacán, Sinaloa, México. (ag_ruiz2009@hotmail.com; clopezorona@uas.edu.mx; raymedinalop@hotmail.com; mitziestrada@uas.edu.mx; alfonsolopezurquidez@uas.edu.mx). ²Universidad Autónoma de Baja California, Instituto de Ciencias Agrícolas. Carretera Delta Oaxaca s/n C.P. 21705. Ejido Nuevo León, Mexicali, Baja California. (carlos.ail@uabc.edu.mx).

§Autor para correspondencia: alfonsolopezurquidez@uas.edu.mx

Resumen

Avena fatua es una maleza muy importante en trigo a nivel mundial. Esto también ocurre en el valle de Mexicali, B.C. donde se utilizan herbicidas inhibidores de Acetolactato Sintasa (ALS) y de la Acetil Carboxil Coenzima A (ACCasa) para controlar a esta gramínea. En la búsqueda de la mejor alternativa para el productor, en esta investigación, se tuvo como objetivo estimar la eficiencia de estos dos grupos de herbicidas para controlar *Avena fatua*. Los ensayos se realizaron durante el ciclo otoño-invierno 2021-2022 en tres ejidos de dicho valle (República Mexicana, Nayarit y Sombrerete). Los experimentos incluyeron herbicidas representativos de cada grupo. ALS estuvo compuesto por iodosulfuron, flucarbozone y pyroxsulam; ACCasa se integró por fenoxaprop y pinoxaden. Los experimentos se dispusieron en bloques completos al azar con cuatro repeticiones. Se realizó un análisis de varianza para control, densidad de malezas y rendimiento del cultivo; se midió la eficacia de los herbicidas mediante un modelo de regresión no lineal; se estimó la eficiencia del control de malezas y el índice de maleza. Los resultados indican que el mejor grupo de herbicidas fue ACCasa. Por ejemplo, en la proyección del nivel de daño, en experimento República Mexicana, se tiene $\text{fenoxaprop} = 77.16 + 0.78 * \text{DDA} - 0.009 * \text{DDA}^2$, es decir, el daño en la maleza incrementa ligeramente a través del tiempo, al menos hasta los 56 DDA.

Al contrario, mesosulfuron pierde eficiencia de 6.41% diario en la segunda etapa del periodo evaluado: $138.20-6.41*DDA+0.07*DDA^2$. En eficiencia en el mismo sitio, fenoxaprop tiene 83.15% y Iodosulfuron solo 37.5%.

Palabras clave: control de maleza, efectividad biológica, rendimiento, resistencia.

Abstract

Avena fatua is a very important weed in wheat worldwide. This also occurs in the Mexicali Valley, B.C. where Acetolactate Synthase (ALS) and Acetyl Coenzyme A (ACCase) inhibitor herbicides are used to control this grass. In the search for the best alternative for the producer, in this research, the objective was to estimate the efficiency of these two groups of herbicides to control *Avena fatua*. The trials were carried out during the 2021-2022 autumn-winter cycle in three ejidos in said Valley (Mexican Republic, Nayarit and Sombrerete). The experiments included herbicides representative of each group. ALS was composed of iodosulfuron, flucarbozone, and pyroxsulam; ACCase was integrated by fenoxaprop and pinoxaden. The experiments were arranged in complete randomized blocks with four repetitions. An analysis of variance was carried out for control, weed density and crop yield; The effectiveness of herbicides was measured using a non-linear regression model; Weed control efficiency and weed index were estimated. The results indicate that the best group of herbicides was ACCase. For example, in the projection of the level of damage, in the Mexican Republic experiment, we have $fenoxaprop = 77.16+0.78*DDA-0.009*DDA^2$, that is, the damage to the weed increases slightly over time, at least until the 56 ADA. On the contrary, mesosulfuron loses efficiency of 6.41% daily in the second stage of the evaluated period: $138.20-6.41*DDA+0.07*DDA^2$. In efficiency at the same site, fenoxaprop has 83.15% and Iodosulfuron only 37.5%.

key words: Biological effectiveness, weed control, yield, resistance.

3.1. Introducción

La avena silvestre (*Avena fatua* L.) es una de las especies de malezas que más afecta a los cultivos de invierno a nivel mundial (Tidemann *et al.*, 2021). Así mismo, es una de las principales en la región del valle de Mexicali en el cultivo de trigo (Herrera Andrade *et al.*, 2010). Para resolver este problema en los cultivos, se utilizan diferentes estrategias, incluido el uso de químicos sintéticos (Gao y Su, 2024). Para controlar *Avena fatua* en trigo, se aplican varios herbicidas, que se concentran en dos grupos. Por un lado, están los inhibidores de la Acetolactato Sintasa (ALS) y por otro los inhibidores de la Acetil Carboxil Coenzima A (ACCase) (Cobb y Reade, 2010).

Los inhibidores de la ALS, son utilizados por su alta eficacia, su bajo impacto ambiental y su amplia selectividad de cultivos (Heap, 2020). Sin embargo, hay muchos biotipos resistentes a APPs (ariloxifenoxipropionatos) y a CHDs (ciclohexanodionas) (Tafoya-Razo *et al.*, 2022). Esto se debe a una mutación en la ACCase que reduce su sensibilidad al herbicida (Hassanpour-bourkheili *et al.*, 2021). También hay malezas resistentes a herbicidas inhibidores de la ALS, que, en la mayoría de los casos, es causada por una mutación en el sitio de acción (Lonhienne *et al.*, 2022), aunque, en algunos casos, puede ser provocada por limitada absorción, translocación y secuestro del herbicida en vacuolas (Yu y Powles, 2014).

Por su parte, Cruz-Hipolito *et al.* (2011) evaluaron dos biotipos de *A. fatua*, uno procedente de México y otro de Chile, resultado susceptibles a pinoxaden, con una concentración letal 50. Además, Torres-García *et al.* (2018) identificaron una mutación dentro de la enzima ALS e indican que es probable que esta cause la resistencia en los biotipos de *A. fatua* en México. A partir de lo anterior, se evaluó el efecto de los herbicidas inhibidores de ALS y ACCase sobre *Avena fatua* en trigo en el valle de Mexicali, B. C.

3.2. Materiales y métodos

El estudio se realizó en tres ejidos de la zona triguera del valle de Mexicali, B.C. durante el ciclo otoño-invierno 2020-2021, en predios con el antecedente de que, con la aplicación de herbicidas, se han tenido deficiencias para controlar *A. fatua*. El Ejido República Mexicana se encuentra al norte del valle de Mexicali a 60.931 km de la ciudad, la parcela agrícola se ubicó a los 32°38'

38.19" N, 114°48' 50.4" O a 34 m s. n. m. El Ejido Nayarit se encuentra en la parte centro a 39.426 km de la ciudad, el predio se ubicó a los 32°18'50.02" N, 115° 16' 44" O a 13 m s. n. m. El Ejido Sombrerete, se encuentra al sur del valle a 63.41 km de la ciudad, la parcela agrícola se ubicó a los 32° 9' 28.15" N, 115° 3' 48.19" O a 9 m s. n. m.

Los experimentos se desarrollaron con temperaturas promedio de máxima y mínima de 29.33 °C y 10.53 °C y de menor precipitación del año (SIMARBC, 2022). El cultivo se manejó de acuerdo con las prácticas culturales de los agricultores, a excepción de la aplicación de herbicidas. En el Ejido República Mexicana, se aplicó el herbicida el 27 de diciembre de 2020, (altura promedio de *A. fatua* de 9.48 cm); en el Ejido Nayarit los herbicidas se aplicaron el 17 de enero de 2021 (altura promedio de maleza de 10.45 cm); en el Ejido Sombrerete se estableció el 19 de febrero de 2021 (altura promedio de maleza de 11.37 cm) y el trigo en pleno amacollo. Esto fue lo determinante el momento de la aplicación del herbicida.

Los herbicidas se evaluaron a dosis comerciales recomendadas (Cuadro 1). En la aplicación de los herbicidas se utilizó una pulverizadora motorizada 25 L Forza 25 K2P2L de dos tiempos equipada con una barra pulverizadora de 1.2 m de distancia con boquillas de abanico plano TeeJet 8002 (Abertura uniforme de 80° y un gasto de 0.2 galones min⁻¹), calibrada a un gasto de 295.5 L ha⁻¹. Así mismo, se acondicionó el caldo de aplicación de acuerdo con el pH óptimo según el herbicida y una conductividad eléctrica promedio de 1.31 dS m⁻¹, para ello se utilizó un medidor modelo HO9812 g.

Cuadro 1. Herbicidas inhibidores de la ALS y ACCasa evaluados sobre *A. fatua*.

| Ingrediente activo | Marca | Dosis (ha ⁻¹) | pH | Familia química | MDA |
|--------------------------|--|---------------------------|------|---------------------------------------|--------|
| Iodosulfuron-metil-sodio | Sigma Forte (OD 1.2%) | 1.5 L | 8.28 | Sulfonilureas | ALS |
| Flucarbazone sodio | Everest® WDG (70% p/p GD) | 70 30 g | 6.1 | Sulfonil-amino-carbonil-triazolinonas | ALS |
| Pyroxsulam | Across (OD 2.9%) | 0.5 L | 7.03 | Triazolopirimidina | ALS |
| Fenoxaprop-p-etil | Puma Super (Emulsión aceite en agua 6.5%) | 1 L | 8.26 | Ariloxifenoxi-propionatos | ACCasa |
| Pinoxaden | Axial (5%p/v CE.) | 1.2 L | 7.55 | Fenilpirazoles | ACCasa |

Fuente: Información recabada de las fichas técnicas de los herbicidas comerciales utilizados en el presente estudio.

*ALS= Acetolactato sintasa.; *ACCasa =Acetil Coenzima A Carboxilasa; *WDG: Gránulos dispersables; *MDA = Mecanismo de acción.

Se aplicó un diseño experimental de bloques completos al azar con cuatro repeticiones. La unidad experimental fue de 41.53 m². El área útil fue de 18.96 m². Dividida en cuatro unidades de muestreo. Se evaluó la altura de plantas, densidad de malezas y eficacia de control de los herbicidas. En cada punto de muestreo, se seleccionaron cinco plantas aleatoriamente (20 por unidad experimental). La altura de planta se midió desde la superficie del suelo con una cinta métrica; para registrar la densidad de avena se contó el total de plantas por m² y el rendimiento en grano en kg m⁻²; el daño se midió mediante observación visual, para ello se utilizó la escala de 1 a 9 de la Sociedad Europea de Investigación en Maleza. Los datos se obtuvieron a los 14, 28, 42 y 56 días después de la aplicación de herbicida (DDA).

La eficiencia del control de malezas se calculó de acuerdo con Mani *et al.* (1973), para ello se aplicó la siguiente fórmula:

$$EFM\% = \frac{BMc - BMt}{BMc} \times 100$$

Donde: EFM = Eficiencia del control de la maleza (%); BMc= Densidad de plantas de *A. fatua* m² en la parcela de control; BMt= Densidad de plantas de *A fatua* m⁻². en la parcela tratada.

El cálculo del índice de maleza (IM) se realizó mediante la fórmula propuesta por Gill y Kumar (1969):

$$IM = \frac{X - Y}{X} \times 100$$

Donde: X = Rendimiento (t ha⁻¹) del tratamiento de mínima competencia de malezas; Y = Rendimiento (t ha⁻¹) de la unidad experimental del tratamiento evaluado.

Se realizó un análisis de varianza y una comparación de medias entre los tratamientos mediante la prueba de Tukey ($p < 0.05$), se verificó que los datos tuvieran distribución normal, mediante la prueba de Shapiro; también se confirmó que los tratamientos tuvieran varianzas iguales con la prueba de Levene. Además, se realizó un análisis de la pérdida de efectividad biológica de los herbicidas con base en el porcentaje de control reportado cada semana. Para ello se aplicó el modelo de regresión no lineal polinomial de segundo orden. Los análisis estadísticos se realizaron con el programa XLSTAT versión 2022 (Addinsoft, 2022).

3.3. Resultados y discusión

3.3.1. Efectividad biológica de los herbicidas evaluados

En el ensayo realizado en el Ejido República Mexicana, todos los tratamientos tuvieron una alta efectividad sobre *A. fatua* a los 14 DDA (Cuadro 2). Aunque fueron mejores los herbicidas pertenecientes al grupo ACCasa, pinoxaden y fenoxaprop-p-etil con un porcentaje de daño de 88.12 y 86.12%. El efecto de estos dos herbicidas mantuvo una constante durante el experimento. Por el contrario, los herbicidas del grupo ALS (pyroxsulam, flucarbazone y Iodosulfuron), disminuyeron su efectividad después de los 14 DDA.

Con el análisis de regresión no lineal se obtuvo que: fenoxaprop = $77.16+0.78*DDA-0.009*DDA^2$; pinoxaden = $83.67+0.42*DDA-0.006*DDA^2$; pyroxsulan = $137-4.27*DDA+0.03*DDA^2$; flucarbazone = $144.61-6.21*DDA+0.065*DDA^2$; iodosulfuron = $138.20-6.41*DDA+0.07*DDA^2$. Esto indica que los herbicidas pertenecientes al ACCasa, tienen una tendencia uniforme, a lo largo del tiempo. Por su parte, los herbicidas del grupo ALS, iodosulfuron y flucarbozone, tuvieron una pérdida de eficiencia diaria de 6.41 y 6.21% respectivamente en la etapa de los 14 a los 28 DDA.

Cuadro 2. Porcentaje de plantas de *A. fatua* dañadas \pm EE en el experimento Ejido República Mexicana.

| Tratamientos | DDA 14 | DDA 28 | DDA 42 | DDA 56 |
|--------------------------|-------------------|--------------------|-------------------|-------------------|
| Testigo | 0 \pm 0e | 0 \pm 0d | 0 \pm 0d | 0 \pm 0c |
| Flucarbazone | 71.75 \pm 4.24c | 18.43 \pm 13.02c | 3 \pm 0.87cd | 1 \pm 0c |
| Pyroxsulam | 80 \pm 1.84b | 53.12 \pm 4.40b | 3.87 \pm 1.48c | 2.25 \pm 0.95c |
| Pinoxaden | 88.12 \pm 1.89a | 91.68 \pm 0.30a | 90 \pm 3.35b | 88.87 \pm 4.22b |
| Iodosulfuron-metil-sodio | 64.68 \pm 1.87d | 8.18 \pm 3.95c | 1.53 \pm 0.26cd | 1 \pm 0c |
| Fenoxaprop-p-etil | 86.12 \pm 2.49a | 92.68 \pm 0.9a | 93.75 \pm 0.51a | 93.43 \pm 0.31a |

*= Valores con diferente letra en una columna son estadísticamente diferentes (Tukey $p < 0.05$).
 EE = error estándar; DDA = días después de la aplicación.

En el experimento del Ejido Nayarit, los herbicidas tuvieron una eficiencia alta a los 14 DDA, la cual incrementó ligeramente a los 28 y 42 DDA para todos los herbicidas, salvo iodosulfuron y flucarbazone. Mientras que a los 56 DDA, todos los herbicidas causaron menos daño a la maleza, pero fue mayor en los herbicidas ALS (Cuadro 3). En el análisis de regresión no lineal se muestra que: fenoxaprop = $48.2 + 2.03 * DDA - 0.033 * DDA^2$; pinoxaden = $36.61 + 3.21 * DDA - 0.05 * DDA^2$; pyroxsulam = $41.7 + 3.19 * DDA - 0.055 * DDA^2$; flucarbazone = $25.3 + 4.11 * DDA - 0.08 * DDA^2$; Iodosulfuron = $17.03 + 5.08 * DDA - 0.099 * DDA^2$. Esto significa que pinoxaden tendría una efectividad de 77.29% a los 50 DDA, iodosulfuron tendría 24.36% en esos mismos días. Por su parte, los herbicidas ACCasa, tendrían una efectividad de 77.29% en pinoxaden y de 67.34% en fenoxaprop.

Cuadro 3. Porcentaje de plantas de *A. fatua* dañadas \pm EE en el experimento Ejido Nayarit.

| Tratamientos | DDA 14 | DDA 28 | DDA 42 | DDA 56 |
|--------------------------|--------------------|-------------------|--------------------|--------------------|
| Testigo | 0 \pm 0.0c | 0 \pm 0.0c | 0 \pm 0.0d | 0 \pm 0.0b |
| Flucarbazone | 69.68 \pm 0.60b | 66.56 \pm 3.93b | 64.37 \pm 2.42c | 12.18 \pm 2.62b |
| Pyroxsulam | 77.18 \pm 3.04a | 82.18 \pm 1.18a | 84.37 \pm 1.49ab | 55 \pm 4.48a |
| Pinoxaden | 73.12 \pm 1.80ab | 85.93 \pm 3.20a | 90.5 \pm 3.56a | 72.37 \pm 11.13a |
| Iodosulfuron-metil-sodio | 71.87 \pm 4.35ab | 72.18 \pm 3.44b | 68 \pm 3.78c | 9.37 \pm 1.56b |
| Fenoxaprop-p-etil | 71.87 \pm 1.08ab | 73.75 \pm 1.69b | 81.87 \pm 5.83b | 61.87 \pm 17.95a |

*= Valores con diferente letra en una columna son estadísticamente diferentes (Tukey $p < 0.05$).

EE = error estándar; DDA = días después de la aplicación

En el Ejido Sombrerete, todos los herbicidas tuvieron efectos supresivos a los 14 DDA, el cual se mantuvo a los 28 DDA, e incluso, se incrementó en todos los tratamientos, aunque fue menor en flucarbazone. Asimismo, ocurrió una disminución a los 42 DDA y una caída pronunciada de la efectividad de todos los tratamientos a los 56 DDA (Cuadro 4). Además, la proyección a los 50 DDA, arrojada con el análisis de regresión no lineal muestran que pyroxsulam tiene una eficacia de 28.05%; pinoxaden de 27.68%; flucarbazone = 24.10%; fenoxaprop = de 30.60%; iodosulfuron de 28.59%.

Cuadro 4. Porcentaje de plantas de *A. fatua* dañadas \pm el EE en el experimento Ejido Sombrerete.

| Tratamientos | DDA 14 | DDA 28 | DDA 42 | DDA 56 |
|--------------------------|-------------------|--------------------|-------------------|-------------------|
| Testigo | 0 \pm 0.0b | 0 \pm 0.0b | 0 \pm 0.0b | 0 \pm 0.0c |
| Flucarbazone | 69.68 \pm 0.31a | 63.75 \pm 4.30b | 46.87 \pm 6.18a | 4 \pm 1b |
| Pyroxsulam | 65.62 \pm 3.17a | 67.81 \pm 1.80ab | 54.37 \pm 5.96a | 4 \pm 1b |
| Pinoxaden | 69.03 \pm 0.60a | 68.12 \pm 0.63a | 52.18 \pm 5.69a | 4.93 \pm 3.13ab |
| Iodosulfuron-metil-sodio | 69.68 \pm 0.31a | 70.93 \pm 1.44a | 55 \pm 5.03a | 4.31 \pm 1.14b |
| Fenoxaprop-p-etil | 69.68 \pm 0.31a | 70 \pm 0.51a | 56.56 \pm 3.44a | 7.18 \pm 2.19a |

*= Valores con diferente letra en una columna son estadísticamente diferentes (Tukey $p < 0.05$).
 EE = error estándar; DDA = días después de la aplicación

Estos resultados coinciden con Scursioni *et al.* (2011) quienes encontraron que fenoxapro-p-etil y pinoxaden proporcionaron control similar con valores de 96 y 98% sobre *A. fatua* en trigo. Esto se debe a que los dos inhiben la síntesis de ácidos grasos de especies de hoja angosta (Rosales y Robles, 2006), deteniéndose la síntesis de la membrana, requerida para la síntesis celular (Takano *et al.*, 2020). Por otro lado, los herbicidas inhibidores de la enzima Acetolactato Sintasa inhiben la biosíntesis de aminoácidos de cadena ramificada esenciales para el crecimiento y desarrollo de malezas. Además, la muerte de las plantas no se debe únicamente a la inanición de estos aminoácidos, pues el herbicida inhibe la división celular al ocurrir una acumulación del α cetobutirato y una disminución en la translocación del floema (Cobb y Reade, 2010).

3.3.2. Efecto de los herbicidas sobre la densidad de plantas de avena silvestre

La densidad de plantas en el ensayo del Ejido República Mexicana, disminuyó a partir de los 28 DDA en todos los tratamientos respecto al testigo y mantuvo esta disminución en los tratamientos fenoxaprop y pinoxaden en las etapas 42 y 56 DDA. En el Cuadro 5 se muestra que los herbicidas los pertenecientes al grupo ACCasa, fueron más eficientes a través del tiempo.

Cuadro 5. Eficiencia de los tratamientos (% de control) y densidad de plantas de *A. fatua* ± el EE en el experimento Ejido República Mexicana.

| Tratamientos | Variable | DDA 0 | DDA 14 | DDA 28 | DDA 42 | DDA 56 |
|--------------------------|----------|-----------|------------|--------------|-------------|-----------|
| Testigo | Densidad | 362±75.5a | 527±104.6a | 722±108.8a | 807±132.91a | 743±60.5a |
| | EFM (%) | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| Flucarbazone | Densidad | 466±31.9a | 554±30.94a | 704±44.72a | 716±81.24bc | 659±62.6a |
| | EFM (%) | -28.8 | -5.1 | 2.4 | 11.3 | 11,4 |
| Pyroxsulam | Densidad | 433±72.9a | 482±16.09a | 552±52.90ab | 618±63.88b | 769±35.5a |
| | EFM (%) | -19.5 | 8.5 | 23.6 | 23.4 | -3.4 |
| Pinoxaden | Densidad | 365±36.7a | 359±40.28a | 338±43.23b | 295±78.53c | 216±63.8b |
| | EFM (%) | -0.7 | 31.9 | 53.1 | 63.5 | 71.0 |
| Iodosulfuron-metil-sodio | Densidad | 404±72.5a | 368±61.60a | 550±131.78a | 636±126.9ab | 632±33a |
| | EFM (%) | 2.4 | 36.9 | 21.1 | 25.7 | 12.5 |
| Fenoxaprop-p-etil | Densidad | 354±91.4 | 393±73.41a | 322.92±74.1b | 256±116.27c | 148±97.5b |
| | EFM (%) | -9.0 | 22.4 | 50.6 | 56.1 | 68.6 |

*Valores con diferente letra en una columna son estadísticamente diferentes (Tukey $p < 0.05$).

EE = error estándar; DDA= días después de la aplicación; EFM = Eficiencia en control de malezas.

En el experimento realizado en el Ejido Nayarit también se marca la diferencia entre los dos grupos de herbicidas, aunque en este caso, los herbicidas pertenecientes al grupo ACCasa solo evitaron el incremento de la población, ya que en el caso de fenoxaprop-p-etil, la densidad disminuyó en promedio 1.1 plantas por día, mientras que pinoxaden tuvo una disminución de 1.66 plantas diarias (Cuadro 6).

Cuadro 6. Eficiencia de los tratamientos (% de control) y densidad de plantas de *A. fatua* ± EE en el experimento Ejido Nayarit.

| Tratamiento | Variable | DDA 0 | DDA 14 | DDA 28 | DDA 42 | DDA 56 |
|------------------------|----------|------------|----------------|------------|------------------------|------------------|
| Testigo | Densidad | 14±81.9a | 553±80.9a | 669±74.8a | 768±129.8a | 852±144.3a |
| | EFM (%) | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| Flucarbazone | Densidad | 454±179.7a | 470±147.9 a | 535±112ab | 686±213.2 ^a | 692±181.2ab |
| | EFM (%) | -9.8 | 15.0 | 20.0 | 10.7 | 18.8 |
| Pyroxulam | Densidad | 477±89.5a | 341±73.6a | 413±90.8ab | 590±117.7ab | 632±231.9ab c |
| | EFM (%) | -15.3 | 38.3 | 38.2 | 23.2 | 25.9 |
| Pinoxaden | Densidad | 513±85.2a | a | 347±35.4b | 274±4.1b | 255±46.5c |
| | EFM (%) | -23.9 | 44.3 | 48.1 | 64.3 | 70.1 |
| Iodosulfuron -metil | Densidad | 525±51.2a | 420±18.3a | 453±4.2ab | 566±54.6ab | 610±27.8bc |
| | EFM (%) | -26.8 | 24.1 | 32.2 | 26.3 | 28.4 |
| Fenoxaprop- p-etil | Densidad | 462±56.1a | 404±37.7a | 443±97.2ab | 432±77.4ab | 355±72.9±bc |
| | EFM (%) | -11.7 | 27.0 | 33.7 | 43.8 | 58.3 |

*Valores con diferente letra en una columna son estadísticamente diferentes (Tukey $p < 0.05$). EE = error estándar; DDA= días después de la aplicación; EFM = eficiencia en el control de malezas

En el experimento ejecutado en el Ejido Sombrerete, la densidad de plantas, en las distintas evaluaciones no fue diferente estadísticamente ($p < 0.5$) en todos los tratamientos. Aunque, a los 56

DDA los tratamientos pinoxaden y fenoxaprop-p-etil mantuvieron la densidad de plantas menor en comparación al testigo donde se incrementó paulatinamente la población (Cuadro 7).

