



Instrumentos digitales para evaluar la eficacia de herbicidas en *Avena fatua* L. en trigo*

Digital tools to evaluate the efficacy of herbicides on *Avena fatua* L. in wheat

Andrés González-Ruiz¹, Carlos Enrique Ail-Catzim², Carlos Alfonso López-Orona¹, Raymundo Medina-López¹,
 Mitzi Dayanira Estrada-Acosta¹, Guadalupe Alfonso López-Urquidez¹

* Recepción: 13 de marzo, 2026. Aceptación: 17 de julio, 2026. Este trabajo deriva de la tesis doctoral titulada *Herramientas digitales en la evaluación de herbicidas inhibidores de la ALS y la ACCasa y resistencia de Avena fatua L. en trigo*, desarrollada como parte del programa de Doctorado en Ciencias Agropecuarias de la Universidad Autónoma de Sinaloa, en Culiacán, Sinaloa, México.

¹ Universidad Autónoma de Sinaloa, Facultad de Agronomía. Sinaloa, México. andres.gonzalez18@uabc.edu.mx (<https://orcid.org/0000-0001-5902-7943>); clopezorona@uas.edu.mx (<https://orcid.org/0000-0003-2603-5562>); raymedinalop@hotmail.com (<https://orcid.org/0000-0001-8180-0066>); mitziestrada@uas.edu.mx (<https://orcid.org/0000-0002-8648-6915>); alfonsolopezurquidez@uas.edu.mx (autor para correspondencia, <https://orcid.org/0000-0001-8968-6771>).

² Universidad Autónoma de Baja California, Instituto de Ciencias Agrícolas. Baja California, México. carlos.ail@uabc.edu.mx (<https://orcid.org/0000-0003-3426-1578>).

Resumen

Introducción. Al utilizar una escala visual en evaluaciones de eficacia de herbicidas sobre *Avena fatua* L. en el cultivo de trigo, pueden presentarse imprecisiones, ya que los valores obtenidos dependen de criterios subjetivos del observador. **Objetivo.** Evaluar instrumentos digitales como alternativa a la observación visual en la medición del efecto de herbicidas sobre *Avena fatua* L. **Materiales y métodos.** Los instrumentos evaluados fueron el análisis del desarrollo de la planta en el suelo (SPAD, por sus siglas en inglés) y el sensor GreenSeeker, que mide la intensidad de la luz reflejada por las plantas. Se seleccionaron tres zonas productoras de trigo con problemas de avena silvestre en el ciclo agrícola otoño-invierno 2020-2021, en el valle de Mexicali, Baja California, México. En cada zona se realizó un experimento con un diseño de bloques completos al azar con seis tratamientos; uno de ellos correspondió al testigo, y los otros cinco, a herbicidas inhibidores de la acetolactato sintasa y de la acetil carboxil coenzima A sobre *A. fatua* L. Las variables medidas fueron porcentaje de daño observado visualmente, altura y densidad de plantas de avena silvestre. Con los valores obtenidos, tanto visualmente como mediante instrumentos digitales, se realizaron análisis de correlación y de regresión de Pearson. **Resultados.** En los tres experimentos se observó correlación entre todas las formas de medición aplicadas. Cada centésima de la lectura del GreenSeeker equivalió al 2,66 % de control, mientras que cada unidad del SPAD equivalió al 4,21 % de control. **Conclusiones.** El SPAD y el GreenSeeker pueden ser utilizados para evaluar la eficacia de herbicidas inhibidores de la acetolactato sintasa y de la acetil carboxil coenzima A sobre *A. fatua* L. en trigo.

Palabras clave: agricultura de precisión, evaluación digital, control de maleza, acetolactato sintasa, acetil carboxil coenzima A.



Abstract

Introduction. When using a visual scale to evaluate herbicide efficacy against wild oat (*Avena fatua* L.) in wheat crops, inaccuracies may occur because the values obtained depend on the observer's subjective criteria. **Objective.** To evaluate digital instruments as an alternative to visual observation for measuring the effects of herbicides on *Avena fatua* L. **Materials and methods.** The instruments evaluated were the soil plant analysis development meter (SPAD) and the GreenSeeker sensor, which measures the intensity of light reflected by plants. Three wheat-producing areas with wild oat problems were selected during the fall–winter 2020–2021 growing season in the Mexicali valley, Baja California, Mexico. In each area, an experiment was conducted using a randomized complete block design with six treatments: one treatment was the untreated control, and the other five consisted of acetolactate synthase- and acetyl-coenzyme A carboxylase-inhibiting herbicides applied against *A. fatua* L. The measured variables were the percentage of visually observed damage and the height and density of wild oat plants. Pearson correlation and regression analyses were performed using the values obtained both visually and with digital instruments. **Results.** In all three experiments, correlations were observed among all the measurement methods used. Each hundredth of a GreenSeeker reading corresponded to 2.66 % control, while each SPAD unit corresponded to 4.21 % control. **Conclusions.** The SPAD meter and GreenSeeker sensor can be used to evaluate the efficacy of acetolactate synthase- and acetyl-coenzyme A carboxylase-inhibiting herbicides against *A. fatua* L. in wheat.

Keywords: precision agriculture, digital assessment, weed control, acetolactate synthase, acetyl coenzyme A.

Introducción

El trigo (*Triticum aestivum* L.), de la familia de las poáceas, es el principal grano cultivado en Baja California, México, con una superficie de 39 210 ha, equivalente al 24,3 % de la superficie cultivada en dicha entidad federativa en 2023. A nivel nacional, en ese mismo año se sembraron 565 022,33 ha, de acuerdo con el Servicio de Información Agropecuaria y Pesquera (2024). En el manejo de este cultivo, los agricultores enfrentan diversos problemas, entre ellos la presencia de malezas, en especial la avena silvestre (*Avena fatua* L.). Para combatirla, los productores aplican herbicidas y, por tanto, se requiere conocer su eficacia de control (Medina-Cázares et al., 2024).

Los herbicidas utilizados en el control de *Avena fatua* L. en trigo son los inhibidores de la acetolactato sintasa (ALS), los cuales bloquean la síntesis de aminoácidos de cadena ramificada (valina, leucina e isoleucina). Como consecuencia, se detiene la división celular y el crecimiento vegetal. Posteriormente, ocurren alteraciones metabólicas, estrés oxidativo y deterioro de cloroplastos, lo que provoca disminución de clorofila y clorosis foliar (Zhou et al., 2007). Por su parte, los inhibidores de acetyl coenzyme A (ACCasa) bloquean la biosíntesis de ácidos grasos esenciales para la formación y el mantenimiento de membranas celulares y de cloroplastos. La desorganización de estas estructuras provoca pérdida de funcionalidad fotosintética, clorosis y necrosis de los tejidos (Takano et al., 2021). Con ambos tipos de herbicidas, las hojas de *Avena fatua* L. pierden gradualmente su verdor.

Para estimar la eficacia de los herbicidas, es común que los técnicos evalúen el daño causado por agroquímicos en las malezas mediante la asignación de un valor porcentual a lo observado, con base en la escala propuesta por la Sociedad Europea de Investigación en Maleza (EWRS) (Dear et al., 2003). Una de las razones de ello es su bajo costo (Kousta et al., 2024). En la evaluación de la eficacia de herbicidas, también se consideran otras escalas, las cuales varían en su nivel de precisión (Miranda et al., 2021). Además, se dificulta comparar los resultados con otros estudios similares, ya que el porcentaje otorgado a determinado nivel de daño puede variar entre quienes determinan dicho valor, pues depende de las características físicas y la experiencia de las personas.

Aunado a la escala visual cualitativa, en la evaluación de los herbicidas también se consideran variables cuantitativas, tales como la altura de planta, la producción de materia seca, la densidad de plantas y el rendimiento del cultivo (Burrill et al., 1977; Gitsopoulos et al., 2024). Por otra parte, hay distintas alternativas que pueden utilizarse para determinar el efecto de herbicidas, por ejemplo, el uso de imágenes termográficas, el análisis del desarrollo de la planta en el suelo (SPAD, por sus siglas en inglés) y el sensor GreenSeeker (Kaur et al., 2017; Onwuchekwa-Henry et al., 2023). Este último instrumento se utiliza para diferenciar plantas sanas de aquellas que tienen algún desorden fisiológico mediante un índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI). Este valor, con rango de 0 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 de NDVI (Gutiérrez-Soto et al., 2011).