Cuadro 7. Eficiencia de los tratamientos (% de control) y densidad de plantas de *A. fatua* ± EE en el experimento Ejido Sombrerete.

| Tratamientos | Variable | DDA 0 | DDA 14 | DDA 28 | DDA 42 |
|--------------------|----------|------------|------------|------------|------------|
| Testigo | Densidad | 361±75.93a | 415±85.66a | 439±75.66a | 392±28.23a |
| | EFM (%) | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| Flucarbazone | Densidad | 294±56.09a | 301±41.85a | 319±29.89a | 305±3045a |
| | EFM (%) | 18.6 | 27.4 | 27.3 | 22.2 |
| Pyroxsulam | Densidad | 276±56.28a | 311±51.02a | 310±61.46a | 320±46.65a |
| | EFM (%) | 23.5 | 25.1 | 29.3 | 18.2 |
| Pinoxaden | Densidad | 390±66.68a | 307±39.25a | 328±24.62a | 350±59.01a |
| | EFM (%) | -8.0 | 25.9 | 25.3 | 10.7 |
| Iodosulfuron-metil | Densidad | 325±78.05a | 402±49.54a | 386±64.68a | 374±51.77a |
| | EFM (%) | 10.1 | 3.1 | 12.0 | 4.5 |
| Fenoxaprop-p-etil | Densidad | 383±88.64a | 368±68.71a | 315±18.32a | 291±37.04a |
| | EFM (%) | -6.0 | 11.3 | 28.2 | 25.8 |

*Valores con diferente letra en una columna son estadísticamente diferentes (Tukey $p < 0.05$). EE = error estándar; DDA = días después de la aplicación; EFM = eficiencia en el control de malezas

Estos resultados coinciden con los obtenidos por Scursoni *et al.* (2011) quienes señalan que con pinoxaden y fenoxaprop-p-etil disminuyó la densidad de *A. fatua* en cebada. Por su parte, Baghestani *et al.* (2008) encontraron que con los herbicidas y fenoxaprop y Iodosulfuron disminuyó la población de *Avena ludoviciana* (Diureu) en un 97.5%. También Scursoni *et al.*

(2011) encontraron que con pinoxaden y fenoxapro-p-etil disminuyó la densidad de plantas *A. fatua* en trigo.

3.3.3. Efecto de los herbicidas evaluados sobre la altura de planta en *A. fatua*

En cuanto a la altura de la planta de *A. fatua*, en el experimento del Ejido República Mexicana (Cuadro 8) el testigo tuvo las plantas más altas en todas las etapas de muestreo, sin embargo, en el tratamiento fenoxaprop-p-etil y pinoxaden fueron más pequeñas en las dos últimas evaluaciones.

Cuadro 8. Altura de plantas de *A. fatua* (en cm) \pm el EE en el experimento Ejido República Mexicana.

| Tratamiento | DDA 0 | DDA 14 | DDA 28 | DDA 42 | DDA 56 |
|--------------------|-----------------|------------------|------------------|-----------------|------------------|
| Testigo | 9.3 \pm 0.4a | 26.7 \pm 1.2a | 53.9 \pm 3.3a | 72.8 \pm 2.7a | 101 \pm 3.9a |
| Iodosulfuron-metil | 9.7 \pm 0.7a | 19.4 \pm 0.9b | 47.4 \pm 1.9b | 68.6 \pm 3.9a | 92.4 \pm 3.5b |
| Flucarbazone sodio | 10.1 \pm 1.1a | 16.9 \pm 1.4bc | 41.6 \pm 2.4bc | 65.9 \pm 1.4a | 91.5 \pm 3.6bc |
| Pyroxulam | 9.3 \pm 0.9a | 11.1 \pm 0.98d | 39.1 \pm 1.8c | 63.6 \pm 1.5a | 89.1 \pm 2.8c |
| Pinoxaden | 9.4 \pm 0.8a | 11 \pm 0.5d | 12.9 \pm 1.0d | 24.9 \pm 4.1b | 27.9 \pm 3.0d |
| Fenoxaprop-p-etil | 9.1 \pm 0.9a | 12.9 \pm 0.8cd | 12.6 \pm 0.7d | 22.3 \pm 3.0b | 26.3 \pm 3.1d |

*= Valores con diferente letra en una columna son estadísticamente diferentes (Tukey $p < 0.05$).
EE = error estándar; DDA = días después de la aplicación.

En el ensayo del Ejido Nayarit, se observó la misma tendencia de los resultados obtenidos en el experimento del Ejido República Mexicana (Cuadro 9).

Cuadro 9. Altura de plantas de *A. fatua* (en cm) \pm el EE en el experimento Ejido Nayarit.

| Tratamiento | DDA 0 | DDA 14 | DDA 28 | DDA 42 | DDA 56 |
|--------------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|-------------------|
| Testigo | 10.5 \pm 0.8a | 13.8 \pm 1.6a | 27.9 \pm 2.4a | 43.9 \pm 3.8a | 77.6 \pm 3.98a |
| Flucarbazone sodio | 11.4 \pm 1.5a | 9.6 \pm 1.0ab | 16.3 \pm 2.3b | 33.8 \pm 3.9ab | 59.5 \pm 3.92b |
| Fenoxaprop-p-etil | 10.8 \pm 0.9a | 9.9 \pm 1.0ab | 13.6 \pm 1.2b | 25.6 \pm 3.5bc | 53.1 \pm 5.32bc |
| Iodosulfuron-metil | 10.5 \pm 1.3a | 9.6 \pm 0.9ab | 15.8 \pm 2.8b | 20.1 \pm 3.0b | 59.4 \pm 4.70b |
| Pyroxsulam | 9.7 \pm 0.2a | 7.6 \pm 0.6b | 10.1 \pm 0.7b | 24.7 \pm 1.0bc | 49.3 \pm 1.97bc |
| Pinoxaden | 9.8 \pm 0.8a | 8.6 \pm 0.7b | 9.1 \pm 1.3b | 16.7 \pm 2.8c | 43 \pm 6.27c |

*= Valores con diferente letra en una columna son estadísticamente diferentes (Tukey $p < 0.05$). EE = error estándar; DDA = días después de la aplicación.

En el experimento Ejido Sombrerete, las plantas de todos los tratamientos tuvieron menor altura que el testigo a los 28 y 42 DDA, mientras que, a los 56 DDA, los tratamientos que presentaron disminución en el crecimiento fueron: iodosulfuron, pyroxsulam y fenoxaprop (Cuadro 10). Sin embargo, a los 14 DDA los tratamientos flucarbazone y testigo tuvieron el mismo comportamiento. A los 28 y 42 DDA la altura de planta fue menor en todos los tratamientos con herbicida que en el testigo. A los 56 DDA.

Cuadro 10. Altura de plantas de *A. fatua* (en cm) \pm el EE en el experimento Ejido Sombrerete.

| Tratamiento | DDA 0 | DDA 14 | DDA 28 | DDA 42 | DDA 56 |
|--------------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|-----------------|
| Testigo | 11.6 \pm 1.9a | 14.9 \pm 1.4a | 36.5 \pm 3.3a | 54.7 \pm 4.5a | 94.6 \pm 5.7a |
| Flucarbazono sodio | 13.7 \pm 2.5a | 14.5 \pm 1.6a | 27.8 \pm 4.0b | 46.2 \pm 5.2ab | 89.5 \pm 8.0a |
| Pinoxaden | 10.2 \pm 1.4a | 10.7 \pm 1.2a | 25.3 \pm 2.5b | 42.6 \pm 5.0b | 89.6 \pm 5.7a |
| Fenoxaprop-p-etil | 10 \pm 0.9a | 11.3 \pm 1.0a | 25.9 \pm 1.9b | 44.1 \pm 4.7ab | 82.9 \pm 5.5a |
| Pyroxsulam | 12.3 \pm 2.0a | 9.6 \pm 1.4a | 24.3 \pm 2.7b | 43.6 \pm 5.1ab | 81.9 \pm 7.7a |
| Iodosulfuron-metil | 10.4 \pm 0.7a | 9.3 \pm 0.9a | 22.2 \pm 1.5b | 41.8 \pm 1.7b | 77.9 \pm 30a |

*= Valores con diferente letra en una columna son estadísticamente diferentes (Tukey $p < 0.05$). EE = error estándar; DDA = días después de la aplicación

3.3.4. Efecto de la aplicación de herbicidas sobre el rendimiento en grano de trigo

La mayor eficiencia se presentó en los tratamientos del grupo ACCasa, teniendo un 84.54% pinoxaden y 83.15% fenoxaprop en el ensayo desarrollado en el Ejido República Mexica, mientras que los pertenecientes al grupo ALS, tuvieron una eficiencia menor que 45%. Así mismo, en el experimento Ejido Nayarit, la eficiencia fue menor que lo ocurrido en la mayor parte de los tratamientos del Ejido República Mexicana, salvo el tratamiento pyroxsulam, que pasó de 28.57 a 57.5%. En el Ejido Sombrerete, la eficacia de los herbicidas fue muy baja, con la eficiencia más alta el tratamiento fenoxaprop, con el 32.6 %. Así mismo, los experimentos donde se aplicaron los herbicidas del grupo ALS, los rendimientos son similares a los obtenidos en el testigo de los tres experimentos. Además, el efecto de los herbicidas del grupo ACCasa es alta, pues la diferencia entre rendimientos es significativa ($p < 0.05$) (Cuadro 11).

Cuadro 11. Eficiencia (%) y rendimiento de trigo \pm el error estándar en los experimentos.

| Tratamiento | Ej. Rep. Mexicana | | Ej. Nayarit | | Ej. Sombrerete | |
|--------------------|-------------------|------------|-------------------|------------|-------------------|------------|
| | t h ⁻¹ | Eficiencia | t h ⁻¹ | Eficiencia | t h ⁻¹ | Eficiencia |
| Testigo | 1.5 \pm .26b | 0.00 | 2 \pm .40b | 0.00 | 4.2 \pm .63b | 0.00 |
| Flucarbazone | 2.6 \pm .30b | 42.31 | 2 \pm .24b | 19.05 | 3.9 \pm .53b | -7.69 |
| Pyroxsulam | 2.1 \pm .28b | 28.57 | 5 \pm .60a | 57.50 | 4.4 \pm .08b | 4.55 |
| Pinoxaden | 9.7 \pm 1.02a | 84.54 | 4 \pm .24a | 65.31 | 4.5 \pm .77ab | 6.67 |
| Iodosulfuron-metil | 2.4 \pm .13b | 37.50 | 2 \pm .12b | 26.09 | 4.9 \pm .09ab | 14.29 |
| Fenoxaprop-p-etil | 8.9 \pm .31a | 83.15 | 5 \pm 1.07a | 67.31 | 6.2 \pm .74a | 32.26 |

*= Valores con diferente letra en una columna son estadísticamente diferentes (Tukey $p < 0.05$).

Los tratamientos pinoxaden y fenoxaprop-p-etil fueron los mejores y entre ellos no hubo diferencia significativa ($p < 0.05$), lo cual coincide con Scursoni *et al.* (2011) quienes tampoco encontraron diferencias en rendimiento en el cultivo de cebada al comparar a estos dos herbicidas. Los herbicidas del grupo ACCasa (fenoxaprop-p-etil y pinoxaden) influyeron en el control de *A. fatua*, al grado de que esto benefició al desarrollo del cultivo. Este resultado refleja que *A. fatua*, es un factor que limita el desarrollo y el rendimiento del cultivo de trigo en el valle de Mexicali. Así mismo los rendimientos obtenidos en estos ensayos, son un reflejo del efecto que ejerce la densidad y la altura de la maleza, así como la acción de los herbicidas (Herrera Andrade *et al.*, 2010).

Por otra parte, la diferencia entre ensayos, al tener porcentajes más altos en el Ejido República Mexicana y más bajos en el Ejido Sombrerete, está relacionada con la altura de la maleza al momento de realizar la aplicación de herbicida, especialmente el grupo ALS. Esta afirmación es con base en que, en el ensayo Ejido República Mexicana, las plantas de *A. fatua* tenían una altura de 9.48 cm al momento de realizar la aplicación, mientras que las del ensayo Sombrerete tenían una altura promedio 11.37 cm, es decir, altura mayor a la recomendada para la aplicación de algunos herbicidas evaluados.

3.4. Conclusiones

Bajo las condiciones en las que se realizó esta investigación se concluye que: a) Todos los herbicidas evaluados causan daño a *A. fatua*, disminuyen su densidad y afectan su altura, , al menos hasta la primer semana después de la aplicación; b) Los herbicidas fenoxaprop-p-etil y pinoxaden (grupo ACCasa) tuvieron mayor efectividad biológica sobre *A. fatua* que los herbicidas del grupo ALS, lo cual se reflejó en el rendimiento del trigo.; c) El nivel de eficacia de los herbicidas evaluados, afecta los rendimientos de trigo; d) Los herbicidas del grupo ACCasa se pueden aplicar como una alternativa de control de *A. fatua* en el valle de Mexicali, B.C. siguiendo las recomendaciones para su uso.

Agradecimientos

Andrés González Ruiz es estudiante del Programa de Doctorado en Ciencias Agropecuarias de la Universidad Autónoma de Sinaloa y ha recibido una beca para sus estudios por parte del CONAHCyT, por tal motivo se agradece a dichas instancias el apoyo brindado.

3.5. Literatura citada

- Addinsoft. 2022. XLSTAT Statistical and Data Analysis Solution. New York. <https://www.xlstat.com>.
- Baghestani, M. A.; Zand, Eskandar.; Soufizadeh, Saeid.; Beheshtian, Mohsen.; Haghghi, Abdolaziz.; Alireza, Barjasteh.; Birgani, Daryoush G. and Deihimfard, Reza. 2008. Study on the efficacy of weed control in wheat (*Triticum aestivum* L.) with tank mixtures of grass herbicides with broadleaved herbicides. *Crop Protection*. 27 (1): 104-111). <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2007.04.013>.
- Cobb, A.H. and Reade, J.P. 2010. Inhibitor of acetolactate Synthase and Inhibitor ACCasa. *Herbicides and plant physiology*. Editors: Chris Ka Ulbars and Gerard Vaillancourt. Editorial: Alberta, 25-44 pp.
- Cruz-Hipolito H.; Osuna MD.; Dominguez-Valenzuela J.A.; Espinoza N. and De Prado R. 2011. Mechanism of resistance to ACCase-inhibiting herbicides in wild oat (*Avena fatua*) from Latin America. *Journal of agricultural and food chemistry*. 59 (13): 7261-7267. DOI: 10.1021/jf201074k.

- Gao, W.T.; Su, W.H. 2024. Weed Management Methods for Herbaceous Field Crops: A Review. *Agronomy*. 14 (486):1-23. <https://doi.org/10.3390/agronomy14030486>.
- Gill, G.S. and Kumar, V. 1969. Weed index, a new method for reporting weed control trials. *Indian Journal of Agronomy*. 14 (2): 96-98).
- Herrera Andrade, J.L.; Guzmán Ruiz, S.C. y Loza Venegas, E. 2010. Guía técnica para el área de influencia del campo experimental Valle de Mexicali, B.C. y San Luis Río Colorado, Son. INIFAP-CIRNO. Mexicali, B.C.
- Hassanpour-bourkheili, S.; Gherekhloo; J. Kamkar. B. and Ramezanpour, S.S. 2021. Mechanism and pattern of resistance to some ACCase inhibitors in winter wild oat (*Avena sterilis* subsp. *ludoviciana* (Durieu) Gillet & Magne) biotypes collected within canola fields. *Crop Protection*, 143: 105541. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2021.105541>.
- Heap, I. 2020. The International Survey of Herbicide Resistant Weeds. Online. Internet. Enero de 2020. www.weedscience.org.
- Lonhienne, T.; Cheng, Y.; García, M.D.; Hu, S.H.; Low, Y.S.; Scheck, G.; Williams, G.M.; and Guddat, L.W. 2022. Structural basis of resistance to herbicides that target acetohydroxyacid synthase. *Nature communications*. 13 (1), 3368. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-31023-x>.
- Mani, V.S.; Malla, M.L.; Gautam, K.C. and Das, B. 1973. Weed killing chemical in potato cultivation. *PANS* 23 (8): 1718.
- Rosales Robles E. y Sánchez de la Cruz R. 2006. Clasificación y uso de los herbicidas por su modo de acción. INIFAP. <https://www.compucampo.com/tecnicos/clasificacionherbs.pdf>.
- Scursoni, J.A.; Martín, A.; Catanzaro, M.P.; Quiroga, J. and Goldar, F. 2011. Evaluation of post-emergence herbicides for the control of wild oat (*Avena fatua* L.) in wheat and barley in Argentina. *Crop Protection*. 30 (1): 18-23. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2010.09.003>.
- SIMARBC. 2022. Sistema de Información para el Manejo del Agua de Riego en Baja California (SIMARBC). Red Estatal de Estaciones Agroclimatólogicas. Disponible en: http://apps.sedagro.gob.mx/simarbc/P_MODAL/OAoAANN~ufd6V1B5bEIndlloAgA.

- Tafoya-Razo, J.A.; Mora-Munguía, S.A. and Torres-García, J.R. 2022. Diversity of Herbicide-Resistance Mechanisms of *Avena fatua* L. to Acetyl-CoA Carboxylase-Inhibiting Herbicides in the Bajío, Mexico. *Plants* 11 (13): 1644. doi: 10.3390/plants11131644.
- Takano, H.K.; Ovejero, R.F.L.; Belchior, GG.; Maymone, G.P.L.; and Dayan, F.E. 2020. ACCase-inhibiting herbicides: mechanism of action, resistance evolution and stewardship. *Scientia Agricola*. 78 (1): 1-11. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1678-992X-2019-0102>.
- Tidemann, B.D.; Charles, M.; Geddes, C M.; Hugh, J. and Beckie, HJ. 2021. *Avena fatua* and *Avena sterilis*. En: *Biology and Management of Problematic Crop Weed Species* (Ed: Bhagirath SC), pp. 43-66. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822917-0.00015-X>.
- Torres-García, J.R.; Tafoya-Razo, JA.; Velázquez-Márquez, S. and Tiessen, A. 2018. Double herbicide-resistant biotypes of wild oat (*Avena fatua*) display characteristic metabolic fingerprints before and after applying ACCase- and ALS-inhibitors. *Acta Physiol. Plant*. 40: 119–130. <https://doi.org/10.1007/s11738-018-2691-y>.
- Yu, Q.; Powles, S.B., 2014. Metabolism-based herbicide resistance and cross-resistance in crop weeds: a threat to herbicide sustainability and global crop production. *Plant Physiol*. 166 (3): 1106–1118. <https://doi.org/10.1104/pp.114.242750>.

CAPÍTULO IV. INSTRUMENTOS DIGITALES PARA EVALUAR LA EFICIENCIA DE HERBICIDAS EN *Avena fatua* (Este artículo se enviará a la revista Agrociencia)

Andrés **González-Ruiz**¹, Carlos Enrique **-Ail Catzim**², Carlos Alfonso **Lopez-Orona**¹, Raymundo **Medina-López**¹, Mitzi Dayanira **Estrada-Acosta**¹, Guadalupe Alfonso **López-Urquidez**^{1*}

¹Universidad Autónoma de Sinaloa, Facultad de Agronomía. Carretera Culiacán-Eldorado km 17.5, Apartado postal 25, Tel: 667846-10-84, Culiacán de Rosales, Sinaloa, México.

²Universidad Autónoma de Baja California, Instituto de Ciencias Agrícolas. Carretera. Delta Oaxaca s/n. Ejido Nuevo León, Mexicali, Baja California, México. C. P. 21705

***Autor para correspondencia:** alfonsolopezurquidez@uas.edu.mx

RESUMEN

Al utilizar una escala visual en evaluaciones de eficiencia de herbicidas, se pueden tener imprecisiones, pues los valores obtenidos dependen de las características personales del observador, por ejemplo, su experiencia, lo cual, para fines de evaluación y de comparación de efectividad, puede conducir a errores importantes. Ante este problema, en esta investigación se partió del supuesto de que, con la información obtenida, con el medidor de clorofila SPAD y el sensor de la intensidad de la luz reflejada por las plantas GreenSeeker GeenSichas, se puede inferir la sanidad de las plantas y, por lo tanto, el efecto de herbicidas sobre malezas, particularmente en *Avena fatua* presente en el cultivo de trigo. Teniendo como objetivo evaluar dichos instrumentos digitales buscando una mejor alternativa a la observación visual. Se realizaron tres experimentos, distribuidos en tres zonas productoras de trigo en el valle de Mexicali, B.C., Se aplicaron herbicidas inhibidores de la Acetolactato Sintasa y Acetil Carboxil Coenzima A sobre *A. fatua*. El diseño experimental fue bloques completos al azar con cuatro repeticiones. Con los datos obtenidos se calculó la correlación con los valores registrados por los instrumentos de medición, incluida la observación visual. También se realizó un análisis de regresión lineal simple para inferir el valor de control visual a partir de los valores en los instrumentos digitales. En los tres experimentos se observó correlación entre los datos obtenidos con todas las formas de medición aplicadas. Asimismo, se obtuvo que, por cada centésima del valor obtenido con GreenSeeker, equivale al 2.66 % de control, mientras que, por cada unidad de los valores del SPAD, el porcentaje de control es de 4.21. Concluyendo que el SPAD y el GreenSeeker pueden ser utilizados en la evaluación de la eficiencia de herbicidas *A. fatua*.

Palabras clave: SPAD, GreenSeeker, Control de maleza, *Avena fatua*.

ABSTRACT

When using a visual scale in herbicide efficiency evaluations, inaccuracies may occur, since the values obtained depend on the personal characteristics of the observer, for example, his or her experience, which, for evaluation and effectiveness comparison purposes, can lead to significant errors. Faced with this problem, this research started from the assumption that, with the information obtained, with the SPAD chlorophyll meter and the GreenSeeker GeenSichas sensor of the intensity of the light reflected by the plants, the health of the plants can be inferred and, therefore, the effect of herbicides on weeds, particularly on *Avena fatua* present in wheat crops. The objective was to evaluate these digital instruments looking for a better alternative to visual observation. Three experiments were carried out, distributed in three wheat producing areas in the Mexicali Valley, B.C., Acetolactate Synthase and Acetyl Carboxyl Coenzyme A inhibitor herbicides were applied to *A. fatua*. The experimental design was randomized complete blocks with four replicates. The data obtained were used to calculate the comparison with the values recorded by the measuring instruments, including visual observation. A simple linear regression analysis was also performed to infer the visual control value from the values on the digital instruments. In the three experiments, the comparison between the data obtained with all the measurement methods applied will be verified. Likewise, it was found that, for each hundredth of the value obtained with GreenSeeker, it is equivalent to 2.66% of control, while, for each unit of the SPAD values, the control percentage is 4.21. Concluding that the SPAD and the GreenSeeker can be used in the evaluation of the efficiency of *A. fatua* herbicides.

Key words: SPAD, GreenSeeker, Weed control, *Avena fatua* L.

4.1. Introducción

El trigo es el principal grano cultivado en Baja California cubriendo en 2023 una superficie de 39 210 ha, equivalente al 24.3 % de la superficie cultivada en dicha entidad federativa, mientras que a nivel nacional se siembra en 565 022.33 ha (SIAP, 2024). En su manejo, este cultivo tiene una serie de problemas, destacando la competencia contra malezas, principalmente, avena silvestre (*Avena fatua* L.). Para combatirla, el productor hace uso de herbicidas. Mientras que, para evaluar la eficiencia de los mismos, es común que los técnicos son evalúen visualmente el daño causado

por los herbicidas a las malezas, asignándoles un valor porcentual con base en la escala propuesta por la Sociedad Europea de Investigación en Maleza (EWRS). Una de las razones de ello es su bajo costo. Sin embargo, debido a que es una escala visual que depende del observador, pueden tenerse impresiones (Tasistro, 2000). Aunado a la escala visual cualitativa, en la evaluación de los herbicidas, también se consideran variables cuantitativas como: altura de planta, producción de materia seca, densidad de plantas y el rendimiento del cultivo (Burril *et al.*, 1977).

Por otra parte, hay otras alternativas, que podrán utilizarse para evaluar el efecto de los herbicidas en las plantas. Hay elementos para sostener esta idea, como lo es el uso imágenes termográficas, GreenSeeker, SPAD e imágenes tomadas con cámaras digitales. Por ejemplo, el sensor GreenSeeker se utiliza para diferenciar plantas sanas de aquellas que tienen algún desorden fisiológico causado por estrés en campo con índice de vegetación de deficiencia normalizada (NDVI). Este valor, cuyo rango es de 1 a -1, se basa en que las plantas sanas y vigorosas absorben más luz roja y reflejan más luz infrarroja, con registros entre 0.7 y 0.8 NDVI, que aquellas con problemas de este tipo (Gutiérrez-Soto *et al.*, 2011).

Así mismo, el SPAD (Análisis del Desarrollo de la Planta en el Suelo, por sus siglas en inglés) es un instrumento digital con el que se miden dos valores de la transmisión de la radiación de la energía, la primera, es la luz roja a 650 nm, la cual es absorbida por las plantas a través de la clorofila; la segunda es la radiación infrarroja que viaja a una longitud de onda de 940 nm, que no es absorbida por la clorofila (Xiong *et al.*, 2015). Con este instrumento, se diagnóstica el nivel de nutrición nitrogenada en las plantas (González-Torres *et al.*, 2009; Sorbet, 2013; Da Cunha *et al.*, 2015;), también se han empleado para determinar el estrés hídrico a partir de la pigmentación fotosintética en diferentes cultivares de caña de azúcar (De Almeida *et al.*, 2014). Así mismo, estudios realizados por Thomasi *et al.* (2021) indican que el uso de sensores ópticos permite capturar cambios en el contenido de clorofila en condiciones de daño visual imperceptible y representan un instrumento prometedor para evaluar la eficiencia de los herbicidas.

También se han utilizado imágenes térmicas infrarrojas para diagnosticar el estrés hídrico, evaluación de la calidad de semillas, detección de enfermedades y patógenos en plantas. Dicha tecnología podría emplearse para evaluar los daños causados por herbicidas postemergentes, pues se fundamenta en medir daños físicos, trastornos fisiológicos, así como el proceso de crecimiento de semillas, plántulas y plantas en el interior de los viveros e invernaderos (Sankaran *et al.*, 2010;

Ishimwe *et al.*, 2014; Vargas, 2015). Por esa razón podrían ser de ayuda en la medición de estrés causado por herbicidas, pues, al medir de forma indirecta el contenido relativo de clorofila en las plantas, este puede detectar a su vez la ausencia de este pigmento por los efectos de los herbicidas inhibidores de la ALS y ACCasa (Cobb y Reade, 2010). Por tal motivo, se buscó una mejor alternativa para dichas evaluaciones, utilizando instrumentos digitales. En esta investigación se partió del supuesto de que, con la información obtenida, con el medidor de clorofila SPAD y el sensor de la intensidad de la luz reflejada por las plantas GreenSeeker GeenSichas, se puede inferir la sanidad de las plantas y, por lo tanto, el efecto de herbicidas sobre malezas, particularmente en *Avena fatua* presente en el cultivo de trigo. Teniendo como objetivo evaluar dichos instrumentos digitales buscando una mejor alternativa a la observación visual.

4.2. Materiales y métodos

Se realizaron experimentos durante el ciclo otoño-invierno 2020-2021 en tres zonas de producción de trigo en el valle de Mexicali, Baja California. Los experimentos se establecieron en unidades de producción de agricultores cooperantes de la empresa Agrovizi3n. Los predios fueron identificados de la siguiente manera: zona norte, Ejido Rep3blica Mexicana (Latitud: 32°38' 38.19" N, Longitud: 114°48' 50.4" O); zona centro, Ejido Nayarit (Latitud: 32°18'50.02" N, Longitud: 115° 16' 44" O); zona sur, Ejido Sombrerete (Latitud: 32° 9' 28.15" N, Longitud: 115° 3' 48.19" O). Los predios fueron seleccionados con base en que tuvieran antecedentes hist3ricos con fallas en el control de la maleza *A. fatua*. El cultivo de trigo se manej3 de acuerdo con las pr3cticas aplicadas por los agricultores cooperantes, salvo la aplicaci3n de herbicidas en el experimento. Los tres experimentos se realizaron bajo un dise1o de bloques completos al azar con seis tratamientos y cuatro repeticiones.

En la evaluaci3n de los instrumentos digitales se utilizaron herbicidas pertenecientes a dos grupos de acuerdo a su modo de acci3n: herbicidas inhibidores de la Acetolactato Sintasa (ALS); inhibidores de la Acetil Carboxil Coenzima A (ACCasa) (HRAC, 2024) a dosis comerciales recomendadas para el control de malezas de hoja angosta y en algunos casos de hoja ancha (**Cuadro 1**). La parcela experimental midi3 996.72 m² y cada la unidad experimental fue de 41.53 m²., con un 3rea 3til de 18.96 m². Para aplicar los herbicidas, se utiliz3 una aspersora 25 L Forza

25 K2P2L de dos tiempos equipada con aguilón de 1.2 m de distancia con boquillas de abanico plano TeeJet 80.02 (Abertura uniforme de 80° y un gasto de 0.2 galones min⁻¹), calibrada a un gasto de 295.5 L ha⁻¹. El caldo de aplicación se preparó de acuerdo con el pH óptimo (Lewis *et al.*, 2014) (**Cuadro 1**) y una conductividad eléctrica promedio de 1.31 dS m⁻¹, medido con un conductímetro modelo HO9812g. Para estos factores se utilizó un buferizante de acuerdo con la especificación de la ficha técnica comercial. Solo en el herbicida Pinoxaden se adicionaron 3 ml L⁻¹ de agua del adherente que contiene Alcohol Graso Etoxilado y Polidimetilsiloxano. En los demás herbicidas no se aplicó pues ya contienen coadyuvante.

Cuadro1. Herbicidas aplicados sobre *A. fatua*.

| Tratamiento | Nombre comercial y formulación | Dosis ha ⁻¹ |
|---|--|------------------------|
| Mesosulfuron-metil, Iodosulfuron-metil-Na | Sigma forte (1.2 % i.a.*) | 1.5 L |
| Flucarbazone sodio | Everest® 70 WDG (70 % i.a.) | 30 g |
| Pyroxsulan | Across (2.9 % i.a.) | 0.5 L |
| Fenoxaprop-p-etil | Puma Super (Emulsión aceite en agua 6.5 %) | 1 L |
| Pinoxaden | Axial (5 % i.a.) | 1.2 L |
| Testigo absoluto | Sin aplicación | Sin aplicación |

*i.a. = ingrediente activo

Se evaluó la eficiencia de los equipos digitales en la medición del efecto de herbicidas en el control de *A. fatua*. Los instrumentos evaluados fueron los siguientes: GreenSeeker Handheld® mediante índices de vegetación de diferencia normalizada (NDVI); clorofilómetro portátil SPAD Minolta 502 Plus mediante el contenido relativo de clorofila; Para ello, se realizaron mediciones en cuatro puntos de muestreo por unidad experimental utilizando un marco con un área de 0.0923 m².

La altura de planta se midió con una regla graduada en milímetros. Para ello, en cada punto de muestreo, se seleccionaron aleatoriamente cinco ejemplares; la densidad de malezas fue mediante

el conteo de plantas avena (Burril *et al.*, 1977); el porcentaje de control se midió aplicando la escala visual de la Sociedad Europea de Investigación en Maleza (EWRS) (Ciba-Geigy AG, 1992). Con los datos obtenidos en la última etapa de evaluación se realizó un análisis de correlación múltiple de Pearson ($p = 0.059$). Con los datos obtenidos del conjunto de los tres experimentos se realizó un análisis de regresión lineal para proyectar el daño causado por los herbicidas en la maleza, obtener determinado valor en la lectura del SPAD y del GreenSeek. Para dichos análisis se utilizó el paquete estadístico XLSTAT (Addinsoft (2022)).

4.3. Resultados y discusión

4.3.1. Relación de los equipos digitales en la medición del control sobre *A. fatua*

El análisis de correlación entre los valores obtenidos sobre el efecto de los herbicidas sobre *A. fatua* con los diferentes instrumentos, se encontró que en los tres experimentos están correlacionados entre ellos. Siendo en la zona norte donde se obtuvo mayor nivel de asociación (Cuadro 2). La observación visual está negativamente relacionada con altura de planta con una R de -0.835, con densidad de plantas con -0.894, con el SPAD -0.834 y con el GreenSeeker, con el 0.737.

En el experimento realizado en la zona centro, todos los medios de evaluación del daño causado por los herbicidas, están correlacionados con todos. Con respecto a los instrumentos de medición digital, tanto el SPAD, como los obtenidos con GreenSeeker, tienen correlación similar con respecto a los valores de daño sobre *A. fatua*.

Cuadro 2. Correlación entre los diferentes medios para evaluar el daño causado por los herbicidas en *A. fatua* en trigo por zona en el valle de Mexicali, B.C.

| Zona | Variable | E. | Visual | Altura | D. | SPAD | NDVI | |
|--------|----------|----------------|------------------|-------------------|------------------|------------------|------------------|---------------|
| Norte | Visual | R | 1 | -0.835 | -0.894 | -0.834 | -0.737 | |
| | | Valor <i>p</i> | 0 | <0.001 | <0.001 | <0.001 | <0.001 | |
| | Altura | R | -0.835 | 1 | 0.768 | 0.831 | 0.806 | |
| | | Valor <i>p</i> | <0.001 | 0 | <0.001 | <0.001 | <0.001 | |
| | D. | R | -0.894 | 0.768 | 1 | 0.789 | 0.568 | |
| | | Valor <i>p</i> | <0.001 | <0.001 | 0 | <0.001 | 0.004 | |
| | SPAD | R | -0.834 | 0.831 | 0.789 | 1 | 0.590 | |
| | | Valor <i>p</i> | <0.001 | <0.0001 | <0.001 | 0 | 0.002 | |
| | NDVI | R | -0.737 | 0.806 | 0.568 | 0.590 | 1 | |
| | | Valor <i>p</i> | <0.001 | <0.001 | 0.004 | 0.002 | 0 | |
| | Centro | Visual | R | 1 | -0.609 | -0.749 | -0.577 | -0.597 |
| | | | Valor <i>p</i> | 0 | 0.002 | <0.001 | 0.003 | 0.002 |
| Altura | | R | -0.609 | 1 | 0.615 | 0.691 | 0.939 | |
| | | Valor <i>p</i> | 0.002 | 0 | 0.001 | 0.000 | <0.001 | |
| D. | | R | -0.749 | 0.615 | 1 | 0.489 | 0.626 | |
| | | Valor <i>p</i> | <0.001 | 0.001 | 0 | 0.015 | 0.001 | |
| SPAD | | R | -0.577 | 0.691 | 0.489 | 1 | 0.560 | |
| | | Valor <i>p</i> | 0.003 | 0.000 | 0.015 | 0 | 0.004 | |
| NDVI | | R | -0.597 | 0.939 | 0.626 | 0.560 | 1 | |
| | | Valor <i>p</i> | 0.002 | <0.001 | 0.001 | 0.004 | 0 | |
| Sur | | Visual | R | 1 | -0.764 | -0.609 | -0.689 | -0.428 |
| | | | Valor <i>p</i> | 0 | <0.001 | 0.002 | 0.000 | 0.037 |
| | Altura | R | -0.764 | 1 | 0.315 | 0.853 | 0.684 | |
| | | Valor <i>p</i> | <0.001 | 0 | 0.133 | <0.001 | 0.000 | |
| | D. | R | -0.609 | 0.315 | 1 | 0.260 | 0.059 | |
| | | Valor <i>p</i> | 0.002 | 0.133 | 0 | 0.220 | 0.785 | |
| | SPAD | R | -0.689 | 0.853 | 0.260 | 1 | 0.904 | |
| | | Valor <i>p</i> | 0.000 | <0.001 | 0.220 | 0 | <0.001 | |
| | NDVI | R | -0.428 | 0.684 | 0.059 | 0.904 | 1 | |
| | | Valor <i>p</i> | 0.037 | 0.000 | 0.785 | <0.001 | 0 | |

R: coeficiente de correlación; Valor *p*: nivel de significancia obtenido en cada correlación

Por su parte, los resultados de la correlación entre los diferentes medios de obtención de información sobre el control de *A. fatua*, en el experimento de la zona sur indican que hay correlación alta y estadísticamente significativa entre todas las variables, a excepción de densidad de plantas. Con respecto a los instrumentos de medición, destaca la relación entre los valores registrados con SPAD y los obtenidos visualmente.

Al realizar la correlación con los datos del daño causado por los herbicidas a *A. fatua*, de todos los experimentos, se observa la correlación entre los valores obtenidos con los diferentes instrumentos de medición (Cuadro 3), a pesar de la variación ambiental entre los sitios donde se desarrollaron los experimentos. Destaca la relación entre la observación visual, con los valores SPAD y NDVI.

Cuadro 3. Análisis de correlación entre los diferentes medios para evaluar el nivel de daño causado por los herbicidas sobre *A. fatua* en el cultivo de trigo considerando los datos de los tres experimentos en su conjunto.

| Variables | Estadísticos | Visual | Altura | Densidad | SPAD | NDVI |
|-----------|----------------|------------------|-------------------|------------------|------------------|------------------|
| Visual | R | 1 | -0.759 | -0.626 | -0.691 | -0.564 |
| | Valor <i>p</i> | 0 | <0.001 | <0.001 | <0.001 | <0.001 |
| Altura | R | -0.759 | 1 | 0.456 | 0.767 | 0.759 |
| | Valor <i>p</i> | <0.001 | 0 | <0.001 | <0.001 | <0.001 |
| Densidad | R | -0.626 | 0.456 | 1 | 0.388 | 0.364 |
| | Valor <i>p</i> | <0.001 | <0.001 | 0 | 0.001 | 0.002 |
| SPAD | R | -0.691 | 0.767 | 0.388 | 1 | 0.580 |
| | Valor <i>p</i> | <0.001 | <0.0001 | 0.001 | 0 | <0.001 |
| NDVI | R | -0.564 | 0.759 | 0.364 | 0.580 | 1 |
| | Valor <i>p</i> | <0.001 | <0.001 | 0.002 | <0.001 | 0 |

R: coeficiente de correlación; Valor *p*: nivel de significancia obtenido en cada correlación

4.3.2. Predicción del daño utilizando instrumentos digitales

Con los datos obtenidos, se realizó el análisis de regresión lineal para obtener la proyección del nivel de daño causado por los herbicidas en *A. fatua*, al evaluar el daño con SPAD y GreenSeeker. En lo referente a este último se obtuvo que, por cada centésima del valor registrado en este instrumento, el control visual se incrementa en 2.6 %, con un coeficiente de correlación de 0.55 y un valor $p < 0.0001$ (Figura 1 A). Con respecto a la relación de SPAD con el valor obtenido visualmente, se observa que, por cada unidad obtenida con este instrumento digital, hay una disminución del control de 4.21 % de los herbicidas sobre *A. fatua* (Figura 1B). Esto con un coeficiente de correlación de 0.69 y un valor $p < 0.0001$.

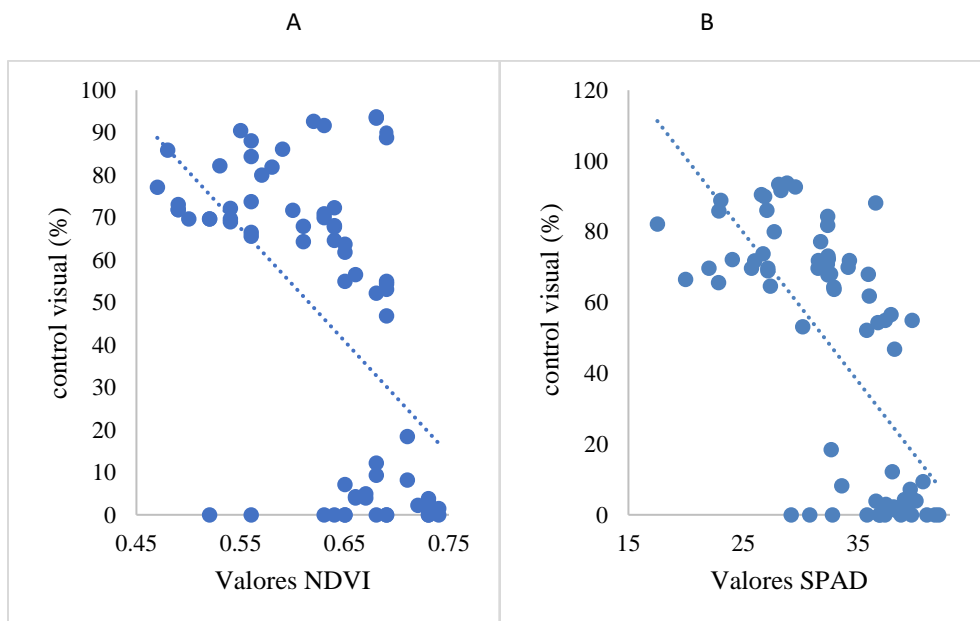


Figura 1. Relación de los valores registrados con instrumentos digitales y los valores obtenidos visualmente sobre el daño causado por los herbicidas. A: Green Seeker; B: SPAD.

Las plantas pueden estar sometidas a estrés por diferentes causas, falta de agua, temperaturas extremas, desnutrición y, antes esta situación, reaccionan de diferentes maneras, incluida la disminución del crecimiento (Zhang *et al.*, 2020). Incluso, es común que el estrés sea causado por diferentes factores abióticos que actúan en interacción (Zhang *et al.*, 2023). Esto puede implicar que los valores obtenidos con los instrumentos digitales, también estén influidos por algún tipo de

estrés adicional al provocado por la acción de los herbicidas. Por lo que es importante tomarlos en cuenta al momento de obtener los resultados con los instrumentos digitales evaluados.

Los herbicidas utilizados en la presente investigación inhiben procesos fisiológicos que involucran la degradación de la clorofila (Cobb y Reade, 2010). Esto a su vez se manifiesta en el cambio de la coloración de las hojas y tallos de las malezas (Rosales y Sánchez, 2006), por lo tanto, los cambios producidos por herbicidas en la pigmentación de *A. fatua* se reflejaron en los valores obtenidos con los instrumentos digitales SPAD y e GreenSeeker. Sin embargo, estos resultados no se pueden extrapolar a otras especies de malezas. Este resultado es similar al que se obtiene al medir el índice de contenido de clorofila con determinada dosis de fertilización nitrogenada (Da Cunha *et al.* (2015). En el mismo contexto, Gutiérrez-Soto *et al.* (2011) encontraron que, al comparar con GreenSeeker plantas en óptimas condiciones de nutrición y bajo estrés, se obtiene un valor o que refleja el estado fisiológico de las plantas en campo, ya que las plantas con buen funcionamiento absorben más luz infrarroja que aquellas con problemas fisiológicos. Esto se corrobora con los resultados obtenidos con dicho instrumento en la presente investigación. En este sentido, tanto SPAD como el GreenSeeker detectan el estrés causado por la falta de pigmentación en las hojas (Gutiérrez-Soto *et al.*, 2011; Silva *et al.*, 2014; Da Cunha *et al.*, 2015).

Con los equipos GreenSeeker y SPAD se obtuvieron valores altos en los tratamientos cuando visualmente se observó el incremento en la vegetación donde el control fue deficiente ya que la densidad de cultivo representó un factor clave en la autorregulación de poblaciones, ya que la competencia interespecífica por espacio, agua, luz, nutrientes sobre *A. fatua* bajo los efectos de los herbicidas, contribuyó a mantener a dicha maleza fuera del periodo crítico de competencia (Márquez *et al.*, 1996). Al respecto, Thomasi *et al.* (2021) mencionan que las lecturas de NDVI se saturan muy fácilmente por el dosel de otras plantas por lo que es posible que se produzcan errores en las mediciones.

Con los resultados obtenidos también muestra que, con los instrumentos digitales también se puede estimar la altura de las plantas y la densidad de las mismas, lo cual será de utilidad en la evaluación de, por lo menos, los dos grupos de herbicidas utilizados en la presente investigación en *A. fatua*, ya que los valores que se obtengan con los instrumentos digitales podrán variar, dependiendo de la especie (Xiong, *et al.*, 2015).

4.4. Conclusiones

El uso de instrumentos digitales representa una nueva alternativa para la agricultura de precisión en la evaluación de herbicidas inhibidores de la ALS y ACCasa sobre *A. fatua* en el cultivo de trigo. En esta investigación los equipos como medidor SPAD y GreenSeeker fueron los que más se adaptaron en la medición de los efectos producidos por dichos productos en las zonas estudiadas en el valle de Mexicali.

4.5. Referencias

- Addinsoft. 2022. XLSTAT Statistical and Data Analysis Solution. New York. <https://www.xlstat.com>
- Burril LC, Cárdenas, J., & Locatelli, E. 1977. Manual de campo para investigación en control de malezas (No. 632.58 B971E). International Plant Protection Center, Corvallis, OR (EUA).
- Ciba-Geigy AG. 1992. Manual for field trials in plant protection. Third edition. Revised and enlarged. Plant Protection. Printed in Switzerland. p. 240-241.
- Cobb AH, Reade JP. 2010. Inhibitor of acetolactate Synthasa and Inhibitor ACCasa. Herbicides and plant physiology. Editors: Chris Ka ulbars and Gerard Vaillancourt. Editorial: Alberta, 25-44.
- De Almeida Silva M, Dos Santos CM, Dos Santos Vitorino H, De Lima Rhein AF. 2014. Pigmentos fotossintéticos e índice SPAD como descritores de intensidade do estresse por deficiência hídrica em cana-de-açúcar. Bioscience Journal 30(1).
- Da Cunha AR, Katz I, De Pádua Sousa A, Uribe RAM. 2015. Índice SPAD en el crecimiento y desarrollo de plantas de lisianthus en función de diferentes dosis de nitrógeno en ambiente protegido. Idesia (Chile) 33(2), 97-105. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292015000200012>
- González-Torres A, Figueroa-Viramontes U, Delgado JA, Núñez-Hernández G, Cueto-Wong JA, Preciado-Rangel P, Palomo-gil A. 2009. Calibración del SPAD-502 para evaluar requerimientos de nitrógeno en maíz forrajero. Terra Latinoamericana, 27(4), 303-309.