El SPAD es un instrumento digital que mide dos valores de la transmisión de la radiación de la energía: el primero corresponde a la luz roja a 650 nm (Kaur et al., 2017; Pineda et al., 2021), la cual es absorbida por las plantas mediante la clorofila; el segundo, a la radiación infrarroja, con longitud de onda de 940 nm, que no es absorbida por la clorofila (Xiong et al., 2015). Con este instrumento, se diagnostica el nivel de nutrición nitrogenada en las plantas (Wang et al., 2024), ya que captura cambios en el contenido de clorofila cuando el daño es imperceptible, lo cual puede ser útil para evaluar la eficacia de herbicidas (Thomasi et al., 2021). Esto es aplicable a los herbicidas sistémicos, como es el caso de los empleados en esta investigación.

En el presente estudio se consideró que tanto el SPAD como el GreenSeeker, al reflejar el nivel de salud de las plantas mediante la intensidad del verdor de las hojas, pueden emplearse para medir la acción de los herbicidas inhibidores de la ALS y los inhibidores de ACCasa. Por ello, podrían ser utilizados para estimar su efectividad. Se partió del supuesto de que con la información obtenida por medio del SPAD y el GreenSeeker se puede inferir la sanidad de las plantas y, por lo tanto, el efecto de herbicidas sobre malezas, en particular sobre la avena silvestre. Por consiguiente, el objetivo de esta investigación fue evaluar instrumentos digitales como alternativa a la observación visual en la medición del efecto de herbicidas sobre *Avena fatua* L.

Materiales y métodos

Establecimiento de los ensayos

Se realizaron experimentos durante el ciclo agrícola otoño-invierno 2020-2021 en tres zonas de producción de trigo en el valle de Mexicali, Baja California, México. Los ensayos se establecieron en unidades de producción de agricultores cooperantes, las cuales fueron identificadas de la siguiente manera: zona norte, Ejido República 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), y zona sur, Ejido Sombrerete (latitud 32°9'28,15"N, longitud 115°3'48,19"O). Los experimentos se desarrollaron bajo temperaturas máximas promedio de 29,33 °C y mínimas promedio de 10,53 °C, sin precipitaciones durante los ensayos.

Se seleccionaron predios con antecedentes históricos donde los productores de trigo han tenido problemas para controlar *Avena fatua* L. En los experimentos, el cultivo se manejó como lo hacen los agricultores de la región, salvo por la aplicación de herbicidas en los ensayos, los cuales se aplicaron cuando la maleza tenía como máximo 15 cm de altura y de tres a cuatro hojas verdaderas (Cruz-Hipólito et al., 2011), mientras que el cultivo de trigo se encontraba en pleno amacollamiento para el caso del cultivo de trigo en pleno amacollamiento (Zadoks et al., 1974). Los tres experimentos se realizaron bajo un diseño de bloques completos al azar con seis tratamientos y cuatro repeticiones. Cada parcela experimental consistió en 996,72 m² y cada unidad experimental fue de 41,53 m², con un área útil de 18,96 m². En la aplicación de los herbicidas, se utilizó una pulverizadora de 25 de L de dos

tiempos, equipada con una barra de pulverización de 1,2 m de distancia y 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 de los herbicidas se preparó de acuerdo con el pH óptimo (Lewis et al., 2016) y una conductividad eléctrica promedio de 1,31 dS m⁻¹, medida con un conductímetro. 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, ya que los demás herbicidas ya contienen coadyuvante. En esta evaluación, se utilizaron herbicidas pertenecientes a dos grupos de acuerdo con su modo de acción: herbicidas inhibidores de la ALS e inhibidores de la ACCasa, a dosis comerciales recomendadas para el control de malezas de hoja angosta y algunas de hoja ancha (González-Ruiz et al., 2024).

Evaluación de los instrumentos digitales

Los instrumentos empleados en esta evaluación fueron el reflectómetro portátil GreenSeeker, mediante el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), y un clorofilómetro portátil SPAD. Con ambos dispositivos se realizaron cuatro submuestreos al azar con un marco de 0,092903 m² en cada unidad experimental, por la mañana, a la misma hora. Con el GreenSeeker, la lectura se tomó a una altura de 60 cm sobre *A. fatua*. En el caso del clorofilómetro SPAD, se midieron cinco plantas de *A. fatua* en la segunda hoja verdadera a partir del meristemo apical. Las lecturas se efectuaron cada 14 días, desde el día 0 hasta el 56.