- Gutiérrez-Soto M V, Cadet-Piedra E, Rodríguez-Montero W, Araya-Alfaro, J. M. 2011. El GreenSeeker TM y el diagnóstico del estado de salud de los cultivos. *Agronomía mesoamericana* 22(2), 397-403.
- HRAC (Herbicide Resistance Action Committee). 2024. Global Herbicide Classification Lookup. <https://hracglobal.com/tools/classification-lookup>. Recuperado junio 2024.
- Ishimwe R, Abutaleb K, Ahmed F. 2014. Applications of thermal imaging in agriculture—A review. *Advances in remote Sensing* 3(03), 128. <http://dx.doi.org/10.4236/ars.2014.33011>
- Lewis Ka, Tzilivakis J, Warner, Green, A. 2016. Una base de datos internacional para la evaluación y gestión de riesgos de plaguicidas. *Evaluación de riesgos humanos y ecológicos: una revista internacional* 22(4), 1050-1064. <https://doi.org/10.1080/10807039.2015.1133242>.
- Márquez J, Salas J, Fuentes CL, Plaza, G. A. 1996. Determinación del impacto de competencia de diferentes cohortes de avena silvestre (*Avena fatua*) sobre los rendimientos en un cultivo comercial de trigo (*Triticum aestivum*). *Agronomía Colombiana* 13(1), 30-39.
- Rosales-Robles E, Sánchez de la Cruz R. (2006). Clasificación y uso de los herbicidas por su modo de acción. México: INIFAP.
- Servicio de información agropecuaria y pesquera (SIAP). 2024. Anuario estadístico de la producción agrícola 2023. <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/> (Recuperado: junio 2024)
- Sorbet Pezonaga S. 2013. Utilidad del medidor de clorofilas (SPAD-502®) en los programas de fertilización nitrogenada de trigo (*Triticum aestivum* L.) en regadío. [Tesis profesional, Universidad Pública de Navarra. Escuela Técnica superior de ingenieros agrónomos].
- Silva MDA, Dos Santos CM, Vitorino HDS, RheinADL. 2014. Photosynthetic pigments and SPAD index as descriptors of water deficit stress intensity in sugar cane. *Bioscience Journal* 30(1), 173-181.
- Sankaran Mishra A, Ehsani R, Davis C. 2010. A review of advanced techniques for detecting plant diseases. *Computers and electronics in agriculture* 72(1), 1-13.
- Thomasi RM, Lúcio, AD, Amado TJ, Pott LP, Zanon Junior A. Werle IS. Ulguim AR. 2021. Relationship of vegetation indices with herbicide phytotoxicity in winter cereals. *Advances in Weed Science* 39, 02100050.

- Tasistro AS. 2000. Métodos para evaluar efectividad en el control de malezas. *Revista Mexicana de la Ciencia de la Maleza*. Número Especial, 25-35.
- Vargas Cruz J. 2015. Implementación de imágenes termográficas para la detección de estrés hídrico en hierbabuena (*Mentha spicata*) bajo invernadero en la Sabana de Bogotá. [Tesis profesional, Universidad Nacional de Colombia. Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola].
- Xiong D, Chen J, Yu T, Gao W, Ling X, Li Y, Peng S, Huang J. 2015. SPAD-based leaf nitrogen estimation is impacted by environmental factors and crop leaf characteristics. *Sci Rep* **5**, 13389. <https://doi.org/10.1038/srep13389>
- Zhang H, Zhao Y, Zhu JK. 2020. Thriving under Stress: How Plants Balance Growth and the Stress Response, *Developmental Cell*, 55(5), Pages 529-543, <https://doi.org/10.1016/j.devcel.2020.10.012>.
- Zhang Y, Xu J, Li R, Ge Y, Li Y, Li R. 2023. Plants' Response to Abiotic Stress: Mechanisms and Strategies. *Int. J. Mol. Sci.* **24**, 10915. <https://doi.org/10.3390/ijms241310915>

CAPÍTULO V. RELACIÓN ENTRE ÍNDICES DE VEGETACIÓN Y TOXICIDAD DE PINOXADEN EN DOS POBLACIONES DE *Avena fatua* L. (Artículo aceptado por la revista AGROPRODUCTIVIDAD)

González-Ruiz Andrés¹; Ail-Catzim Carlos E².; López-Urquidez Guadalupe A.¹; López-Orona Carlos A¹.; Medina-López Raymundo¹; Estrada-Acosta Mitzi D¹.

¹Universidad Autónoma de Sinaloa, Facultad de Agronomía. Culiacán de Rosales, Sinaloa, México

²Universidad Autónoma de Baja California, Instituto de Ciencias Agrícolas Ejido Nuevo León, Mexicali, Baja California.

*Autor para correspondencia: carlos.ail@uabc.edu.mx

ABSTRACT

Objective: To study the relationship between vegetation indices and the toxicity of the herbicide pinoxaden on two populations of *A. fatua*.

Design/methodology/approach: A completely randomized design with a 2x4 factorial arrangement was used in the laboratory, with factor A being the two populations of *A. fatua* and factor B being the four concentrations of the herbicide pinoxaden (0, 30, 60 and 120 g i.a ha⁻¹). The percentage of control, plant height and the GA and GGA vegetation indices were evaluated. The data were analyzed with an ANOVA and a comparison of means was performed with the Tukey test ($\alpha=0.05$). The relationship between the control percentage and vegetation indices was determined by Pearson correlation analysis.

Results: There was a higher percentage of control, plant height, GA index and GGA index in the *A. fatua* population from alfalfa compared to the wheat population, indicating that pinoxaden has greater phytotoxicity for the alfalfa population. A negative correlation was observed between the control percentage and the GA index for the two populations of regardless of the evaluation time, a similar negative correlation was presented in both populations for GGA. Indicating that the GA and GGA indices decrease as the control percentage increases.

Findings/conclusions: The GA and GGA indices were inversely correlated with the control percentage of the herbicide pinoxaden. The GA and GGA indices obtained through digital camera images are feasible to estimate the toxicity levels of the herbicide pinoxaden.

Keywords: Pinoxaden, vegetation index, wild oats, digital image

RESUMEN

Objetivo: Estudiar la relación de los índices de vegetación y la toxicidad del herbicida pinoxaden sobre dos poblaciones de *A. fatua*.

Diseño/metodología/aproximación: Se empleó un diseño completamente al azar con arreglo factorial 2x4 en laboratorio, siendo el factor A, las dos poblaciones de *A. fatua* y el factor B las cuatro concentraciones del herbicida pinoxaden (0, 30, 60 y 120 g i.a ha⁻¹). Se evaluaron el porcentaje de control, altura de planta y los índices de vegetación GA y GGA. Los datos se analizaron con un ANOVA y se realizó comparación de medias con la prueba de Tukey ($\alpha=0.05$). La relación entre el porcentaje de control y los índices de vegetación se determinó mediante análisis de correlación de Pearson.

Resultados: Se presentó mayor porcentaje de control, altura de planta, índice GA y índice GGA en la población de *A. fatua* proveniente de alfalfa en comparación con la población de trigo, indicando que pinoxaden tiene mayor fitotoxicidad para población de alfalfa. Se observó correlación negativa entre el porcentaje de control y el índice GA para las dos poblaciones de *A. fatua* indistintamente del tiempo de evaluación, similar correlación negativa se presentó en ambas poblaciones para GGA. Indicando que los índices GA y GGA disminuyen a medida que el porcentaje de control aumenta.

Hallazgos/conclusiones: Los índices GA y GGA se correlacionaron inversamente proporcional con el porcentaje de control del herbicida pinoxaden. Los índices GA y GGA obtenidos mediante imágenes de cámaras digitales son factibles para estimar los niveles de toxicidad del herbicida pinoxaden.

Palabras clave: Pinoxaden, índice de vegetación, avena silvestre, imagen digital

5.1. Introducción

La avena silvestre (*Avena fatua* L.) es considerada uno de los principales problemas fitosanitarios en el cultivo de trigo a nivel mundial (Tidemann, 2021), esta maleza reduce el rendimiento del trigo por efecto directo de su alta competencia y en casos extremos provoca la pérdida total de la cosecha (Jäck *et al.*, 2017). El manejo de *A. fatua* en este cultivo se realiza principalmente con herbicidas inhibidores de la enzima ACCasa (Scursoni *et al.*, 2011; Sasanfar *et al.*, 2017).

Debido a esto es importante estudiar la susceptibilidad de *A. fatua* a los inhibidores de ACCasa, lo cual se lleva a cabo mediante estudios en campo y laboratorio, donde el método de evaluación se basa de forma general en la escala visual de la Sociedad Europea de la Ciencia de la Maleza (Qasem, 2007; Scursoni *et al.*, 2011), sin embargo, este método resulta poco confiable, debido a que la observación visual depende de la percepción observador, por tanto, los resultados son subjetivos. Por tal motivo es necesario contar con metodologías más confiables, altamente sensitivos y consistentes para diferenciar entre las plantas tratadas con los herbicidas.

Estudios recientes involucran el uso de imágenes multispectrales para medir la toxicidad de los herbicidas (Yao *et al.*, 2012; Huang *et al.*, 2016), pero estas mediciones se hacen mediante equipos especializados (Espectroradiómetros) que generalmente no se encuentran al alcance de los productores. Por otro lado, el uso de cámaras digitales convencionales pueden ser una herramienta útil en la detección de la toxicidad herbicidas, las cámaras digitales permiten obtener imágenes de alta resolución y que a través de estas imágenes se pueden determinar los índices de vegetación basándose en la saturación, intensidad y tonalidad de la imagen (Casadesus y Villegas, 2014).

Los índices de vegetación permiten cuantificar características de las plantas tales como área foliar, senescencia de las hojas, la cobertura de pastizales y la calidad de césped (Li *et al.*, 2005; Lati *et al.*, 2011). El uso de cámaras digitales podría representar una alternativa adicional para los estudios de toxicidad de herbicidas, mediante la determinación de los índices GA y GGA utilizando un software Breedpix® 0.1, de esta manera se estimaría el control de maleza a partir del incremento o disminución de la vegetación (Velasco-López *et al.*, 2020). Por tal motivo, en esta investigación se planteó el objetivo de estudiar la relación de los índices de vegetación y la toxicidad del herbicida pinoxaden sobre dos poblaciones de *A. fatua*.

5.2. Materiales y métodos

5.2.1. Material Biológico

Se recolectaron dos poblaciones de avena *A. fatua*, una población el cultivo de alfalfa y otra en el cultivo de trigo en el valle de Mexicali, Baja California. Las semillas de ambas poblaciones se germinaron en cajas de Petri sobre papel secante humedecido con 10 mL de agua destilada, estas se mantuvieron a temperatura de 4 °C por 48 h, posteriormente, se incubaron a temperatura ambiente ($23\pm 2^{\circ}\text{C}$) en oscuridad por 24 h y finalmente se colocaron en cámara de crecimiento a temperatura (21.1°C) con un fotoperíodo de 16:8 horas luz: oscuridad.

Se trasplantaron siete plantas de *A. fatua* con 1 cm de hipocótilo en macetas de plástico de 14 cm de diámetro x 10.57 cm de profundidad (1.2 L de volumen), se empleó como sustrato materia orgánica y tierra limo en proporción de 5:3 v/v. Las plantas fueron fertilizadas desde la etapa de primera hoja hasta la etapa de 3-4 hojas, con fertilizante comercial Poly Feed (19-19-19 + M.E) a razón de 10 g L^{-1} de agua.

5.2.2. Diseño Experimental

El experimento consistió en evaluar tres concentraciones (30, 60 y 120 g i.a ha^{-1}) del herbicida pinoxaden y un testigo (Solo agua) en las dos poblaciones de *A. fatua*. El experimento se llevó a cabo bajo condiciones controladas en laboratorio (Temperatura $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ y fotoperíodo de 16:8 h luz: oscuridad), se empleó un diseño completamente al azar con arreglo factorial 2x4, siendo el factor A, las dos poblaciones de avena silvestre y el factor B las tres concentraciones del herbicida y el testigo, se incluyeron tres repeticiones, siendo una repetición una maceta conteniendo siete plantas de avena silvestre.

La etapa de 3-4 hojas verdaderas se consideró como criterio para la aplicación de los tratamientos de herbicida, la solución del herbicida se preparó con agua destilada y se adicionó 3 mL L^{-1} de agua del adherente Inex A (Alcohol Graso Etoxilado y Polidimetilsiloxano). Las soluciones de herbicida se aplicaron con un aplicador manual con boquilla de abanico plano (Teejet 8002), acoplado a un compresor de aire, calibrado a una presión de 35 PSI y un gasto de agua de 400 L ha^{-1} .

Las evaluaciones de los tratamientos en ambas poblaciones de *A. fatua* se realizaron a los 6, 12, y 18 días después de la aplicación (DDA). La toxicidad del herbicida se avaluó mediante la estimación del porcentaje de control visual para cada unidad experimental con la escala propuesta por la Sociedad Europea de Ciencia de la Maleza (EWRS) (Ciba-Geigy ag, 1992) y la altura de plantas se midió mediante el uso de una regla graduada en centímetros (Burril *et al.*, 1977). Los índices fotográficos para ambas poblaciones de *A. fatua* se obtuvieron mediante imágenes digitales tomadas con una cámara digital de 12.1 megapíxeles (SONY Cyber-shot DSCW200), los cuales fueron procesados con el Software Breedpix® 0.1. para estimar los índices de vegetación área verde (GA) y área más verde (GGA).

5.2.3. Análisis Estadístico

Los datos del experimento de toxicidad, altura de planta e índices de vegetación se analizaron mediante un ANOVA con un diseño completamente al azar con arreglo factorial 2X4 mediante el procedimiento PROC GLM y las medias de los mínimos cuadrados se compararon con Tukey con nivel de significancia de 0.05 (SAS, 2001). La relación de la toxicidad y los índices de vegetación se analizó mediante correlación de Pearson empleando el PROC CORR (SAS, 2001).

5.3. Resultados y discusión

El análisis de varianza indicó que los efectos de los factores población de *A. fatua*, concentración de pinoxaden y sus interacciones fueron significativos para el control y altura de planta en ambas poblaciones de avena silvestre a los 6 ($F = 102.46$; $gl=3$; $p = 0.0001$; $F = 13.56$; $gl = 3$; $p = 0.0001$ respectivamente) y 12 DDA ($F = 35.34$; $gl = 3$; $p = 0.0001$; $F = 8.54$; $gl = 3$; $p = 0.0013$ respectivamente), mientras que a los 18 DDA la interacción de estos factores no fue significativa ($F = 3.03$; $gl = 3$; $p = 0.0597$; $F = 2.88$; $gl = 3$; $p = 0.0683$ respectivamente). Para el caso de las variables GA y GGA, el análisis de varianza indicó que el efecto de la interacción de la población *A. fatua* y la concentración del herbicida no fue significativa a los 6 ($F = 0.52$; $gl = 3$; $p = 0.6811$; $F = 0.81$; $gl = 3$; $p = 0.0510$ respectivamente), 12 ($F = 2.26$; $gl = 3$; $p = 0.1204$; $F = 2.44$; $gl = 3$; $p = 0.1022$ respectivamente) y 18 DDA ($F = 2.44$; $gl = 3$; $p = 0.1034$; $F = 1.51$; $gl = 3$; $p = 0.2483$ respectivamente), sin embargo, los efectos de los factores simples si fueron significativos para los índices GA y GGA en ambas poblaciones de avena silvestre.

En general las concentraciones de 30, 60 y 120 g i.a ha⁻¹ de pinoxaden en la población de alfalfa controlaron más que en la población de trigo (Cuadro 1) a los 6 (F = 732.30; gl = 1; p = 0.0001), 12 (F = 63.18; gl = 1; p = 0.0001) y 18 DDA (F = 6.20; gl =1; p = 0.0242). La población de trigo presentó mayor porcentaje de control cuando se incrementó la concentración de pinoxaden (Cuadro 1) a los 6 (F =599.24; gl = 3; p = 0.0001), 12 (F = 352.39; gl = 3; p = 0.0001) y 18 DDA (F = 79.94; g l= 3; p = 0.0001). En contraste en la población de alfalfa las tres concentraciones del herbicida provocaron iguales porcentajes de control a los 12 y 18 DDA (Cuadro 1).

Los resultados de este estudio sugieren que hay una diferencia de susceptibilidad entre las dos poblaciones de *A. fatua* evaluadas, indicando que pinoxaden es más fitotóxico para población de alfalfa en comparación con la población de trigo (Cuadro 1). La población de alfalfa obtuvo más 80% de control a los 6 DDA sin importar la concentración evaluada, a los 12 y 18 DDA alcanzó más 97 y 100 % de control respectivamente en las tres concentraciones probadas, sugiriendo que pinoxaden presenta una rápida acción de control sobre esta población de *A. fatua*, lo cual coincide con lo reportado por Scursoni *et al.* (2021) cuando evaluaron pinoxaden sobre *A. fatua*.

Cuadro 1. Efecto de tres concentraciones de pinoxaden sobre porcentaje de control en dos poblaciones de *Avena fatua* durante tres periodos de evaluación después de la aplicación de los tratamientos.

| Periodo de Evaluación | Tratamiento (g i.a ha ⁻¹) | % Control | |
|-----------------------|---------------------------------------|-----------|-----------|
| | | Alfalfa | Trigo |
| 6 DDA | Test | 0.000fCx | 0.000fADx |
| | 30 | 83.093bBx | 18.333eCy |
| | 60 | 88.807aAx | 43.333dBy |
| | 120 | 90.000aAx | 55.000cAy |
| 12 DDA | Test | 0.000dBx | 0.000dDx |
| | 30 | 97.380aAx | 36.667cCy |
| | 60 | 97.857aAx | 85.000bBy |
| | 120 | 99.333aAx | 97.000aAx |
| 18 DDA | Test | 0.00Bx | 0.000Cx |
| | 30 | 100.00Ax | 61.67By |
| | 60 | 100.00Ax | 86.67Ax |
| | 120 | 100.00Ax | 100.00Ax |

Las letras A-D muestran la comparación entre concentraciones para una población y un tiempo de evaluación a manera de columnas. Las letras a-d muestran la interacción de las poblaciones y concentraciones para un tiempo de evaluación. Las letras x-y muestran la comparación entre poblaciones para una concentración y un tiempo de evaluación de manera lineal.

En cambio, la población de trigo presentó menos de 60 % de control con las tres concentraciones evaluadas a los 6 DDA, aun cuando el porcentaje de control se incrementó a los 12 y 18 DDA, solo la concentración de 120 g.i.a ha⁻¹ de pinoxaden obtuvo 100 % de control (Cuadro 3) a los 18 DDA, lo cual indica que esta población presenta mayor tolerancia hacia este herbicida, probablemente esto debido a que pinoxaden (inhibidor de ACCasa) es uno de los herbicidas más usados en el valle de Mexicali para el control de esta maleza en el cultivo de trigo (Tafoya-Razo *et al.*, 2017), en consecuencia, la población de *A. fatua* de este estudio proveniente de trigo pudo haber tenido mayor presión de selección para este herbicida, disminuyendo de esta forma su susceptibilidad a pinoxaden (Cruz-Hipolito *et al.*, 2011). En contraste en el cultivo de alfalfa el control de maleza se realiza mediante diferentes opciones de herbicidas como por ejemplo Carfentrazon, diuron, flumioxazin, hexazinon, imazetapyr, metribuzina, pendimentalina, paraquat, saflufenacil (Adjesiwor y Prather, 2022) lo que evita que haya presión de selección para un grupo específico de herbicida, debido a esto la población de *A. fatua* proveniente del cultivo de alfalfa presentó alta susceptibilidad a pinoxaden.

Las tres concentraciones de pinoxaden exhibieron menor altura de planta en comparación con el testigo (Sin aplicación) en ambas poblaciones de *A. fatua* (Cuadro 2) a los 6 (F = 51.01; gl = 3; p = 0.0001), 12 (F = 72.23; gl = 3; p = 0.0001) y 18 DDA (F = 81.72; gl = 3; p = 0.0001). La población de alfalfa presentó menor altura de planta en comparación con la población de trigo a los 6 DDA (F = 114.01; gl = 1; p = 0.0001) 12 (F = 63.51; gl = 1; p = 0.0001) y 18 DDA (F = 24.70; gl = 1; p = 0.0001) independientemente de la concentración de pinoxaden (Cuadro 2).

Cuadro 2. Efecto de tres concentraciones de pinoxaden sobre altura de planta en dos poblaciones de *Avena fatua* durante tres periodos de evaluación después de la aplicación de los tratamientos.

| Periodo de Evaluación | Tratamiento (g i.a ha ⁻¹) | Altura (cm) | |
|-----------------------|---------------------------------------|-------------|-----------|
| 6 DDA | | Alfalfa | Trigo |
| | Test | 17.797bAy | 37.193aAx |
| | 30 | 12.330cBy | 20.233bBx |
| | 60 | 11.940cBy | 17.080bBx |
| | 120 | 10.653cBy | 16.657bBx |
| 12 DDA | | Alfalfa | Trigo |
| | Test | 30.673bAy | 55.687aAx |
| | 30 | 11.760cBy | 29.033bBx |
| | 60 | 10.700cBy | 16.783cCx |
| | 120 | 10.837cBy | 15.353cCx |
| 18 DDA | | Alfalfa | Trigo |
| | Test | 48.01Ax | 55.63Ax |
| | 30 | 11.34By | 31.63Bx |
| | 60 | 10.65By | 17.73Cx |
| | 120 | 9.77By | 15.07Cx |

Las letras A-D muestran la comparación entre concentraciones para una población y un tiempo de evaluación a manera de columnas. Las letras a-d muestran la interacción de las poblaciones y concentraciones para un tiempo de evaluación. Las letras x-y muestran la comparación entre poblaciones para una concentración y un tiempo de evaluación de manera lineal.

A los 6 DDA las concentraciones de 30, 60 y 120 g.i.a ha⁻¹ de pinoxaden provocaron 30.71, 32.91 y 40.14 % menor altura respectivamente en la población de alfalfa con respecto al tratamiento testigo. Mientras que en la población de trigo la reducción de la altura fue de 45.59, 54.08 y 55.21 % para 30, 60 y 120 g i.a ha⁻¹ del herbicida respectivamente (Cuadro 2).

Así mismo la reducción de la altura de planta en ambas poblaciones se incrementó a los 12 DDA con un porcentaje promedio de 63.80 y 63.39 % para la población de alfalfa y trigo respectivamente. Similar comportamiento se presentó para 18 DDA, con porcentaje promedio de 77 y 61.39 % para la población de alfalfa y trigo respectivamente. Esta consecuencia negativa de pinoxaden sobre la altura de planta en ambas poblaciones de *A. fatua* pudiera estar relacionada con la muerte del tejido meristemático (Kukorelli *et al.*, 2013), que provoca pinoxaden a causa de la

inhibición de la síntesis de lípidos que constituyen las membranas de estas células de crecimiento y muerte celular (Kaundun, 2014) lo que reduce el crecimiento de nuevas hojas en las plantas tratadas (Kukorelli *et al.*, 2013) y por consiguiente se reduce la altura de planta en ambas poblaciones estudiadas.

Aun cuando existe una reducción significativa de pinoxaden sobre la altura de planta en ambas poblaciones, el efecto fue menor en la población de trigo en las tres fechas evaluación y en las tres concentraciones del herbicida la altura de planta de la población de trigo fue significativamente mayor a la altura de la población de alfalfa, destacando la concentración de 30 g i.a ha⁻¹, donde la altura de la población de trigo supero en 39.06, 59.49 y 64.15 % a la población de alfalfa para los 6, 12 y 18 DDA respectivamente. Lo que indica que esta concentración no fue suficiente para provocar la muerte del tejido meristemático y que además es posible que las plantas de la población de trigo, debido a su mayor tolerancia puedan metabolizar la molécula del herbicida y mostrar una recuperación los efectos tóxicos de pinoxaden, expresando un mayor crecimiento. Otro aspecto que podría explicar este resultado es que la concentración 30 g i.a ha⁻¹, es una concentración reducida al 50 % de la concentración recomendada para el control de *A. fatua* en el cultivo de trigo (60 g i.a ha⁻¹), lo que también pudo haber provocado menor reducción de altura de planta, lo que coincide con Scursoni *et al.* (2021), quienes indican que disminuir al 50 % la dosis de campo del herbicida fenoxaprop (inhibidor de ACCasa), provoca menor efecto sobre la producción de biomasa en *A. fatua*, lo cual pudiera traducirse en mayor altura de planta como sucedió en esta investigación.

La concentración de 120 g.i.a ha⁻¹ de pinoxaden exhibió menor GA en comparación con el testigo, 30 y 60 g i.a ha⁻¹ en ambas poblaciones de *A. fatua* (Cuadro 3) a los 6 DDA (F = 4.94; gl=3; p = 0.0003). Mientras que las tres concentraciones del herbicida presentaron menor GA en comparación con el testigo a los 12 (F = 17.28; gl=3; p = 0.0001) y 18 DDA (F = 13.20; gl=3; p = 0.0001) en ambas poblaciones. Se presentó menor GA en la población de alfalfa en comparación con la población de trigo (Cuadro 3) para las concentraciones de 30, 60 y 120 g i.a ha⁻¹ de pinoxaden a los 6 (F = 21.67; gl=1; p = 0.0127), 12 (F = 29.38; gl=1; p = 0.0001) y 18 DDA (F = 11.40; gl=1; p = 0.0039).

Cuadro 3. Efecto de tres concentraciones de pinoxaden sobre el área verde (Índice GA) en dos poblaciones de *Avena fatua* durante tres periodos de evaluación después de la aplicación de los tratamientos.

| Periodo de Evaluación | Tratamiento | Índice GA | |
|-----------------------|-------------|-----------|-----------|
| | | Alfalfa | Trigo |
| 6 DDA | Test | 0.1600Ax | 0.1867Ax |
| | 30 | 0.1267Ay | 0.1833Ax |
| | 60 | 0.1233Ay | 0.1733ABx |
| | 120 | 0.1033By | 0.1433Bx |
| 12 DDA | Test | 0.1567Ax | 0.2200Ax |
| | 30 | 0.0533By | 0.2000Ax |
| | 60 | 0.0300By | 0.1100Bx |
| | 120 | 0.0267By | 0.0667Bx |
| 18 DDA | Test | 0.1167Ay | 0.1967Ax |
| | 30 | 0.0433By | 0.1233Bx |
| | 60 | 0.0233By | 0.0933BCx |
| | 120 | 0.0133By | 0.0333Cx |

Las letras A-D muestran la comparación entre concentraciones para una población y un tiempo de evaluación a manera de columnas. Las letras x-y muestran la comparación entre poblaciones para una concentración y un tiempo de evaluación de manera lineal.

Para la población de alfalfa las tres concentraciones del herbicida mostraron menor GGA en comparación con el testigo a los 12 ($F = 12.30$; $gl=3$; $p = 0.0002$) y 18 DDA ($F = 9.85$; $gl=3$; $p = 0.0006$), en tanto que a los 6 DDA ($F = 8.29$; $gl=3$; $p = 0.0016$) el testigo y 30 g.i.a ha⁻¹ de pinoxaden presentaron mayor GGA en comparación con las concentraciones de 60 y 120 g i.a ha⁻¹ del herbicida (Cuadro 4). Para el caso de la población de trigo las concentraciones 60 y 120 g i.a ha⁻¹ manifestaron valores menores de GGA en comparación con el testigo y 30 g.i.a ha⁻¹ de pinoxaden a los 12 ($F = 12.30$; $gl=3$; $p = 0.0002$) y 18 DDA ($F = 9.85$; $gl=3$; $p = 0.0006$). Hubo menor GGA en la población de alfalfa en comparación con la población de trigo para las tres concentraciones de pinoxaden (Cuadro 4) a los 6 ($F = 80.00$; $gl=1$; $p = 0.0001$), 12 ($F = 27.04$; $gl=1$; $p = 0.0001$) y 18 DDA ($F = 15.67$; $gl=1$; $p = 0.0011$).

Cuadro 4. Efecto de tres concentraciones de pinoxaden sobre el área más verde (Índice GGA) en dos poblaciones de *Avena fatua* durante tres periodos de evaluación después de la aplicación de los tratamientos.

| Periodo de Evaluación | Tratamiento | Índice GGA | |
|-----------------------|-------------|------------|-----------|
| | | Alfalfa | Trigo |
| 6 DDA | Test | 0.1033Ay | 0.1500Ax |
| | 30 | 0.0767Ay | 0.1433Ax |
| | 60 | 0.0667By | 0.1400Ax |
| | 120 | 0.0533By | 0.1067Bx |
| 12 DDA | Test | 0.0967Ay | 0.1667Ax |
| | 30 | 0.0233By | 0.1533Ax |
| | 60 | 0.0133By | 0.0733Bx |
| | 120 | 0.0100By | 0.0367Bx |
| 18 DDA | Test | 0.0633Ay | 0.1303Ax |
| | 30 | 0.0200ABy | 0.0833ABx |
| | 60 | 0.0100By | 0.0633Bx |
| | 120 | 0.0057By | 0.0097Cx |

Las letras A-D muestran la comparación entre concentraciones para una población y un tiempo de evaluación a manera de columnas. Las letras x-y muestran la comparación entre poblaciones para una concentración y un tiempo de evaluación de manera lineal.

Los índices vegetativos (GA y GGA) se han empleado para estimar la biomasa verde de las plantas (Casadesús *et al.*, 2007), lo cual se relaciona con el crecimiento de plantas sanas, por tal motivo dichos índices pueden diferenciar entre plantas en crecimiento bajo condiciones adecuadas y plantas en condiciones de estrés (Fiorani y Schurr, 2013). En este estudio los índices GA y GGA, diferenciaron entre las plantas de *A. fatua* afectadas por las concentraciones de pinoxaden y las plantas testigo (Sin tratamiento), en las dos poblaciones de *A. fatua*. Ambas poblaciones exhibieron una disminución gradual de los valores de los índices vegetativos a medida que la concentración del pinoxaden se incrementó (Cuadro 3 y 4), además estos resultados fueron consistentes en los diferentes tiempos de evaluación.

Aun cuando las dos poblaciones de *A. fatua* presentaron menores niveles de GA y GGA, la población de alfalfa mostro valores más bajos para estos índices vegetativos en comparación con la población de trigo independientemente de la concentración y tiempo de evaluación (Cuadro 3 y 4), este hecho pudiera estar relacionado a la mayor susceptibilidad que presentó esta población para

las diferentes concentraciones de pinoxaden que se evaluaron en esta investigación, referente a esto los análisis de correlación mostraron correlación negativa entre el porcentaje de control y el índice GA para las dos poblaciones de *A. fatua* indistintamente del tiempo de evaluación, similar correlación negativa presentaron ambas poblaciones para GGA (Cuadro 5). Indicando que los índices GA y GGA disminuyen a medida que el porcentaje de control aumenta.

Cuadro 5. Correlación de Pearson entre el porcentaje de control visual y herramientas digitales en dos poblaciones de *Avena fatua* procedentes del valle de Mexicali.

| Población | Variables | DDA | | |
|-----------|-----------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | | 6 | 12 | 18 |
| | | % Control | % Control | % Control |
| Alfalfa | GA | -0.72141 0.0081 | -0.92768 <.0001 | -0.86976 0.0003 |
| | GGA | -0.80110 0.0017 | -0.95329 <.0001 | -0.86555 0.0003 |
| Trigo | GA | -0.57351 0.0512 | -0.81531 0.0012 | -0.64865 0.0223 |
| | GGA | -0.61926 0.0318 | -0.79578 0.0020 | -0.59833 0.0399 |

La población de alfalfa presentó una correlación más fuerte en comparación con la población de trigo para el índice GA, con coeficientes de correlación de -0.72141, -0.92768 y -0.86976 para 6, 12 y 18 DDA respectivamente. Asimismo, para la población de alfalfa el índice GGA se correlaciono fuertemente con el porcentaje de control, con coeficientes de correlación de -0.80110, -0.95329 y -0.86555 para 6, 12 y 18 DDA respectivamente.

Estos resultados difieren a lo encontrado por Huang *et al.* (2016), quienes reportan baja correlación entre índices vegetativos y la toxicidad de dicamba en el cultivo de soya, concluyendo que no es adecuado utilizar los índices vegetativos para estimar la sensibilidad del herbicida dicamba, encontraste en este estudio la alta correlación entre el porcentaje de control y los índices GA y GGA sugiere que estos son adecuados para estimar la sensibilidad de *A. fatua* para herbicida pinoxaden bajo condiciones de laboratorio. Además, sugieren que estos índices vegetativos representan una herramienta promisorio para su uso en experimentos de laboratorio para evaluar la susceptibilidad de herbicidas, proporcionando información complementaria o sustituyendo la evaluación visual de la toxicidad de los herbicidas, ya que este tipo de evaluación (visual), es

subjetiva dependiendo del operador quien realice la evaluación por lo tanto los resultados pueden ser poco precisos, de aquí la necesidad de contar con herramientas que determinen la toxicidad de los herbicidas de manera objetiva, repetible y confiable, como es el caso de los GA y GGA obtenidos a través de imágenes digitales mediante el uso de cámaras digitales de tipo convencional.

5.4. Conclusiones

De acuerdo con los resultados de esta investigación se concluye que los valores de los índices de vegetación GA y GGA se correlacionaron de forma inversamente proporcional con el porcentaje de control del herbicida pinoxaden (Toxicidad). Además, se concluye que los índices GA y GGA obtenidos mediante imágenes de cámaras digitales son factibles para estimar los niveles de toxicidad del herbicida pinoxaden.

5.5. Referencias

1. Adjesiwor, A.T., and Prather, T.S. 2022. Forage alfalfa. In E. Peachey (Ed.) Pacific northwest weed management handbook. Oregon State University. <http://pnwhandbooks.org/weed/>.
2. Burril, L.C., Cárdenas, J., Locatelli, E. 1977. Manual de campo para investigación en control de malezas (No. 632.58 B971E). International Plant Protection Center, Corvallis, OR (EUA).
3. Casadesus, J., Kaya, Y., Bort, J., Nachit, M.M., Araus, J.L., Amor, S., Ferrazzano, G., Maalouf, F., Maccaferri, M., Martos, V., Ouabbou, H., Villegas, D. 2007. Using vegetation indices derived from conventional digital cameras as selection criteria for wheat breeding in water-limited environments. *Ann. Appl. Biol.* 150: 227-236. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2007.00116.x>.
4. Casadesús, J., Villegas, D. 2014. Conventional digital cameras as a tool for assessing leaf area index and biomass for cereal breeding. *J. Integr. Plant Biol.* 56:7-14. doi: 10.1111/jipb.12117.
5. Ciba-Geigy AG. 1992. Manual for field trials in plant protection. Third edition. Revised and enlarged. Plant Protection. Printed in Switzerland. p. 240-241.
6. Cruz-Hipolito, H; Osuna, M.D; Domínguez-Valenzuela, J.A; Espinoza, N., De prado, R. 2011. Mechanism of resistance to ACCase-inhibiting herbicides in wild oat (*Avena fatua*) from Latin America. *J. Agric. Food Chem.* 59(13): 7261-7267. doi: 10.1021/jf201074k.
7. Fiorani, F., Schurr, U. 2013. Future Scenarios for Plant Phenotyping. *Annu. Rev. Plant Biol.* 64: 267-291. doi: 10.1146/annurev-arplant-050312-120137.

8. Kaundun, S.S. 2014. Resistance to acetyl-CoA carboxylaseinhibiting herbicides. *Pest Manag. Sci.* 70: 1405-1417. doi: 10.1002/ps.3790.
9. Kukorelli, G., Reisinger, P., Pinke, G. 2013. ACCase inhibitor herbicides: selectivity, weed resistance and fitness cost, a review. *Int. J. Pest Manag.* 59: 165-173. <https://doi.org/10.1080/09670874.2013.821212>.
10. Huang, Y., Yuan, L., Reddy, K.N., Zhang, J. 2016. In-situ plant hyperspectral sensing for early detection of soybean injury from dicamba. *Biosyst. Eng.* 149:51-59. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.06.013>.
11. Jäck, O., Menegat, A., Gerhards, R. 2017. Winter wheat yield loss in response to *Avena fatua* competition and effect of reduced herbicide dose rates on seed production of this species. *J. Plant Dis. Prot.* 124:371-382. <https://doi.org/10.1007/s41348-017-0081-0>.
12. Lati, R.N., Filin, S., Eizenberg, H. 2011. Robust methods for measurement of leaf-cover area and biomass from image data. *Weed Sci.* 59: 276–284. <https://doi.org/10.1614/WS-D-10-00054.1>.
13. Li, X.B., Chen, Y.H., Yang, H., Zhang, Y.X. 2005. Improvement, comparison, and application of field measurement methods for grassland vegetation fractional coverage. *J. Integr. Plant Biol.* 47: 1074-1083. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7909.2005.00134.x>.
14. Qasem, J.R. 2007. Chemical control of wild-oat (*Avena sterilis* L.) and other weeds in wheat (*Triticum durum* Desf.) in Jordan. *Crop Prot.* 26: 1315-1324. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2006.11.006>.
15. Sasanfar, H., Zand, E., Baghestani, M.A., Mirhadi, M.J., Mesgaran, M.B. 2017. Cross-resistance patterns of winter wild oat (*Avena ludoviciana*) accessions to ACCase inhibitor herbicides. *Phytoparasitica.* 45:419-28. <https://doi.org/10.1007/s12600-017-0587-9>.
16. Scursoni, J.A., Martín, A., Catanzaro, M.P., Quiroga, J., Goldar, F. 2011. Evaluation of post-emergence herbicides for the control of wild oat (*Avena fatua* L.) in wheat and barley in Argentina. *Crop Prot.* 30: 18-23. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2010.09.003>.
17. Scursoni, J., Martín, A., Abbati, P., Bastanchuri, M., Gueventter, M., Di Iorio, E., Pulido, A., Sherriff, T., & Quistre, J. (2021). Crecimiento, supervivencia y fecundidad de individuos de *Avena fatua* L. tratados con herbicidas inhibidores de ALS e inhibidores de ACCasa. *RIA. Revista de investigaciones agropecuarias.* 47(3): 361-366.

http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1669-23142021000300361&lng=es&nrm=iso.

18. Tafoya-Razo, J.A., Núñez-Farfán, J., & Torres-García, J.R. (2017). Migration by seed dispersal of ACCase-inhibitor-resistant *Avena fatua* in north-western Mexico. *Pest Manag. Sci.* 73:167-173. doi: 10.1002/ps.4282.
19. Tidemann, B.D., Charles, M., Geddes, C.M., Hugh, J., & Beckie, H.J. (2021). *Avena fatua* and *Avena sterilis*. En: *Biology and Management of Problematic Crop Weed Species* (Ed: Bhagirath SC), pp. 43-66. <https://doi.org/10.1016/C2019-0-04831-5>.
20. Velasco-López, J.L., Soto-Ortiz, R., Ail-Catzim, C., Grimaldo-Juárez, O., Avilés-Marín, S. M., Lozano-Del Río, A.J. (2020). Relationship of photographic indexes and NDVI values to dry biomass production in triticale (*X Triticosecale* wittmack) in the Mexicali valley. *Agro Productividad.* 13(1): 29-35. <https://doi.org/10.32854/agrop.vi0.1565>.
21. Yao, H., Huang, Y., Hruska, Z., Thomson, S.J., & Reddy, K.N. (2012). Using vegetation index and modified derivative for early detection of soybean plant injury from glyphosate. *Comput. Electron. Agric.* 89: 145-157. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2012.09.001>.

CAPÍTULO VI. RELACIÓN DE NDVI Y CONTENIDO DE CLOROFILA CON FITOTOXICIDAD DE PINOXADEN EN DOS POBLACIONES DE *Avena fatua* L. EN LABORATORIO

Andrés González Ruiz¹, Guadalupe Alfonso López Urquídez¹, Carlos Enrique Ail Catzim², Hugo Enrique Cruz Hipólito³, Carlos Alfonso López Orona¹, Raymundo Medina López¹ y Mitzi Dayanira Estrada Acosta¹

¹Universidad Autónoma de Sinaloa, Facultad de Agronomía. Carretera Culiacán-Eldorado Km 17.5, Apartado postal 25, Tel: 667846-10-84, Culiacán de Rosales, Sinaloa, México.

Email: ag_ruiz2009@hotmail.com, alfonsolopezurquidez@uas.edu.mx, clopezorona@uas.edu.mx, mitziestrada@uas.edu.mx, raymedinalop@hotmail.com

²Universidad Autónoma de Baja California, Instituto de Ciencias Agrícolas. Carretera. Delta Oaxaca s/n C.P. 21705. Ejido Nuevo León, Mexicali, Baja California. Email: carlos.ail@uabc.edu.mx

³FMC Agroquímica de México. Avenida Vallarta 6503 A1 06 Ciudad Granja Zapopan Jalisco México 45010. Email: hugo.cruz@fmc.com

6.1. Introducción

La avena silvestre (*Avena fatua* L.) es una especie de maleza que causa pérdidas económicas en los cultivos de trigo y cebada a nivel mundial, esta especie en competencia con cultivos de cereales puede reducir el rendimiento hasta en un 70% (Beckie *et al.*, 2012). A causa de la importancia económica que representa la avena silvestre en el cultivo de trigo, los agricultores, para su control prefieren usar herbicidas químicos, principalmente herbicidas inhibidores de la enzima ACCasa (Sasanfar *et al.*, 2017), debido a que estos controlan las malezas en un tiempo mínimo. El manejo de malezas puede variar en una región agrícola, los agricultores pueden realizar aplicaciones repetitivas, aumentar la dosis o cambiar el modo de acción del herbicida cuando el control se considera deficiente (Cruz-Hipólito *et al.*, 2011). Lo cual provoca una variación en el grado de susceptibilidad a los herbicidas químicos en las poblaciones de la maleza.

Por lo anterior se justifica realizar estudios para conocer la susceptibilidad en diferentes poblaciones de *A. fatua* a los herbicidas inhibidores de ACCasa. Diversas investigaciones se han realizado para evaluar la efectividad biológica de herbicidas químicos en campo y laboratorio (Qasem, 2007; Scursoni *et al.*, 2011), por lo general se utiliza el método tradicional que consiste en utilizar variables cuantitativas como la altura de planta, densidad de plantas m⁻², evaluación

visual del control mediante la escala de la Sociedad Europea de la Ciencia de la Maleza y en algunos casos el rendimiento de cultivo (Burril *et al.*, 1977; Ciba-Geigy ag, 1992).

Por otra parte, se tienen reportes de investigaciones donde se hacen uso de tecnologías digitales para diagnosticar estrés fisiológico en las plantas (Gutiérrez-Soto *et al.*, 2011), con lo cual se puede diagnosticar los daños provocados por los herbicidas sobre la maleza. Por ejemplo, la tecnología infrarroja es una herramienta por la cual se puede monitorear la reflectancia de la planta de acuerdo con la respuesta espectral producida por los herbicidas (Huang *et al.*, 2018). Con los valores de reflectancia se estima el NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada), el cual se ha relacionado de forma inversamente proporcional con los síntomas provocados por diferentes grupos de herbicidas (Alvarenga *et al.*, 2023, Travlos *et al.*, 2021). En el mismo sentido, los medidores del índice relativo de clorofila (SPAD), y fluorescencia de la clorofila puede utilizarse para evaluar la eficacia de los herbicidas y para detectar los daños en el aparato fotosintético (Ali y Honermeier, 2016;), por lo que podrían ser de ayuda para la medición de la toxicidad causada por herbicidas inhibidores de la ACCasa (Cobb y Reade, 2010).

Si bien el uso de tecnología digitales se ha generalizado en la agricultura para el diagnóstico de diferentes tipos de estrés biótico o abiótico a nivel de campo, incluido la evaluación de la susceptibilidad de herbicidas. Para el caso de los herbicidas existen pocos estudios del uso de estas tecnologías a nivel laboratorio sobre todo no existen estudios donde se relacione la toxicidad de pinoxaden con el NDVI y el contenido de clorofila lo cual puede proporcionar información complementaria en la evaluación visual de la toxicidad de los herbicidas inhibidores de la ACCasa. Por tal situación se planteó estudiar la relación de NDVI y contenido de clorofila con fitotoxicidad de pinoxaden en dos poblaciones de *Avena fatua* en laboratorio.

6.2. Materiales y métodos

6.2.1. Ubicación del experimento

El estudio se realizó en el laboratorio de Parasitología del Instituto de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma de Baja California, ubicado en Carretera a Delta S/N Ejido Nuevo León, a 50 km al sur de Mexicali, Baja California México (32°24'44,16" N, 115°11'56,87" O) y una altitud de 12 m durante el periodo de diciembre-junio del 2021.

6.2.3. Manejo de material vegetal

Se recolectaron dos poblaciones de *A. fatua*; una población se recolectó en cultivos de alfalfa (32° 25' 8.48" N, 115° 3' 48.19" O) y otra en cultivos de trigo (32° 35' 14.04" N, 114° 56' 20.44" O), en el valle de Mexicali, Baja California. Las semillas de ambas poblaciones se germinaron en cajas de Petri sobre papel secante humedecido con 10 mL de agua destilada. Estas se mantuvieron a temperatura de 4 °C por 48 h. Posteriormente, se incubaron a temperatura ambiente (23±2 °C) en oscuridad por 24 h. Finalmente, se colocaron en una cámara de crecimiento a una temperatura de 21±1 °C, con un fotoperíodo de 16 horas luz y 8 horas oscuridad.

Se trasplantaron siete plantas de *A. fatua* con 1 cm de hipocótilo en macetas de plástico de 14 cm de diámetro x 10.57 cm de profundidad (1.2 L de volumen). Como sustrato, se utilizó una mezcla de materia orgánica y tierra limo en una proporción de 5:3 v/v. Las plantas fueron fertilizadas desde la etapa de primera hoja hasta la etapa de 3-4 hojas, con fertilizante comercial Poly-Feed GG (19N-19P-19K + M.E, Haifa México) a una dosis de 10 g L⁻¹ de agua.

6.2.4. Diseño experimental

El experimento consistió en evaluar 0.5x, 1.0x y 2.0x la concentración comercial de pinoxaden (60 g.i.a ha⁻¹) para el control de *A. fatua* en campo, las cuales corresponden a 30, 60 y 120 g.i.a ha⁻¹ del herbicida pinoxaden respectivamente y un testigo (Solo agua) en las dos poblaciones de *A. fatua*. El experimento se llevó a cabo bajo condiciones controladas en laboratorio (temperatura 23±2°C y fotoperiodo de 16:8 h luz: oscuridad), utilizando un diseño completamente al azar con arreglo factorial 2x4. El factor A correspondió a las dos poblaciones de *A. fatua*, mientras que el factor B representa las tres concentraciones del herbicida y el testigo. Se incluyeron tres repeticiones para cada tratamiento, cada una representada por una maceta conteniendo siete plantas de *A. fatua*.

La aplicación de los tratamientos de herbicida se realizó cuando las plantas de *A. fatua* estuvieron en la etapa de 3-4 hojas verdaderas. La solución del herbicida se preparó con agua destilada y se adicionó 3 mL L⁻¹ de agua del adherente Inex A (Alcohol Graso Etoxilado y Polidimetilsiloxano). Las soluciones de herbicida se aplicaron con un pulverizador manual provisto con una boquilla de abanico plano (Teejet, 8002), acoplado a un compresor de aire, calibrado a una presión de 35 PSI y un gasto de agua de 400 L ha⁻¹.

6.2.5. Evaluación de tratamientos

Las evaluaciones de los tratamientos en ambas poblaciones de *A. fatua* se realizaron a los 3, 9, 15, y 21 días después de la aplicación (DDA). La toxicidad del herbicida se avaluó mediante la estimación del porcentaje de control visual para cada unidad experimental con la escala propuesta por la Sociedad Europea de Ciencia de la Maleza (EWRS) (Ciba-Geigy ag, 1992). Adicionalmente, se calculó el índice de control de maleza (ICM) a partir de la producción de materia seca (Lal y Suryavanshi, 2017) para cada tratamiento a los 21 DDA, para lo cual se empleó la ecuación 1:

$$\text{ICM} = \left(\frac{\text{Peso seco del testigo} - \text{peso seco del tratamiento}}{\text{Peso seco del testigo}} \right) \times 100 \quad \text{Ecuación 1}$$

Las mediciones del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) se realizaron a una distancia de 0.60 m sobre el dosel de las plantas con el sensor portátil GreenSeeker™ Handheld® (Ntech Industries Inc.). El contenido relativo de clorofila fue medido en la parte media de la hoja inmediata anterior respecto a la hoja bandera de cada planta de *A. fatua*, se empleó un medidor de clorofila portátil SPAD 502 Plus (Konica Minolta Inc.).