La altura de planta se midió con una regla graduada en milímetros. En cada punto de muestreo se midieron cinco plantas. En la selección de cada una de ellas se aplicó un muestreo aleatorio mediante la hoja de cálculo Excel. Este procedimiento se efectuó en dos momentos mediante la función =Redondear(Aleatorio()*(12),0). Previamente, los lados del marco de muestreo se dividieron en 12 partes y se numeraron del 1 al 12. La densidad de malezas se determinó mediante el conteo de plantas de *A. fatua* por unidad de muestreo; el porcentaje de control se midió aplicando la escala visual de la Sociedad Europea de Investigación en Maleza (Ekhatior et al., 2018).

Análisis estadístico

Con los datos recabados hasta la última etapa de evaluación (56 días después de la aplicación) se realizó un análisis de correlación múltiple de Pearson ($p = 0,05$). Con los datos del conjunto de los tres experimentos, también se ejecutó un análisis de regresión lineal para proyectar el daño causado por los herbicidas en la maleza relacionándolo con el valor en la lectura del SPAD y del GreenSeeker.

Previamente, se llevaron a cabo las pruebas de normalidad y de homocedasticidad de las varianzas entre las variables mediante las pruebas de Shapiro-Wilk y de Bartlett, respectivamente (Zar, 2010). Sin embargo, debido a la presencia de datos muy extremos en densidad y altura de plantas, en estas variables no se cumplieron los supuestos estadísticos para aplicar el índice de correlación de Pearson. Por tal motivo, se efectuó un análisis no paramétrico mediante la prueba de Spearman. Para ello, se utilizó el paquete estadístico XLSTAT versión 2022.3.1 (Addinsoft, 2022).

Resultados

Relación de los equipos digitales en la medición del control sobre *Avena fatua*

Los valores promedio, mínimos y máximos de las variables evaluadas se presentan en el Cuadro 1. Esto permitirá tener un referente para futuras investigaciones relacionadas con el uso de instrumentos digitales para medir el efecto de herbicidas en plantas. En los valores de NDVI obtenidos con GreenSeeker solo se observó una diferencia de dos décimas en una escala de 0 a 1, lo que contrasta marcadamente con los valores de densidad, porcentaje visual y altura de planta.

Cuadro 1. Fluctuación de los valores de las variables medidas con instrumentos digitales como indicadores del efecto de herbicidas sobre *Avena fatua* en los tres experimentos realizados en el valle de Mexicali, Baja California, México. Ciclo otoño-invierno 2020-2021.

Table 1. Fluctuation of the values of the variables measured with digital instruments as indicators of the effect of herbicides on *Avena fatua* in the three experiments carried out in the Mexicali valley, Baja California, Mexico. Autumn-winter cycle 2020–2021.

Zona	Variable	Mínimo	Máximo	Media	Desviación típica
Norte	Visual (%)	0,0	93,8	43,1	41,8
	Altura (cm)	11,0	102,0	44,3	29,5
	Densidad	148,0	807,3	513,9	193,8
	SPAD	23,0	39,7	32,5	5,1
	NDVI (0 a 1)	0,6	0,7	0,7	0,1
Centro	Visual (%)	0,0	90,5	56,0	32,0
	Altura (cm)	7,6	77,6	27,9	20,2
	Densidad	255,0	852,4	502,9	160,6
	SPAD	17,5	42,0	31,8	6,3
	NDVI (0 a 1)	0,5	0,7	0,6	0,1
Sur	Visual (%)	0,0	70,9	40,6	30,6
	Altura (cm)	9,3	94,6	42,6	28,8
	Densidad	290,6	458,1	355,8	49,3
	SPAD	22,0	41,7	34,3	5,8
	NDVI (0 a 1)	0,5	0,7	0,6	0,1
Total	Visual (%)	0,0	93,8	46,5	35,3
	Altura (cm)	7,6	102,0	38,2	27,2
	Densidad	148,0	852,4	457,6	163,0
	SPAD	17,5	42,0	32,9	5,8
	NDVI (0 a 1)	0,5	0,7	0,6	0,1

El análisis de correlación mostró que las mediciones realizadas con los instrumentos digitales están correlacionadas entre sí en los tres experimentos. En la zona norte, el nivel de asociación fue más alto (Cuadro 2). La observación visual tiene correlación negativa con la altura de planta ($R = -0,77$), la densidad de plantas ($R = -0,87$), el SPAD ($R = -0,75$) y el GreenSeeker ($R = -0,7$).