Análisis de resultados

Los datos del experimento para porcentaje visual de control, NDVI y contenido de Clorofila se analizaron mediante un análisis de medidas repetidas con arreglo factorial en el tiempo PROC MIXED (SAS 2001) y las medias de los mínimos cuadrados se compararon con Tukey. Para las variables producción de materia seca e índice de control de maleza (ICM) los datos se analizaron mediante un diseño completamente al azar con arreglo factorial 2x4, las medias de los mínimos cuadrados se compararon con Tukey PROC GLM (SAS 2001). La relación de la toxicidad entre NDVI y contenido de clorofila se analizó mediante correlación de Pearson empleando el PROC CORR (SAS, 2001).

6.3. Resultados y discusión

6.3.1. Toxicidad de herbicida e ICM

El análisis de varianza de medidas repetidas con arreglo factorial en el tiempo para porcentaje de control de dos poblaciones de *A. fatua* expuestas a pinoxaden demostró diferencias significativas entre poblaciones de avena silvestre, concentración del herbicida, tiempo de evaluación y sus interacciones (Cuadro 1).

Cuadro 1. Análisis de varianza de medidas repetidas con arreglo factorial en el tiempo para el porcentaje de control de dos poblaciones de *Avena fatua* expuestas a tres concentraciones de pinoxaden y un testigo (solo agua).

| Fuente de Variación | Porcentaje de control | | |
|------------------------------------|-----------------------|--------------------|--------------------|
| | GL | F _{valor} | P _{valor} |
| Población | 1 | 25.05 | 0.0001 |
| Concentración | 3 | 103.79 | 0.0001 |
| Tiempo | 3 | 208.55 | 0.0001 |
| Población x concentración | 3 | 7.13 | 0.0030 |
| Población x tiempo | 3 | 2.08 | 0.1158 |
| Concentración x tiempo | 9 | 28.17 | 0.0001 |
| Población x concentración x tiempo | 9 | 4.09 | 0.0006 |

El herbicida pinoxaden provocó mayor porcentaje de control ($F = 25.05$, $gl=1$, $p = 0.0001$) para la población de *A. fatua* recolectada en el cultivo de alfalfa en comparación con la población proveniente del cultivo de trigo (Cuadro 2). Las concentraciones de 30 y 60 g.i.a ha⁻¹ de pinoxaden provocaron mayor porcentaje de control ($F = 103.79$, $gl=3$, $p = 0.0001$) en la población de alfalfa en comparación con la población de trigo independientemente del tiempo de evaluación, indicando mayor fitotoxicidad para esta población (Cuadro 2). Además, pinoxaden provocó mayor porcentaje de control con el incremento de la concentración en la población de trigo, independientemente de la fecha de evaluación ($F = 28.17$, $gl=9$, $p = 0.0001$), encontraste, las tres concentraciones de pinoxaden no presentaron diferencias significativas en el porcentaje de control a los 9, 15 y 21 DDT en la población de alfalfa, indicando mayor susceptibilidad de esta población, debido a que

los efectos tóxicos de pinoxaden se observaron de forma más rápida. Se observa también un incremento en el porcentaje de control a medida que pasa el tiempo ($F = 208.55$, $gl=3$, $p = 0.0001$) independientemente de la concentración y la población evaluada.

Cuadro 2. Medias de los mínimos cuadrados para el porcentaje de control de dos poblaciones de *Avena fatua* expuestas a tres concentraciones de pinoxaden y un testigo.

| Concentración (g.i.a ha ⁻¹) | Población de <i>Avena fatua</i> | | | | | | | |
|--|---------------------------------|----------|----------|-----------|----------|----------|----------|-----------|
| | Trigo | | | | Alfalfa | | | |
| | DDA | | | | DDA | | | |
| | 3 | 9 | 15 | 21 | 3 | 9 | 15 | 21 |
| 0.00 | 0.00dAx | 0.00dDx | 0.00dDx | 0.00dCx | 0.00dBx | 0.00dBx | 0.00dBx | 0.00dBx |
| 30.00 | 10.00dAx | 33.33cCy | 53.33cCy | 59.83cBy | 48.09cAy | 92.38aAx | 99.47aAx | 100.00aAx |
| 60.00 | 20.00dAx | 81.67bBy | 85.00bBy | 88.26aAz | 50.00cAy | 88.81aAx | 99.90aAx | 100.00aAx |
| 120.00 | 20.00dAx | 91.67aAy | 99.33aAy | 100.00aAy | 50.00cAy | 97.56aAx | 99.95aAx | 100.00aAx |

Las letras A-D muestran la interacción de una población, concentraciones y un tiempo de evaluación a manera de columnas. Las letras a-d muestran la interacción de las poblaciones, concentraciones y tiempos de evaluación. Las letras x-z muestran la interacción de una población, una concentración y tiempos de evaluación de manera lineal.

En el cuadro 3 se observa que con el análisis de varianza con arreglo factorial para peso seco e índice de control de maleza (ICM) para dos poblaciones de *Avena fatua* expuestas a tres concentraciones de pinoxaden se mostró que hay diferencias significativas entre poblaciones de avena silvestre, concentración del herbicida y su interacción.

Las tres concentraciones de pinoxaden ($F = 92.54$, $gl=3$, $p = 0.0001$) provocaron menor peso seco en ambas poblaciones de *A. fatua* (Cuadro 4) en comparación con las plantas del testigo. Las concentraciones de 30 y 60 g.i.a ha⁻¹ indujeron menor peso seco para la población de alfalfa ($F = 39.44$, $gl=1$, $p = 0.0001$) en comparación con la población de trigo (Cuadro 4). Estos resultados indican que las plantas de avena silvestre provenientes del cultivo de alfalfa presentaron menor crecimiento inducido por la mayor fitotoxicidad de pinoxaden. Lo cual se corrobora con las evaluaciones de control visual (Cuadro 2) e ICM (Cuadro 4) donde se observa que las concentraciones de 30 y 60 g.i.a ha⁻¹ causaron mayor ICM en la población de alfalfa en comparación con la población de trigo ($F = 25.06$, $gl=1$, $p = 0.0447$). Así también se observa que las concentraciones de 30, 60 y 120 g.i.a ha⁻¹ de pinoxaden no se presentaron diferencias significativas para ICM en la población de alfalfa, indicando que este herbicida fue altamente toxico para la población de alfalfa aun en concentración reducida al 50% (0.5X). Mientras que estas tres concentraciones indujeron un incremento gradual de ICM (Cuadro 4) en la población de trigo a medida en que se incrementa la concentración del herbicida ($F = 4.07$, $gl=2$, $p = 0.0003$).

El mayor porcentaje de control (Cuadro 2), menor peso seco y mayor ICM (Cuadro 4) que presentó la población de *A. fatua* recolectada en el cultivo de alfalfa indican que fue más susceptible a pinoxaden en comparación con la población recolectada en el cultivo de trigo. En contraste la población proveniente de trigo exhibió menor porcentaje de control, mayor peso seco y menor ICM para las concentraciones de 30 y 60 g.i.a ha⁻¹ de pinoxaden, indicando que esta población presenta mayor tolerancia a este herbicida, esto se explica por el uso repetitivo de herbicidas con este mismo modo acción en el cultivo de trigo (Tafoya-Razo *et al.*, 2017), por lo tanto, *A. fatua* se ha sometido a una presión de selección a este herbicida, disminuyendo de esta forma su susceptibilidad a pinoxaden, lo que puede provocar fallos en su control y se puede seleccionar en el futuro poblaciones altamente resistentes a este herbicida (Espinoza *et al.*, 2009; Cruz-Hipolito *et al.*, 2011; Beckie *et al.*, 2012).

Por lo contrario la población proveniente de alfalfa presentó altos porcentajes de control a partir de los 9 DDT, donde obtuvo más de 80% de control y se alcanzó 100 % de control para las tres dosis

evaluadas (30, 60 y 120 g.i.a ha⁻¹) a los 15 y 21 DDT (Cuadro 2), indicando alta susceptibilidad de esta población, estos resultados coinciden con lo reportado por Keith *et al.* (2015), quienes obtuvieron 100% de control para una población de *A. fatua* proveniente de las periferias de un cultivo de cebada, libre de presión de selección para este herbicida. Además, los resultados de esta investigación permitieron identificar una población de *A. fatua* con baja tolerancia a pinoxaden, lo que sugiere que se puede considerar como una población susceptible para este herbicida, la cual puede ser empleada para monitorear las poblaciones de campo resistente a pinoxaden en el valle de Mexicali.

Cuadro 3. Análisis de varianza con arreglo factorial para peso seco y índice de control de maleza (ICM) de dos poblaciones de *Avena fatua* expuestas a tres concentraciones de pinoxaden y un testigo (solo agua).

| Fuente de Variación | Peso seco | | | ICM | | |
|---------------------------|-----------|--------------------|--------------------|-----|--------------------|--------------------|
| | GL | F _{valor} | P _{valor} | GL | F _{valor} | p _{valor} |
| Población | 1 | 39.44 | 0.0001 | 1 | 25.06 | 0.0447 |
| Concentración | 3 | 92.54 | 0.0001 | 2 | 4.07 | 0.0003 |
| Población x concentración | 3 | 4.83 | 0.0140 | 2 | 7.12 | 0.0092 |

Cuadro 4. Medias de los mínimos cuadrados para peso seco e índice de control de maleza (ICM) de dos poblaciones de *Avena fatua* expuestas a tres concentraciones de pinoxaden y un testigo.

| Concentración (g.i.a ha ⁻¹) | Peso seco (g) | | ICM (%) | |
|--|------------------|---------|------------|---------|
| | Trigo | Alfalfa | Trigo | Alfalfa |
| Testigo | 4.10aA | 3.390bA | - | - |
| 30 | 2.00cB | 0.373dB | 50.44bC | 88.12aA |
| 60 | 1.63cB | 0.376dB | 61.19bB | 88.01aA |
| 120 | 0.64dC | 0.510dB | 84.01aA | 83.75aA |

Las letras A-C muestran la interacción de una población y concentraciones a manera de columnas, para las variables peso seco y ICM. Las letras a-d muestran la interacción de las poblaciones y concentraciones

6.3.2. Determinación de índices de vegetación

Con el análisis de varianza de medidas repetidas con arreglo factorial en el tiempo para NDVI y unidades SPAD de plantas de *A. fatua* se muestran diferencias significativas entre poblaciones de avena silvestre, concentración del herbicida, tiempo de evaluación y sus interacciones (Cuadro 5). En el cuadro 6 se observa que, en general, las plantas de avena silvestre del cultivo de trigo presentaron valores mayores de NDVI en comparación con las plantas de la población de alfalfa ($F = 68.78$, $gl = 1$, $p = 0.0001$), las concentraciones de 30 y 60 g.i.a ha⁻¹ de pinoxaden provocaron mayor disminución de valores de NDVI en la población de alfalfa ($F = 21.43$, $gl = 3$, $p = 0.0001$), lo que puede ser debido al menor peso seco que exhibió la población (Menor crecimiento y desarrollo). En cambio, la concentración de 120 g.i.a ha⁻¹ en plantas provenientes de trigo presentó un comportamiento igual a las tres dosis de pinoxaden (Cuadro 4) aplicadas a las plantas de *A. fatua* proveniente de alfalfa, desde los 9 hasta los 21 DDA ($F = 4.71$, $gl = 3$, $p = 0.0058$). Los valores de NDVI para las plantas del cultivo de alfalfa fueron iguales independientemente de la dosis evaluada y el tiempo de evaluación, permaneciendo constante los valores durante todo el periodo de tiempo del experimento ($F = 4.90$, $gl = 9$, $p = 0.0001$).

En el cuadro 7 se observa que al inicio del experimento (3 DDAT) ambas poblaciones tuvieron valores de iguales de contenido de clorofila (Unidades SPAD), sin embargo, a los 9 15 y 21 DDT las plantas de avena silvestre de la población de alfalfa presentaron menor contenido de clorofila en comparación con las plantas de la población de trigo ($F = 11.57$, $gl=1$, $p = 0.0037$), independientemente del tiempo de evaluación. También se observa que ambas poblaciones disminuyeron los valores de contenido de clorofila a medida que transcurrió el tiempo después de la aplicación de las tres dosis de pinoxaden ($F = 64.04$, $gl=3$, $p = 0.0001$). Para el caso del tratamiento testigo, las unidades SPAD se incrementaron a través del tiempo para ambas poblaciones indicando que no hubo un efecto fitotóxico sobre estas plantas.

En general se presentaron valores menores de NDVI y SPAD para la población de alfalfa en comparación con la población de trigo, esto debido a que las dos poblaciones presentaron diferente grado de susceptibilidad al herbicida pinoxaden, siendo más fitotóxico para la población de alfalfa, lo que se reflejó en mayor porcentaje de control y menor producción de biomasa para esta población (Cuadro 4). Por lo tanto, los índices de vegetación para la población de alfalfa fueron inferiores en comparación con la población de trigo desde el 3 al 21 DDA (Cuadro 6), indicando que pinoxaden provocó menor crecimiento y desarrollo en esta población, lo cual se relaciona con valores menores de NDVI, similares resultados se han presentado cuando otras moléculas de herbicidas son aplicadas en campo, provocando menores valores de índices de vegetación (Thomasi *et al.*, 2021).

Mientras que la población proveniente de trigo, debido a su mayor tolerancia (menor porcentaje de control) a pinoxaden y menor disminución del peso seco con respecto al testigo (Cuadro 4), provocó mayores valores de NDVI en concentraciones de 30 y 60 g.i.a ha⁻¹ independientemente del tiempo de evaluación en comparación con la población de alfalfa. Mostrando que esta población presenta cierto grado de resistencia a este herbicida, lo cual es corroborado por reportes donde se indican que *A. fatua* es capaz de desarrollar resistencia después de seis a diez años de presión de selección, al grupo de herbicidas inhibidores de ACCasa (Takano *et al.*, 2021), al cual pertenece pinoxaden (Heap, 2020). Con respecto al contenido de clorofila, en general, se observó una disminución de las unidades SPAD con el incremento de la concentración de pinoxaden en ambas poblaciones independientemente del tiempo de evaluación. Se presentó mayor contenido de clorofila en la población de trigo en comparación con la población de alfalfa sobre todo en concentraciones de 30 y 60 g.i.a ha⁻¹.

Cuadro 5. Análisis de varianza de medidas repetidas con arreglo factorial en el tiempo para NDVI, unidades SPAD y temperatura de dos poblaciones de *Avena fatua* expuestas a tres concentraciones de pinoxaden y un testigo (solo agua).

| Fuente de Variación | NDVI | | | SPAD | | | Temperatura | | |
|------------------------------------|------|--------------------|--------------------|------|--------------------|--------------------|-------------|--------------------|--------------------|
| | GL | F _{valor} | P _{valor} | GL | F _{valor} | P _{valor} | GL | F _{valor} | P _{valor} |
| Población | 1 | 68.78 | 0.0001 | 1 | 11.57 | 0.0037 | 1 | 128.27 | 0.0001 |
| Concentración | 3 | 21.43 | 0.0001 | 3 | 36.56 | 0.0001 | 3 | 19.10 | 0.0001 |
| Tiempo | 3 | 2.54 | 0.0919 | 3 | 64.04 | 0.0001 | 3 | 3991.01 | 0.0001 |
| Población x concentración | 3 | 2.55 | 0.0674 | 3 | 3.37 | 0.0447 | 3 | 4.34 | 0.0204 |
| Población x tiempo | 3 | 4.71 | 0.0058 | 3 | 10.05 | 0.0001 | 3 | 6849.87 | 0.0001 |
| Concentración x tiempo | 9 | 6.63 | 0.0001 | 9 | 16.46 | 0.0001 | 9 | 14.06 | 0.0001 |
| Población x concentración x tiempo | 9 | 4.90 | 0.0001 | 9 | 1.29 | 0.2676 | 9 | 27.93 | 0.0001 |

Cuadro 6. Medias de los mínimos cuadrados para NDVI de dos poblaciones de *Avena fatua* expuestas a tres concentraciones de pinoxaden y un testigo.

| Concentración (g.i.a ha ⁻¹) | Trigo | | | | Alfalfa | | | |
|--|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | DDA | | | | DDA | | | |
| | 3 | 9 | 15 | 21 | 3 | 9 | 15 | 21 |
| 0.00 | 0.13Aby | 0.19Aax | 0.19Aax | 0.20Aax | 0.18Aax | 0.19Aax | 0.19Bax | 0.19Aax |
| 30.00 | 0.11Abx | 0.13Bbx | 0.13Bbx | 0.11Bbx | 0.06Bcx | 0.06Bcx | 0.05Bcx | 0.05Bcx |
| 60.00 | 0.11Abx | 0.10Bbx | 0.10Bbx | 0.10Bbx | 0.06Bcx | 0.06Bcx | 0.05Bcx | 0.05Bcx |
| 120.00 | 0.11Abx | 0.08Ccy | 0.05Ccz | 0.0C5cz | 0.06Bcx | 0.05Bcx | 0.05Bcx | 0.05Bcx |

Las letras A-D muestran la interacción de una población, concentraciones y un tiempo de evaluación a manera de columnas. Las letras a-d muestran la interacción de las poblaciones, concentraciones y tiempos de evaluación. Las letras x-z muestran la interacción de una población, una concentración y tiempos de evaluación de manera lineal.

Cuadro 7. Medias de los mínimos cuadrados para contenido de clorofila (Unidades SPAD) de dos poblaciones de *Avena fatua* expuestas a tres concentraciones de pinoxaden y un testigo.

| Concentración (g.i.a ha ⁻¹) | Trigo | | | | Alfalfa | | | |
|--|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | DDA | | | | DDA | | | |
| | 3 | 9 | 15 | 21 | 3 | 9 | 15 | 21 |
| 0.00 | 34.76Aax | 35.12Aax | 35.39Aax | 37.87Aay | 32.26Aax | 34.73Aax | 36.12Aaw | 38.07Aaw |
| 30.00 | 37.67Aay | 39.17Aax | 29.33Bbx | 24.41Bb | 36.55Aaw | 25.02Bbx | 11.51Bcy | 9.67Bcy |
| 60.00 | 36.23Aaw | 26.75Bbx | 15.05Ccy | 7.39Cdz | 37.39Aaw | 17.07Cbx | 8.85Cdy | 7.08Cdy |
| 120.00 | 36.94Aaw | 20.21Bcx | 7.66Ddy | 3.43Ddz | 37.58Aaw | 14.85Cbx | 11.97Bcy | 11.15Bcy |

Las letras A-D muestran la interacción de una población, concentraciones y un tiempo de evaluación a manera de columnas. Las letras a-d muestran la interacción de las poblaciones, concentraciones y tiempos de evaluación. Las letras w-z muestran la interacción de una población, una concentración y tiempos de evaluación de manera lineal.

En el cuadro 8 se observa que ambas poblaciones de *A. fatua* presentaron una correlación inversamente proporcional entre el porcentaje de control con respecto a NDVI y contenido de clorofila (Unidades SPAD). En la población de trigo se presentó fuerte correlación entre el porcentaje de control y las unidades SPAD, a los 9, 15 y 21 DDA, indicando que a medida que pasa el tiempo el control se incrementa, pero el contenido de clorofila disminuye de forma más notoria. En cambio, los coeficientes de correlación para NDVI y porcentaje de control para la población de trigo no fueron estables, a los 9 DDA se presentó correlación de -0.94838, pero a los 15 DDA el coeficiente disminuyó (-0.43390) y finalmente a los 21 DDA se presentó fuerte correlación (-0.96084).

Para el caso de la población de alfalfa ambos, NDVI y SPAD, estuvieron altamente correlacionados con el porcentaje de control desde los 9 DDA hasta 21 DDA, indicando que esta población fue más estable con respecto a su susceptibilidad para Pinoxaden y de la misma forma los síntomas del herbicida fueron más perceptibles a medida que transcurrió el tiempo.

Cuadro 8. Correlación de Pearson entre el porcentaje de control visual y herramientas digitales en dos poblaciones de *A. fatua*.

| Variables | DDA | | | |
|----------------------|---------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| | 3 | 9 | 15 | 21 |
| | % Control | % Control | % Control | % Control |
| Población de trigo | | | | |
| NDVI | -0.03925 0.9036 | -0.94838 <.0001 | -0.43390 0.1587 | -0.96084 <.0001 |
| SPAD | 0.33823 0.2822 | -0.92194 <.0001 | -0.98866 <.0001 | -0.97475 <.0001 |
| Población de alfalfa | | | | |
| NDVI | -0.79026 0.0022 | -0.92996 <.0001 | -0.98337 <.0001 | -0.95097 <.0001 |
| SPAD | 0.24488 0.4430 | -0.79984 0.0018 | -0.93605 <.0001 | -0.93211 <.0001 |

6.4. Conclusiones

De acuerdo con los resultados de esta investigación, se concluye que existió mayor susceptibilidad en población de *A. fatua* recolectada en el cultivo de alfalfa para herbicida pinoxaden. La cual puede ser empleada para monitorear las poblaciones de campo resistente a pinoxaden en el valle de Mexicali.

Se concluye, además que los valores de NDVI y contenido de clorofila (unidades SPAD) se correlacionaron negativamente con el porcentaje de control del herbicida pinoxaden (toxicidad). Además, los métodos tradicionales aún siguen representando alternativas viables y económicas en la evaluación de herbicidas en laboratorio, pero los valores de NDVI y contenido de clorofila obtenidos mediante el uso de sensores digitales son herramientas factibles para estimar los niveles de toxicidad del herbicida pinoxaden en laboratorio.

AGRADECIMIENTOS

Al CONACYT por la beca otorgada para Andrés González Ruiz, estudiante del Programa de Doctorado en Ciencias Agropecuarias de la Universidad Autónoma de Sinaloa. Al Instituto de Ciencias Agrícolas por facilitar sus instalaciones para el establecimiento de los experimentos.

6.5. Bibliografía

- Ali S., Honermeier B. (2016). Post emergence herbicides influence the leaf yield, chlorophyll fluorescence and phenolic compounds of artichoke (*Cynara cardunculus* L.). *Sci Horti*; 203:216-223.
- Alvarenga, C.B.; Mundim, G.S.M.; Santos, E.A.; Gallis, R.B.A.; Zampiroli, R.; Rinaldi, P.C.N.; Prado, J.R. Normalized difference vegetation index for desiccation evaluation with glyphosate + 2,4-D in magnetized spray solution. *Braz. J. Biol.* **2023**, 83, e246579. <https://doi.org/10.1590/1519-6984.246579>
- Burril, L. C.; Cárdenas, J.; y Locatelli, E. (1977). Manual de campo para investigación en control de malezas (No. 632.58 B971E). International Plant Protection Center, Corvallis, OR (EUA).
- Beckie, H. J; Warwick, S. I. y Sauder, C. A. (2012). Basis for herbicide resistance in Canadian populations of wild oat (*Avena fatua*). *Weed Science* 60: 10 - 18.
- Beckie, H. J., Francis, A., & Hall, L. M. (2012). The biology of Canadian weeds. 27. *Avena fatua* L. (updated). *Canadian Journal of Plant Science*, 92, 1329–1357
- Cruz-Hipólito, H; Osuna, M. D; Domínguez-Valenzuela, J. A; Espinoza, N; y De prado, R. (2011). Mechanism of resistance to ACCase-inhibiting herbicides in wild oat (*Avena fatua*) from Latin America. *Journal of agricultural and food chemistry*, 59(13), 7261-7267.
- Ciba-geigy ag. (1992). Manual for field trials in plant protection. Third edition. Revised and enlarged. *Plant Protection*. Printed in Switzerland. p. 240-241.
- Espinoza, N; Diaz, J.; Galdames, R.; De prado, R.; Rodríguez, C.; y Ruiz, E. (2009). Estrategias de manejo de malezas gramíneas resistentes a herbicidas en trigo y otros cultivos extensivos en el sur de Chile. Seminario Internacional “Diagnóstico y Manejo de la Resistencia a Herbicidas”. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria, Serie de Actas de INIA, (44), 92-105.
- Gutiérrez-Soto M V, Cadet-Piedra E, Rodríguez-Montero W, Araya-Alfaro, J. M. 2011. El GreenSeeker TM y el diagnóstico del estado de salud de los cultivos. *Agronomía mesoamericana* 22(2), 397-403.

- Huang, Y., Reddy, K.N., Fletcher, R.S. and Pennington, D. (2018). UAV low-altitude remote sensing for precision weed management. *Weed Technology*, vol. 32, no. 1, pp. 2-6. [http:// dx.doi.org/10.1017/wet.2017.89](http://dx.doi.org/10.1017/wet.2017.89)
- Heap, I. 2020. The International Survey of Herbicide Resistant Weeds. Online. Internet. Enero de 2020. www.weedscience.org.
- Lal, S., Kewat, M. L., y Suryavanshi, T. (2017). Weed indices as influenced by propaquizafop and imazethapyr mixture in soybean. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 6(8), 3109-3115.
- Qasem, J. R. (2007). Chemical control of wild-oat (*Avena sterilis* L.) and other weeds in wheat (*Triticum durum* Desf.) in Jordan. *Crop protection*, 26(8), 1315-1324.
- Scursoni, J. A; Martín, A; Catanzaro, M. P; Quiroga, J; and Goldar, F. (2011). Evaluation of post-emergence herbicides for the control of wild oat (*Avena fatua* L.) in wheat and barley in argentina. *Crop Protection*, 30(1), 18-23.
- Sasanfar, H., Zand, E., Baghestani. M.A., Mirhadi, M.J., Mesgaran, M.B. 2017. Cross-resistance patterns of winter wild oat (*Avena ludoviciana*) accessions to ACCase inhibitor herbicides. *Phytoparasitica*. 45:419-28. <https://doi.org/10.1007/s12600-017-0587-9>.
- Takano HK, Ovejero RFL, Belchior GG, Maymone GPL, Dayan FE. 2021. ACCase-inhibiting herbicides: mechanism of action, resistance evolution and stewardship. *Scientia Agricola*.78:1-11.
- Thomasi RM, Lúcio, AD, Amado TJ, Pott LP, Zanon Junior A. Werle IS. Ulguim AR. 2021. Relationship of vegetation indices with herbicide phytotoxicity in winter cereals. *Advances in Weed Science* 39, 02100050.
- Tafoya-Razo, J.A.; Núñez-Farfán, J. and Torres-García, J.R. (2017). Migration by seed dispersal of ACCase-inhibitor-resistant *Avena fatua* in north-western Mexico. *Pest Manag. Sci.* 73:167-173. doi: 10.1002/ps.4282.
- Travlos, I.; Tsekoura, A.; Antonopoulos, N.; Kanatas, P.; Gazoulis, I. (2021). Novel sensor-based method (quick test) for the in-season rapid evaluation of herbicide efficacy under real field conditions in durum wheat. *Weed Sci.*, 69, 147–160. <https://doi.org/10.1017/wsc.2021.8>

Zand, E; Baghestani, M. A; Aghaalikhani, M; Soufizadeh, S; Khayami, M. M; Pourazar, R; y Forouzesh, S. (2010). Chemical control of weeds in wheat (*Triticum aestivum* L.) in Iran. *Crop Protection*, 29(11), 1223-1231.

CAPÍTULO VII. RESISTENCIA DE POBLACIONES DE *Avena fatua* L. A HERBICIDAS INHIBIDORES DE LA ALS Y ACCASA BAJO CONDICIONES DE LABORATORIO

7.1. Introducción

La avena silvestre (*Avena fatua* L.) es considerada una de las especies de malezas que más afecta a los cultivos de invierno a nivel mundial (Holm *et al.*, 1977; Alshallash, 2018; Tidemann, 2021). Así mismo, es una de las principales malezas de importancia económica en la región del valle de Mexicali para el cultivo de trigo (Herrera *et al.*, 2010). Para los agricultores de la región *A. fatua* se ha convertido en uno de los problemas importantes, debido a la falta de eficacia de los herbicidas utilizados para su control y hasta la fecha, en la zona de estudio, Mexicali Baja California, solo se tienen dos reportes sobre el comportamiento de poblaciones resistentes de *A. fatua* a los herbicidas inhibidores de ACCasa. Uno de estos estudios corresponde a Tovar *et al.* (2008) quienes detectaron dos poblaciones de *A. fatua* que sobrevivieron a dosis de campo del herbicida clodinafop-propargil inhibidor de la ACCasa. Por otra parte, Tafoya *et al.* (2004) evaluaron seis poblaciones resistentes de *A. fatua* en la región Noroeste del País (valle de Mexicali, valle de Hermosillo y valle del Yaqui). En esta investigación se encontró que todos los biotipos correspondientes a dicha región, desarrollaron resistencia. En otros estudios reportados por Cruz-Hipólito *et al.*, (2011) evaluaron dos biotipos de *A. fatua*, uno procedente de México y otro de Chile, ambos biotipos presentaron diferencias en cuanto a resistencia entre familias de herbicidas. El biotipo de *A. fatua* procedente de México fue altamente resistente a los herbicidas ariloxifenoxipropionatos (APP) y ciclohexanodionas (CHD), pero susceptible al pinoxaden, siendo la concentración letal cincuenta similar al del biotipo susceptible. Así mismo, el biotipo procedente de Chile, solo presentó resistencia a fenilpirazolina. Vigna *et al.* (2011) evaluaron distintas poblaciones de *A. fatua* en diferentes localidades a herbicidas inhibidores de la ACCasa (clodinafop-propargil, diclofop-metil, fenoxaprop-p-etil y pinoxaden +cloquintocet -mexil), las poblaciones distantes geográficamente mostraron tolerancia a herbicidas inhibidores de la ACCasa, sin embargo, las poblaciones resistentes y sensibles evaluadas eran de sitios adyacentes. Finalmente, todas mostraron un nivel de resistencia muy alto a Diclofop, pero varió para los otros herbicidas según las poblaciones.

La resistencia se manifestó a herbicidas del grupo de los inhibidores de la enzima ACCasa, sin embargo, se observaron diferencias de actividad entre los ariloxifenoxipropiónicos y el derivado fenilpirazolinona. En otra investigación realizada por Beckie *et al.* (2012) en Canadá se evaluaron 16 poblaciones de *A. fatua* a herbicidas inhibidores de la ACCasa: fenoxaprop, clodinafop, quizalofop (ariloxifenoxipropionato [APP]), sethoxidim, tralkoxydim, clethodim (ciclohexanodiona [CHD]) y pinoxaden (fenilpirazolinona [PPZ]); y los inhibidores de ALS imazamethabenz, imazamox (imidazolinona [IMI]) y flucarbazona (sulfonilaminocarboniltriazolinona [SCT]). En este estudio se encontraron ocho poblaciones resistentes a los herbicidas inhibidores de la ACCasa y dos para ALS. En otro estudio descrito por Hassanpour-bourkheili *et al.* (2021) confirmaron la resistencia de 22 poblaciones de *A. sterilis* al herbicida haloxyfop-R-methyl, en este trabajo solo cinco poblaciones resultaron resistentes a dicho herbicida en los ensayos de dosis-respuesta.

Los ensayos de determinación de la dosis efectiva son la base para confirmar el comportamiento sensible o resistente de una población. Una vez observada la falta de eficacia en campo, el siguiente paso es la cuantificación por medio de los ensayos dosis-respuesta, para el cálculo de la dosis letal (CL_{50}) (Brain y Cousens, 1989; Seber y Wild, 1989; Chism *et al.*, 1992; Streibig *et al.*, 1993). Por otro lado, también existe la concentración diagnóstico para confirmar la resistencia cuando se tienen que analizar varias poblaciones con una sola dosis (Landeros *et al.*, 2010; Khalip *et al.*, 2011). Para la región del valle de Mexicali los estudios de resistencia que se han reportado solo mencionan el mecanismo de acción ACCasa donde solo participa una familia química de herbicida, la cual es caracterizada por los ariloxifenoxipropionatos (APP). Por otra parte, no hay reportes de resistencia a otros mecanismos como es el caso de ALS. Por tal situación se planteó el objetivo de confirmar la resistencia de tres poblaciones de *A. fatua* a herbicidas inhibidores de la ALS y ACCasa bajo condiciones de laboratorio.

7.2. Materiales y métodos

7.2.1. Sitios de colecta del material vegetal

Se realizaron muestreos para recolectar semillas de *A. fatua* en tres localidades del valle de Mexicali, Baja California, en predios con sospechas de escapes de control a herbicidas inhibidores de la ALS y ACCasa, durante el ciclo otoño- invierno 2021 (Cuadro 1). Además,

se incluyó una población susceptible (Ej. Saltillo), la cual se recolectó en lotes de alfalfa donde no se realizaron aplicaciones de herbicidas para el control de *A. fatua*. Para cada población (cuatro poblaciones) se tomó una muestra de un kilo aproximadamente de semillas de plantas que sobrevivieron a la aplicación de herbicidas inhibidores de la ALS y ACCasa para realizar los estudios de resistencia.

Cuadro 1. Ubicación de las localidades muestreadas en valle de Mexicali, B.C.

| Localidad | Zona | Latitud | Longitud |
|----------------|--------|-----------|-------------|
| Ej. República | Norte | 32.643940 | -114.813999 |
| Ej. Nayarit | Centro | 32.313893 | -115.278904 |
| *Ej. Saltillo | Centro | 32.419023 | -115.114712 |
| Ej. Sombrerete | Sur | 32.157820 | -115.063386 |

*Población susceptible

7.2.2. Condiciones de establecimiento de bioensayos de susceptibilidad y resistencia de *A. fatua* en laboratorio

Para ambos estudios las semillas de *A. fatua* susceptibles y resistentes, se germinaron en cajas Petri de 15 cm de diámetro sobre papel secante. Las placas se sellaron con parafilm y se introdujeron en una cámara fría a 4 °C por 48 horas, transcurrido este tiempo, se incubaron a temperatura ambiente (± 23 °C) en oscuridad y posteriormente se colocaron en cámara de crecimiento a una temperatura (± 21.1 °C) con un fotoperíodo de 16 h y 8 h oscuridad. Una vez germinadas con un centímetro de coleóptilo, se trasplantaron en macetas de 14 cm de diámetro x 10.57 cm de profundidad, utilizando una mezcla de tierra limo y materia orgánica mezclados en proporción 5:3 (v/v) colocándose siete plantas en cada maceta.

7.2.3. Bioensayos de dosis-respuesta para la población de *A. fatua* susceptible (Línea base)

Los bioensayos de susceptibilidad con plántulas de *A. fatua*, se utilizaron herbicidas con los dos mecanismos de acción (ACCasa y ALS), en diferentes concentraciones, las cuales se definieron a partir del 50 % de la recomendación de campo de cada herbicida para el control de esta especie (Cuadro 2). Los herbicidas se aplicaron cuando las plantas alcanzaron el estado de desarrollo de 3-4 hojas (Cruz-Hipólito *et al.*, 2011). Las plantas se trataron con cada concentración con un volumen de solución de 400 L ha⁻¹, una presión de 40 PSI y una altura desde la base del tallo de 50 cm. Los tratamientos se realizaron simulando condiciones de campo, utilizando un compresor marca Dewalt y un aplicador manual de gravedad marca Truper equipada con boquilla de 2 mm y capacidad de 400 ml con un rango de presión de 30 a 50 PSI y un consumo de aire de 169.9 L min⁻¹. Se utilizó un diseño experimental completamente al azar con tres repeticiones por cada concentración para cada uno de los herbicidas y el testigo (aplicación de solo agua con adherente). Una repetición consistió en una maceta conteniendo siete plantas de *A. fatua* (21 plantas por concentración y el testigo).

Para evaluar el efecto de los herbicidas sobre el crecimiento y desarrollo de poblaciones de *A. fatua*, las plantas tratadas se dejaron una hora aproximadamente fuera de la cámara de crecimiento y se volvieron a introducir de nuevo en las condiciones anteriormente descritas

una vez disipado el herbicida. A los 21 días, se evaluó el peso fresco de las plantas tratadas del experimento.

Se calculó la concentración letal (CL_{50, 90}) representando el porcentaje de peso fresco con respecto al control no tratado a la concentración de herbicida. Los datos se ajustaron a un modelo de regresión lineal mediante un análisis Probit. Los análisis, se realizaron con el programa estadístico SAS 9.0 (1990).

Cuadro 2. Concentraciones de herbicidas inhibidores de la ALS y ACCasa sobre la población susceptible de *A. fatua*.

| Herbicidas (I.A) | Dosis ha ⁻¹ | Familia | Concentraciones (ppm) |
|---|------------------------|------------------------------------|-----------------------|
| Mesosulfuron-metil, Iodosulfuron-metil-sodio, Mefenpir-dietil | 1.5 L | Sulfunilureas | 1 |
| | | | 2 |
| | | | 3 |
| | | | 4 |
| Flucarbazone sodio | 30 g | Sulfonilaminocarboniltriazolinonas | 0.5 |
| | | | 0.75 |
| | | | 1 |
| | | | 2 |
| | | | 4 |
| | | | 6 |
| | | | 0.125 |
| Pyroxsulan | 0.5 L | Trizolopirimidina, | 0.25 |
| | | | 0.5 |
| | | | 0.75 |
| | | | 1 |
| | | | 2 |
| | | | 4 |
| | | | 6 |
| Fenoxaprop-p-etil | 1 L | Ariloxifenoxipropanoatos | 0.5 |
| | | | 0.75 |
| | | | 1 |
| | | | 2 |
| | | | 4 |
| | | | 6 |
| | | | 5 |
| Pinoxaden | 1.2 L | Fenilpirazolinás | 10 |
| | | | 15 |
| | | | 20 |
| | | | 30 |

7.2.4. Bioensayos de dosis diagnóstico para confirmar resistencia en poblaciones de *A. fatua*

Las semillas de *A. fatua* que sobrevivieron a la dosis letal de campo en los ensayos de efectividad biológica del capítulo 3, se utilizaron para realizar bioensayos con plántulas en laboratorio (Cuadro 1).

Se utilizaron las mismas condiciones de establecimiento que los bioensayos de susceptibilidad en el apartado 7.2.2. Se utilizó la técnica de concentración diagnóstico, la cual consistió en obtener la concentración letal noventa a partir de una población susceptible (McCutchen *et al.*, 1989; Landeros *et al.*, 2010; Khalip *et al.*, 2011). La concentración letal noventa se multiplicó por dos para obtener la concentración en ppm de aplicación de cada herbicida (Cuadro 3). Los herbicidas se aplicaron cuando las plantas alcanzaron el estado de desarrollo de 3-4 hojas (Cruz-Hipólito *et al.*, 2011). Las plantas se trataron con cada concentración con un volumen de solución de 400 L ha⁻¹, una presión de 40 PSI y una altura desde la base del tallo de 50 cm. Los tratamientos se realizaron simulando condiciones de campo, utilizando un compresor marca Dewalt y un aplicador manual de gravedad marca Truper equipada con boquilla de 2 mm y capacidad de 400 ml con un rango de presión de 30 a 50 PSI y un consumo de aire de 169.9 L min⁻¹. Se utilizó un diseño experimental completamente al azar con 20 repeticiones de la concentración diagnóstico y 10 repeticiones del testigo (agua más adherente). A los 21 días, se evaluó el peso fresco de las plantas tratadas. Para clasificar si la población de *A. fatua* fue resistente (R) o susceptible (S) se consideró como criterio el 80 % de Índice de Control de Maleza (ICM) como susceptible y por el caso contrario menos de dicho valor se clasificó como resistente, de acuerdo a lo establecido con otros organismos biológicos (Dennehy *et al.*, 1987).

7.3. Resultados y discusión

7.3.1. Bioensayos de susceptibilidad (Línea base)

En el cuadro 3, se puede apreciar la dosis letal que disminuye el 50 % del peso fresco de la población susceptible colectada en campos de alfalfa. De acuerdo al análisis Probit se obtuvo que los herbicidas inhibidores de la ALS (Sulfonilureas) presentaron resultados similares en la CL 50. Mientras que para los herbicidas inhibidores de la ACCasa

Fenoxaprop-p-etil y Pinoxaden registraron valores de 58 y 5 ppm. Estos datos indicaron sensibilidad que presentó dicha población de *A. fatua* colectada en parcelas de alfalfa.

Cuadro 3. Concentración letal 50 y 90 de los herbicidas inhibidores de la ALS y ACCasa en *A. fatua* susceptible.

| Herbicida | CL 50 | Limites fiduciales | | CL 90 | Limites fiduciales | | Ecuación |
|---|-------|--------------------|-----------------|-------|--------------------|-----------------|---------------------------|
| | | Inferior ppm | Superior ppm | | Inferior ppm | Superior ppm | |
| Mesosulfuron- metil, Iodosulfuron- metil-sodio, Mefenpir-dietil | 1.0 | 0.83501 | 1.21327 | 2.9 | 2.51881 | 3.54563 | $y = -0.0488 + 2.8699(x)$ |
| Flucarbazone sodio | 1.0 | 0.59493 | 1.24915 | 37 | 15.98094 | 191.46349 | $y = 0.0285 + 0.7994(x)$ |
| Pyroxsulán | 1.0 | 0.67608 | 1.40185 | 13.4 | 6.75220 | 44.62687 | $y = 0.0152 + 1.1237(x)$ |
| Fenoxaprop-p-etil | 58 | 41.79642 | 99.90273 | 198.2 | 110.00447 | 1106 | $y = -4.2178 + 2.3941(x)$ |
| Pinoxaden | 5 | 0.92798 | 7.72605 | 17.1 | 11.42283 | 54.36948 | $y = -1.6310 + 2.3610(x)$ |

7.3.2. Dosis diagnóstica para confirmar resistencia de *A. fatua*

En los cuadros 4 y 5, se puede apreciar que la población de *A. fatua* recolectada en zona Norte y Centro presentaron muy bajos índices de control de maleza por lo que se consideraron resistentes a todos los herbicidas inhibidores de la ALS y ACCasa. Esto coincide con las antecedentes históricos de estos dos campos agrícolas ubicados en el Ejido República y Nayarit, pues en ambos casos por más de cinco años se tiene el reporte de aplicaciones secuenciales de los dos mecanismos de acción antes mencionados, esta situación a largo plazo genera presión de selección a dicha maleza expuesta a estos mecanismos, por tal motivo las pruebas de dosis diagnóstico fueron positivas en confirmar la resistencia (Dennehy *et al.*, 1987).

Cuadro 4. Respuesta de *A. fatua* a concentraciones diagnóstico de herbicidas inhibidores de la ALS y ACCasa en la población Ej. Republica del valle de Mexicali.

| Herbicida | Concentración diagnóstico (*ppm) | *ICM (%) | Clasificación |
|--------------------------|----------------------------------|----------|---------------|
| Iodosulfuron-metil-sodio | 6 | 13.69 | *R |
| Fenoxaprop-p-etil | 396.35 | 45.55 | R |
| Pinoxaden | 34.24 | 5.0 | R |
| Pyroxsulan | 27 | 10.64 | R |
| Flucarbazone sodio | 74 | 23.48 | R |

*ICM = Índice de control de maleza, ppm = partes por millón, R = resistente, S = susceptible.

Cuadro 5. Respuesta de *A. fatua* a concentraciones diagnóstico de herbicidas inhibidores de la ALS y ACCasa en la población Ej. Nayarit del valle de Mexicali.

| Herbicida | Concentración diagnóstico (*ppm) | *ICM (%) | Clasificación |
|--------------------------|----------------------------------|----------|---------------|
| Iodosulfuron-metil-sodio | 6 | 13.71 | *R |
| Fenoxaprop-p-etil | 396.35 | 71.96 | R |
| Pinoxaden | 34.24 | 50.48 | R |
| Pyroxsulan | 27 | 58 | R |
| Flucarbazone sodio | 74 | 54.65 | R |

*ICM= Índice de control de maleza, ppm=partes por millón, R=Resistente, S=susceptible.

En el cuadro 6, se puede apreciar que el herbicida Fenoxaprop-p-etil sobre *A. fatua* recolectada en el Ejido Sombrerete presentó susceptibilidad a dicha molécula. Por el caso contrario esta maleza fue resistente al resto de los herbicidas evaluados en dicha zona.

Cuadro 6. Respuesta de *A. fatua* a concentraciones diagnóstico de herbicidas inhibidores de la ALS y ACCasa en la población Ej. Sombrerete del valle de Mexicali.

| Herbicida | Concentración diagnóstico (*ppm) | *ICM (%) | Clasificación |
|--------------------------|----------------------------------|----------|---------------|
| Iodosulfuron-metil-sodio | 6 | 3.80 | *R |
| Fenoxaprop-p-etil | 396.35 | 91.80 | *S |
| Pinoxaden | 34.24 | 6.35 | R |
| Pyroxsulán | 27 | 58.63 | R |
| Flucarbazone sodio | 74 | 55.73 | R |

*ICM = Índice de control de maleza, ppm = partes por millón, R = resistente, S = susceptible.

7.4. Conclusión

Bajo las condiciones en las que se realizó esta investigación se concluyó que, en la mayoría de las zonas de estudio, las poblaciones de *A. fatua* son resistentes a los herbicidas inhibidores de la ALS y al herbicida Pinoxaden. Por el caso contrario, la población de *A. fatua* procedente del Ejido Sombrerete fue susceptible al herbicida Fenoxaprop-p-etil.

7.5. Literatura citada

- Alshallash, K.S. (2018). Germination of weed species (*Avena fatua*, *Bromus catharticus*, *Chenopodium album* and *Phalaris minor*) with implicatios for their dispersal and control. *Annals of Agricultural Sciences*, 63 (1), 91-97.
- Brain, P. and Cousens, R. (1989). An equation to describe dose responses where there is stimulation of the growth at low doses. *Weed Res.* 29: 93-96.
- Beckie, H. J.; Warwick, S. I. and Sauder, C. A. (2012). Basis for herbicide resistance in Canadian populations of wild oat (*Avena fatua*). *Weed Science*, 60(1), 10-18.
- Chism, W.; Birch, J. and Bingham, S. (1992). Non-linear regressions for analyzing growth stage and quinclorac interactions. *Weed Technol.* (6): 898-903.
- Cruz-Hipólito, H., Osuna, M. D., Domínguez-Valenzuela, J. A., Espinoza, N. and De Prado, R. (2011). Mechanism of resistance to ACCase-inhibiting herbicides in wild oat (*Avena fatua*) from Latin America. *Journal of agricultural and food chemistry*, 59(13): 7261-7267.
- Dennehy, T. J.; Grafton-Cardwell, E. E.; Granett, J.; Barbour, K. (1987). Practitioner assessable bioassay for detection of dicofol resistance in spider mites (Acari: Tetranychidae). *Journal of Economic Entomology* 80: 998-1103.
- Hassanpour-bourkheili, S.; Gherekhloo, J.; Kamkar, B. and Ramezanpour, S. S. (2021). Mechanism and pattern of resistance to some ACCase inhibitors in winter wild oat (*Avena sterilis* subsp. *ludoviciana* (Durieu) Gillet & Magne) biotypes collected within canola fields. *Crop Protection*, (143): 105541.
- Herrera Andrade, J.L.; Guzmán Ruiz, S.C. y Loza Venegas, E. (2010). Guía técnica para el area de influencia del campo experimental Valle de Mexicali, B.C. y San Luis Río Colorado, Son. INIFAP-CIRNO. Mexicali, B.C.
- Holm LG.; Plucknett DL.; Pancho JV. and Herberger JP. (1977). *The World's Worst Weeds. Distribution and Biology.* Honolulu, Hawaii, USA: University Press of Hawaii.
- Khaliq, A.; Matloob, A.; Tanveer, A.; Areeb, A.; Aslam, F. and Abbas, N. (2011). Reduced doses of a sulfonylurea herbicide for weed management in wheat fields of Punjab, Pakistan. *Chilean journal of agricultural research*, 71(3): 424.