Cuadro 2. Correlación entre las lecturas de los instrumentos para evaluar el daño causado por los herbicidas en *Avena fatua* en el experimento realizado en la zona norte del valle de Mexicali, Baja California, México. Ciclo otoño-invierno 2020-2021.

Table 2. Correlation between readings from instruments used to assess damage caused by herbicides on *Avena fatua* in the experiment carried out in the northern area of the Mexicali valley, Baja California, Mexico. Autumn-winter cycle 2020–2021.

Variables	Visual	Altura	NDVI	SPAD
Densidad	−0,87*** (−0,95; −0,68)	0,74*** (0,44; 0,89)	0,69*** (0,36; 0,87)	0,76*** (0,47; 0,9)
Visual		−0,77*** (−0,91; −0,49)	−0,7*** (−0,87; −0,37)	−0,75*** (−0,9; −0,45)
Altura			0,91*** (0,77; 0,97)	0,78*** (0,5; 0,91)
NDVI				0,7*** (0,38; 0,87)

Los valores entre paréntesis corresponden a los intervalos de confianza del 95 %. **SPAD:** Análisis del desarrollo de la planta en el suelo. **NDVI:** Índice de vegetación de diferencia normalizada. *** $p < 0,001$. / Values in parentheses correspond to the 95 % confidence intervals. **SPAD:** Soil plant analysis development. **NDVI:** Normalized difference vegetation index. *** $p < 0,001$.

En el experimento realizado en la zona centro, todos los medios de evaluación del daño causado por los herbicidas están correlacionados entre ellos (Cuadro 3). Tanto las lecturas del SPAD como las del GreenSeeker tienen correlación significativa con respecto a los valores de daño sobre *A. fatua*. Destaca la correlación de 0,98 entre las medidas de NDVI y la altura de la planta.

Cuadro 3. Correlación entre las lecturas de los instrumentos para evaluar el daño causado por los herbicidas en *Avena fatua* en el experimento realizado en la zona centro del valle de Mexicali, Baja California, México. Ciclo otoño-invierno 2020-2021.

Table 3. Correlation between readings from instruments used to assess damage caused by herbicides on *Avena fatua* in the experiment carried out in the central area of the Mexicali valley, Baja California, Mexico. Autumn-winter cycle 2020–2021.

Variables	Visual	NDVI	Altura	SPAD
Densidad	−0,73*** (−0,89; −0,42)	0,61** (0,24; 0,83)	0,61** (0,24; 0,83)	0,49* (0,09; 0,76)
Visual		−0,6** (−0,82; −0,22)	−0,6** (−0,82; −0,22)	−0,67*** (−0,86; −0,32)
NDVI			0,98*** (0,94; 0,99)	0,61** (0,24; 0,83)
Altura				0,66** (0,32; 0,85)

Los valores entre paréntesis corresponden a los intervalos de confianza del 95 %. **SPAD:** Análisis del desarrollo de la planta en el suelo. **NDVI:** Índice de vegetación de diferencia normalizada. * $p < 0,05$. ** $p < 0,01$. *** $p < 0,001$. / Values in parentheses correspond to the 95 % confidence intervals. **SPAD:** Soil plant analysis development. **NDVI:** Normalized difference vegetation index. * $p < 0,05$. ** $p < 0,01$. *** $p < 0,001$.

Los resultados de la correlación entre los diferentes instrumentos de medición en el experimento de la zona sur muestran que hay correlación alta y significancia estadística entre las variables, con excepción de la densidad de plantas, que solo tuvo correlación significativa con la variable visual (Cuadro 4). Con respecto a los instrumentos

de medición, destaca la relación entre los valores registrados con SPAD y los obtenidos mediante observación visual, con una correlación de $-0,74$, así como la relación entre el SPAD y la altura, con una correlación de $0,97$.