- Landeros, J.; Ail, C. E.; Cerna, E.; Ochoa, Y.; Guevara, L. y Aguirre, L. A. (2010). Susceptibilidad y mecanismos de resistencia de *Tetranychus urticae* (Acariformes: Tetranychidae) en rosal de invernaderos. *Revista Colombiana de Entomología*, 36(1): 5-9.
- Mccutchen, B. F.; Plapp, F. W., Nemic, S. J.; Campanhola, C. (1989). Developmente of diagnostic monitoring techniques for larval pyrethroid resistance in *Heliothis* spp. (Lepidoptera: Noctuidae) in cotton. *Journal of Economic Entomology* 82: 1502-1507.
- Seber, G. and Wild, C. (1989). *Non-Linear Regression*. John Willey y Sons, Inc, New York, 768 pp.
- Streibig, J. and Kudsk, P. (1993). *Herbicide Bioassays*. CRC Press. Boca Ratón, FL. pp. 270.
- Tidemann, B.D.; Charles, M.; Geddes, C M.; Hugh, J. and Beckie, HJ. 2021. *Avena fatua* and *Avena sterilis*. En: *Biology and Management of Problematic Crop Weed Species* (Ed: Bhagirath SC), pp. 43-66. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822917-0.00015-X>.
- Tovar Hernández, H., Cruz Villegas, M., Ponce Medina, F., Muñoz Salazar, R., Avendaño Reyes, L., Grimaldo Juárez, O. y Medina Basulto, G. (2008). Detección de mutaciones relacionadas con resistencia a herbicida en avena silvestre (*Avena fatua* L.). *Agricultura técnica en México*, 34(2): 251-256.
- Tafoya, R. A. (2004). Resistencia a herbicidas de dos poblaciones de *Avena fatua* L. del Valle de Mexicali. XXV Congreso Nacional de la Ciencia de la Maleza. Universidad Autónoma de Guadalajara, México.
- Vigna, M. R., Gigón, R. y López, R. L. (2011). Presencia de poblaciones de *Avena fatua* L. resistente a herbicidas en argentina. In *XX Congreso de la Asociacion Latinoamericana de Malezas (ALAM Viña del Mar–Chile, 4-9 diciembre de 2011. Actas del Congreso en CD*.

CAPÍTULO VIII. CONCLUSIONES

Bajo las condiciones en las que se realizó esta investigación se llegó a las siguientes conclusiones:

Los herbicidas fenoxaprop-p-etil y pinoxaden fueron los más sobresalientes en cuanto a su efectividad biológica a nivel de campo, exhibieron mayor disminución de la densidad poblacional de *A. fatua*, provocaron menor altura de planta y mayor rendimiento del cultivo de trigo en las zonas Norte (Ejido República Mexicana) y Centro (Ejido Nayarit). Por lo tanto, estos herbicidas del grupo 1 (Herbicidas inhibidores de ACCasa) se pueden seguir recomendando para el control de *A. fatua* en el valle de Mexicali, Baja California. En contraste los herbicidas del grupo (Herbicidas inhibidores de la ALS) se debe restringir su uso en las tres zonas de estudio debido a su baja efectividad que presentaron en este estudio.

En esta investigación el contenido de clorofila y los valores de NDVI se correlacionaron negativamente con los porcentajes de control exhibidos por los herbicidas en *A. fatua*, con los cuales se puede determinar los efectos producidos por dichos productos en las tres zonas de estudio. Por lo cual el uso de SPAD 502 Plus y GreenSeeker representan nuevas alternativas para la agricultura de precisión en la evaluación de herbicidas inhibidores de la ALS y ACCasa sobre *A. fatua* en el cultivo de trigo en campo.

La población de *A. fatua* recolectada en el cultivo de alfalfa fue muy susceptible al herbicida pinoxaden, la que se puede considerar como una población susceptible y puede ser empleada para monitorear las poblaciones de campo resistente a herbicidas inhibidores de ALS y ACCasa en el valle de Mexicali.

Los métodos tradicionales aún son alternativas viables y económicas en la evaluación de herbicidas en laboratorio, sin embargo, las herramientas digitales GreenSeeker, medidor SPAD, índices fotográficos (GA y GGA), sirvieron para estimar la sensibilidad de *Avena fatua* para el herbicida pinoxaden bajo condiciones de laboratorio. Además, representan herramientas prometedoras para evaluar la susceptibilidad de herbicidas en experimentos de

laboratorio, proporcionando información complementaria o sustituyendo la evaluación visual de la toxicidad de los herbicidas.

Las poblaciones de *A. fatua* recolectadas en los Ejidos República Mexicana (Zona Norte) y Ejido Nayarit (Zona Centro) fueron resistentes a los herbicidas inhibidores de la ALS y ACCasa. Mientras que la población de avena silvestre del Ejido Sombrerete (Sur) fue resistente a los herbicidas inhibidores de la ALS y al herbicida Pinoxaden, pero susceptible al herbicida Fenoxaprop-p-etil. Estos resultados destacan la importancia de estudiar la resistencia en las poblaciones de *A. fatua* en esta región de producción de trigo de México, por lo que se recomienda continuar con estudios de resistencia, incluyendo un mayor número de poblaciones para identificar el grado de la problemática de la resistencia a herbicidas en el valle de Mexicali, y de la misma manera estudiar los mecanismos involucrados en resistencia.

CAPÍTULO IX. LITERATURA CITADA

- Alshallash, K.S. (2018). Germination of weed species (*Avena fatua*, *Bromus catharticus*, *Chenopodium album* and *Phalaris minor*) with implicatios for their dispersal and control. *Annals of Agricultural Sciences*, 63 (1), 91-97.
- Arias, D. M., Mora, R. E. G. y Romero, O. S. D. (2019). Uso de herbicidas en el control de malezas. Importancia de su conocimiento para el profesional agrónomo. *Opuntia Brava*, 11(1), 204-210.
- Alvaro, A. (2007). Herbicidas: Modos y mecanismos de acción en plantas. *Universidad Centro Occidental" Lisandro Alvarado"(UCLA)*. Recuperado de https://www.researchgate.net/.../259175751_Herbicidas_Modos_y_mecanismos_de_a.
- Ashton, A. R.; Jenkins, C. L. and Whitfeld, P. R. (1994). Molecular cloning of two different cDNAs for maize acetyl CoA carboxylase. *Plant molecular biology*, 24(1): 35-49.
- Abramoff, C. (2018). Capítulo 2 Aplicación de productos fitosanitarios. Protección vegetal. Coords. Padin, BS. y Pasaalacqua, AS. 1^{era} edición. Editorial de la Universidad de la Plata. Buenos Aires, Argentina. 23-40 pp.
- Aibar Lete, J. (1987). El control de la avena loca en Aragón.
- Baghestani, M. A., Zand, E., Soufizadeh, S., Beheshtian, M., Haghghi, A., Barjasteh, A., and Deihimfard, R. (2008). Study on the efficacy of weed control in wheat (*Triticum aestivum* L.) with tank mixtures of grass herbicides with broadleaved herbicides. *Crop Protection*, 27(1), 104-111.
- Brezeanu, A. G.; Davis, D. G. and Shimabukuro, R. H. (1976). "Ultrastructural effects and translocation of methyl 2-[(2,4-dicloro-phenoxy) phenoxy] propionate in wheat (*Triticum aestivum*) and wild oat (*Avena fatua*).” *Can. J. Bot.*, (54): 2038-2048.
- Beyer, E. M.; Duffy, M. J.; Hay, J. V. and Schlueter, D. D. (1988). Sulfonylureas. En: *Herbicides-Chemistry, Degradation, and Mode of Action* (eds. PC Kearney y DD Kaufman), pp. 117-189, Marcel Deker, New York.
- Bajwa, A. A., Khalid, S., Sadia, S., Nabeel, M., & Nafees, W. (2013). Influence of combinations of allelopathic water extracts of different plants on wheat and wild oat. *Pakistan Journal of Weed Science Research*, 19(2):157-166.

- Beckie, H. J., Thomas, A. G., and Stevenson, F. C. (2002). Survey of herbicide-resistant wild oat (*Avena fatua*) in two townships in Saskatchewan. *Canadian Journal of Plant Science*, 82(2), 463-471.
- Beckie, H. J., Warwick, S. I. and Sauder, C. A. (2012). Basis for herbicide resistance in Canadian populations of wild oat (*Avena fatua*). *Weed Science*, 60(1), 10-18.
- Brain, P. and Cousens, R. (1989). An equation to describe dose responses where there is stimulation of the growth at low doses. *Weed Res.* 29: 93-96.
- Burril L. C., Cardenas L. y Locatelli E. (1977). Manual de Campo para la Investigación en Control de Malezas. Internacional Plant Proteccion Center, Oregon State University, Corvallis, Oregon, USA.
- Bolaños-Jiménez, J.; Uscanga-Mortera, E.; Tafoya-Razo, J. A.; Kohashi-Shibata, J. y Torres-García, J. R. (2018). Efectividad biológica de herbicidas inhibidores de la acetil coenzima a carboxilasa y acetolactato sintasa y la presencia de resistencia en *Echinochloa crus-galli* (L.) Beauv. *Agrociencia*, 52(5): 713-723.
- Carril, E. P. U. (2011). Fotosíntesis: aspectos básicos. *Reduca (Biología)*, 2(3).
- Cobb, A. H. and Reade, J. P. (2010). *Herbicides and plant physiology*. John Wiley and Sons.
- Chism, W.; Birch, J. and Bingham, S. (1992). Non-linear regressions for analyzing growth stage and quinclorac interactions. *Weed Technol.* (6): 898-903.
- Cricco, J. (2010). Tamaño de gota, una variable que marca la diferencia. Recuperado de: <http://www.engormix.com/MA-agricultura/maiz/articulos/aplicacion-de-fitosanitariost3148/417-p0>.
- Cruz-Hipólito, H. (2010). Gramíneas resistentes a herbicidas en Latinoamérica: aspectos agronómicos, bioquímicos y moleculares (Doctoral dissertation, Universidad de Córdoba).
- Cruz, V. M., Díaz, G. M., Castro, R. C. y Reyes, L. A. (2004). Período crítico de competencia de malezas en trigo (*Triticum aestivum* L.). *Agricultura Técnica en México*, 30(2): 223-234.
- Cruz-Hipólito, H., Osuna, M. D., Domínguez-Valenzuela, J. A., Espinoza, N. and De Prado, R. (2011). Mechanism of resistance to ACCase-inhibiting herbicides in wild oat (*Avena fatua*) from Latin America. *Journal of agricultural and food chemistry*, 59(13): 7261-7267.

- Crop Protection Handbook (2004). Meister Publishing Co., Willoughby, Ohio. Vol. 90, 897 pp.
- Dhima, K., Vasilakoglou, I., Gatsis, T. and Eleftherohorinos, I. (2010). Competitive interactions of fifty barley cultivars with *Avena sterilis* and *Asperugo procumbens*. *Field crops research*, 117(1): 90-100.
- De Almeida Silva, M.; Dos Santos, C. M.; Dos Santos Vitorino, H. y De Lima Rhein, A. F. (2014). Pigmentos fotosintéticos e índice SPAD como descritores de intensidad de estrés por deficiencia hídrica em caña de azúcar. *Bioscience Journal*, 30(1).
- Da Cunha, A. R.; Katz, I.; De Pádua Sousa, A. y Uribe, R. A. M. (2015). Índice SPAD en el crecimiento y desarrollo de plantas de *lisianthus* en función de diferentes dosis de nitrógeno en ambiente protegido. *Idesia (Chile)*, 33(2), 97-105.
- Devine, M. D. and Eberlein, C. V. (1997). Physiological, biochemical and molecular aspects of herbicide resistance based on altered target sites. En: *Herbicide Activity: Toxicology, Biochemistry and Molecular Biology* (eds. RM Roe, JD Burton y RJ Kuhr), pp. 159-185, IOS Press, Amsterdam, the Netherlands.
- Devine, M. D. and Shimabukuro, R. H. (1994). Resistance to acetyl coenzyme A carboxylase inhibiting herbicides. In *Herbicide Resistance in Plants: Biology and Biochemistry* (Powles SB and Holtum JAM, Eds.). Lewis Publishers, Boca Raton, FL, pp. 141-169.
- Duke, S. O. and Kenyon, W. H. (1988). Polycyclic alkanolic acids “In herbicides-chemistry, Degradation and Mode of Action. Vol.3, PC Kearney and DD Kaufman, eds. New York: Marcel Dekker pp 71-116.
- Devine, M. D. and Eberlein, C. V. (1997). Physiological, biochemical and molecular aspects of herbicide resistance based on altered target sites. En: *Herbicide Activity: Toxicology, Biochemistry and Molecular Biology* (eds. RM Roe, JD Burton y RJ Kuhr), pp. 159-185, IOS Press, Amsterdam, the Netherlands.
- Délye, C. (2005). Weed resistance to acetyl coenzyme A carboxylase inhibitors: an update. *Weed Science*, 53(5):728-746.
- Devine, M. D. and Shukla, A. (2000). Altered target sites as a mechanism of herbicide resistance. *Crop Protection* (19): 881-889.
- Farooq M, Bajwa AA, Cheema SA and Cheema ZA. 2013. Application of allelopathy in crop production. *International Journal of Agriculture and Biology* 15: 1367–1378.

- Figuroa Bustos, V. (2013). Evaluación del índice de suficiencia de nitrógeno como mejorador de la capacidad predictiva de las lecturas SPAD en híbridos de maíz.
- González-Torres, A.; Figuroa-Viramontes, U.; Delgado, J. A.; Núñez-Hernández, G.; Cueto-Wong, J. A.; Preciado-Rangel, P. y Palomo-Gil, A. (2009). Calibración del SPAD-502 para evaluar requerimientos de nitrógeno en maíz forrajero. *Terra Latinoamericana*, 27(4): 303-309.
- 24.https://www.aapresid.org.ar/rem/wpcontent/uploads/sites/3/2013/02/REMSD12_003.pdf
- Gutiérrez-Soto, M. V.; Cadet-Piedra, E.; Rodríguez-Montero, W. y Araya-Alfaro, J. M. (2011). El GreenSeeker TM y el diagnóstico del estado de salud de los cultivos. *Agronomía mesoamericana*, 22(2), 397-403.
- Gerwick, B. C.; Jackson, L. A.; Handly, J.; Gray, N. R. and Russell, J. W. (1988). Preemergence and postemergence activities of the (R) and (S) enantiomers of haloxyfop. *Weed Sci.* 36: 453-456.
- Giménez, A. y Ríos, A. (1992). Ecofisiología de malezas. *Investigaciones Agronómicas*, 1(2): 157-166.
- García T. L. (1996). *Manejo de malezas para países en desarrollo* (Vol. 120). Food & Agriculture Org. Cap. 4 Gramineas y Cyperaceas. p 43-45.
- Hassanpour-bourkheili, S.; Gherekhloo, J.; Kamkar, B. and Ramezanpour, S. S. (2021). Mechanism and pattern of resistance to some ACCase inhibitors in winter wild oat (*Avena sterilis* subsp. *ludoviciana* (Durieu) Gillet & Magne) biotypes collected within canola fields. *Crop Protection*, (143): 105541.
- Herrera Andrade, J.L.; Guzmán Ruiz, S.C. y Loza Venegas, E. (2010). Guía técnica para el área de influencia del campo experimental Valle de Mexicali, B.C. y San Luis Río Colorado, Son. INIFAP-CIRNO. Mexicali, B.C.
- Hoppe, H. H. (1989). Fatty acids biosynthesis – A targeted site of herbicide action In: Target Site of Herbicide Action (ed. By Böger P. and Sandmann G.) CRC press Boca raton, 65-83.
- Hawkes, T. R. (1989). Studies of herbicides which inhibit branched chain amino acid biosynthesis. *Brighon Crop Protection Conference Monography* (42): 131-38.
- HRAC (2002). Clasificación of herbicides according their mode of action. <http://plantprotection.org/HRAC>.

- Heap, I. (2010). The International Survey of Herbicide Resistant Weeds. Online. Internet. January 31, 2010. Available in www.weedscience.org.
- Hofer, U.; Muehlebach, M.; Hole, S. and Zoschke, A. (2006). Pinoxaden- For broad spectrum grass weed Management in cereal crops. *J. Plant Dis. Prot.* 20: 989-995.
- Ibdah, M.; Bar-ilan, A.; Livnhan, O.; Schloss, J. V.; Barak, Z. and Chipman, D. M. (1996). Homology modeling of the structure of bacterial acetohydroxy acid synthase and examination of the active site by site-directed mutagenesis. *Biochem.* 35: 16282-16291.
- Ishimwe, R.; Abutaleb, K. and Ahmed, F. (2014). Applications of thermal imaging in agriculture—A review. *Advances in remote Sensing*, 3(03): 128.
- Jalil Maluf, E.; Ianone, N. y Etchegoyen, J. (2015). Gota protegida. Aplicaciones eficientes. Aplicaciones agrícolas de calidad y uso de coadyuvantes de última generación. Recuperado de: <http://www.gotaprotegida.com.ar/wp-content/uploads/2015/04/gotaprotegida.pdf>
- Kumar, V., Mahajan, G., and Chauhan, B. S. (2017). Rice weeds and their management. *Rice Production Worldwide*. Springer International Publishing AG, p. 361-392. https://doi.org/10.1007/978-3-319-47516-5_14
- Kobek, K., Focke, M. and Botanisches, K. L. (1988). Fatty-acid biosynthesis and acetyl-CoA carboxylase as a target of diclofop, fenoxaprop and other aryloxy-phenoxy-propionic acid herbicides. *Zeitschrift für Naturforschung C*, 43(1-2): 47-54.
- Lasa, B.; Arnal, A. L.; Goikoa, J. I.; Maeztu, I; Maisterra, A. S.; Quemada, M. y Fernández, E. B. (2005). Optimización de la fertilización nitrogenada mediante el uso de medidores de clorofilas. *Navarra agraria*, (150): 31-35.
- Levitt, G. (1978). Herbicidal sulfonamides. US patent 4127405.
- Lang, A. (2013). *Differenzierung und Entwicklung/Differentiation and Development* (Vol. 15). Springer Science & Business Media.
- Mahajan, G.; Kumar, V. and Chauhan, B. S. (2022). Biology and management of wild oat in Australia. *Indian Journal of Weed Science* 54 (4) p. 376-388. <http://dx.doi.org/10.5958/0974-8164.2022.00069.7>
- Mahajan G.; Kumar, V. and Chauhan BS. (2016). Research needs for improving weed management. Pp. 337–355. In: *Weed Science and Management* (Eds. Yadueaju NT,

- Sharma AR and Das TK). Indian Society of Weed Science, Jabalpur and Indian Society of Agronomy, New Delhi.
- Orozco-Segovia, A. (1989). Fisiología y ecología del fitocromo: su función en las semillas. *Botanical Sciences*, (49): 71-84.
- Papapanagiotou, A. P., Paresidou, M. I., Kaloumenos, N. S. and Eleftherohorinos, I. G. (2015). ACCase mutations in *Avena sterilis* populations and their impact on plant fitness. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, (123): 40-48.
- Palacio, M. K. y Urriola, J. C. (2013). Transferencia de tecnología de aplicaciones de herbicidas a campesinos mediante parcelas demostrativas en frijol, como responsabilidad social universitaria.
- Qazizada, G. S., Todar Mal, S. K., & Kumar, P. (2022). Effect of pre and post-emergence herbicides on weed infestation, crop growth and economics of wheat. *The Pharma Innovation Journal*, 11(3), 152-157.
- Qasem, J. R. (2007). Chemical control of wild-oat (*Avena sterilis* L.) and other weeds in wheat (*Triticum durum* Desf.) in Jordan. *Crop protection*, 26(8): 1315-1324.
- Raffel, H.; Nielsen, P. and Rüegg, W. (2006). AXIAL™ Einfluss des Anwendungszeitpunktes auf die Wirkungssicherheit gegen Schadgräser in Getreide. *J. plant Dis. Prot.* (20): 989-995.
- Rojas, G. M. (1980). Capítulo I. Información básica general sobre las malezas y su control. Manual Teórico-Práctico de Herbicidas y Fitorreguladores.
- Sorbet Pezonaga, S. (2013). Utilidad del medidor de clorofilas (SPAD-502®) en los programas de fertilización nitrogenada de trigo (*Triticum aestivum* L.) en regadío.
- Scursoni, J. A.; Martín, A., Catanzaro, M. P.; Quiroga, J. and Goldar, F. (2011). Evaluation of post-emergence herbicides for the control of wild oat (*Avena fatua* L.) in wheat and barley in argentina. *Crop Protection*, 30(1): 18-23.
- Shaner, D. L.; Anderson, P. C. and Stidham, M. A. (1984). Imidazolinones: potent inhibitors of acetylhydroxyacid synthase. *Plant Physiol.* (76): 545-546.
- SIAP, (2023). Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Página electrónica: <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>
- Shimabukuro, R. H. (1990). Selectivity and mode of action of the postemergence herbicide diclofop-methyl. *Plant Growth Reg. Soc. Am. Q.* (18): 37-53.

- Shimabukuro, R. H.; Walsh, W. C. and Hoerauf, R. A. (1979). Metabolism and selectivity of diclofop-methyl in wild oat and wheat. *J Agric Food Chem.* (27):615–623.
- Sebery, G. and Wild, C. (1989). Non-Linear Regression. John Willey y Sons, Inc, New York, 768 pp.
- Streibig, J. and Kudsk, P. (1993). Herbicide Bioassays. CRC Press. Boca Ratón, FL. pp. 270.
- Schloss, J. V.; Ciskanik, L. M. and Van dyk, D. E. (1988). Origin of the herbicide binding site of acetolactate synthase. *Nature*, (331): 360-362.
- Sankaran, S.; Mishra, A.; Ehsani, R. and Davis, C. (2010). A review of advanced techniques for detecting plant diseases. *Computers and electronics in agriculture*, 72(1): 1-13.
- Travlos, I. S.; Giannopolitis, C. N. and Economou, G. (2011). Diclofop resistance in sterile wild oat (*Avena sterilis* L.) in wheat fields in Greece and its management by other post-emergence herbicides. *Crop Protection*, 30(11): 1449-1454.
- Tidemann, B.D.; Charles, M.; Geddes, C M.; Hugh, J. and Beckie, HJ. 2021. *Avena fatua* and *Avena sterilis*. En: *Biology and Management of Problematic Crop Weed Species* (Ed: Bhagirath SC), pp. 43-66. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822917-0.00015-X>.
- Tovar Hernández, H., Cruz Villegas, M., Ponce Medina, F., Muñiz Salazar, R., Avendaño Reyes, L., Grimaldo Juárez, O. y Medina Basulto, G. (2008). Detección de mutaciones relacionadas con resistencia a herbicida en avena silvestre (*Avena fatua* L.). *Agricultura técnica en México*, 34(2): 251-256.
- Tafoya, R. A. (2004). Resistencia a herbicidas de dos poblaciones de *Avena fatua* L. del Valle de Mexicali. XXV Congreso Nacional de la Ciencia de la Maleza. Universidad Autónoma de Guadalajara, México.
- Travlos, I. S., Giannopolitis, C. N. and Paspatis, E. A. (2008). Wild oat variability in wheat fields of Viotia in Central Greece. *Hellenic Plant Protection*, 107.
- Uludag, A., Nemli, Y., Tal, A. y Rubin, B. (2007). Fenoxaprop resistance in sterile wild oat (*Avena sterilis*) in wheat fields in Turkey. *Crop Protection*, 26(7): 930-935.
- Vargas Cruz, J. (2015). Implementación de imágenes termográficas para la detección de estrés hídrico en hierbabuena (*Mentha spicata*) bajo invernadero en la Sabana de Bogotá. *Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola*.
- Velasco-López, J. L.; Soto-Ortiz, R.; Ail-Catzim, C.; Grimaldo-Juárez, O.; Avilés-Marín, S. M. y Lozano-Del Río, A. J. (2020). Relación de índices fotográficos y NDVI con la

- producción de biomasa seca en triticale (\times Triticosecale wittmack) en el valle de Mexicali. *AGROProductividad*, 13(1).
- Vigna, M. R., Gigón, R. y López, R. L. (2011). Presencia de poblaciones de *Avena fatua* L. resistente a herbicidas en argentina. In *XX Congreso de la Asociación Latinoamericana de Malezas (ALAM Viña del Mar–Chile, 4-9 diciembre de 2011. Actas del Congreso en CD.*
- Vrbničanin S, Pavlović D and Božić D. (2017). Weed Resistance to Herbicides. <http://dx.doi.org/10.5772/67979>.
- Walker, K. A.; Ridley, S. M.; Lewis, T. and Harwood, J. L. (1989). Action ariloxo-phenoxo carboxylic acids on lipid metabolism *Rev. Weed Sci.* (4):71-84.