Cuadro 4. Correlación entre las lecturas de los instrumentos para evaluar el daño causado por los herbicidas en *Avena fatua* en el experimento realizado en la zona sur del valle de Mexicali, Baja California, México. Ciclo otoño-invierno 2020-2021.

Table 4. Correlation between readings from instruments used to assess damage caused by herbicides on *Avena fatua* in the experiment carried out in the southern area of the Mexicali valley, Baja California, Mexico. Autumn-winter cycle 2020–2021.

Variables	Visual	SPAD	Altura	NDVI
Densidad	$-0,52^{**}$ ($-0,78; -0,12$)	$0,31$ NS ($-0,11; 0,64$)	$0,25$ NS ($-0,18; 0,59$)	$0,12$ NS ($-0,3; 0,5$)
Visual		$-0,74^{***}$ ($-0,89; -0,43$)	$-0,7^{***}$ ($-0,87; -0,38$)	$-0,62^{**}$ ($-0,83; -0,25$)
SPAD			$0,97^{***}$ ($0,92; 0,99$)	$0,81^{***}$ ($0,57; 0,93$)
Altura				$0,8^{***}$ ($0,54; 0,92$)

Los valores entre paréntesis corresponden a los intervalos de confianza del 95 %. **SPAD:** Análisis del desarrollo de la planta en el suelo. **NDVI:** Índice de vegetación de diferencia normalizada. $^{**} p < 0,01$. $^{***} p < 0,001$. **NS:** No significativo. / Values in parentheses correspond to the 95 % confidence intervals. **SPAD:** Soil plant analysis development. **NDVI:** Normalized difference vegetation index. $^{**} p < 0.01$. $^{***} p < 0.001$. **NS:** Not significant.

Al realizar la correlación con los datos del daño causado por los herbicidas sobre *A. fatua* en todos los experimentos, se encontró una asociación negativa entre las lecturas de los diferentes instrumentos de medición y los registros visuales (Cuadro 5). Destaca la relación entre la observación visual y el SPAD y el NDVI; con el primero se registró un valor de $-0,7$, y con el segundo, de $-0,55$. También se manifestó una correlación significativa entre las lecturas de los instrumentos digitales, con un valor de $0,61$.

Cuadro 5. Análisis de correlación entre los diferentes medios para evaluar el nivel de daño causado por los herbicidas sobre *Avena fatua* en el cultivo de trigo con los datos de los tres experimentos en el valle de Mexicali, Baja California, México. Ciclo otoño-invierno 2020-2021.

Table 5. Correlation analysis between the different means to evaluate the level of damage caused by herbicides on *Avena fatua* in wheat cultivation with data from the three experiments in the Mexicali valley, Baja California, Mexico. Autumn-winter cycle 2020–2021.

Variables	Visual	NDVI	Altura	SPAD
Densidad	$-0,59^{***}$ ($-0,73; -0,4$)	$0,3^{*}$ ($0,07; 0,5$)	$0,39^{**}$ ($0,16; 0,57$)	$0,3^{**}$ ($0,15; 0,56$)
Visual		$-0,55^{**}$ ($-0,7; -0,35$)	$-0,7^{***}$ ($-0,81; -0,53$)	$-0,7^{***}$ ($-0,81; -0,54$)
NDVI			$0,85^{***}$ ($0,76; 0,91$)	$0,61^{***}$ ($0,42; 0,74$)
Altura				$0,81^{***}$ ($0,7; 0,89$)

Los valores entre paréntesis corresponden a los intervalos de confianza del 95 %. **SPAD:** Análisis del desarrollo de la planta en el suelo. **NDVI:** Índice de vegetación de diferencia normalizada. $^{*} p < 0,05$. $^{**} p < 0,01$. $^{***} p < 0,001$. / Values in parentheses correspond to the 95 % confidence intervals. **SPAD:** Soil plant analysis development. **NDVI:** Normalized difference vegetation index. $^{*} p < 0,05$. $^{**} p < 0,01$. $^{***} p < 0,001$.

Predicción del daño utilizando instrumentos digitales

Con la realización del análisis de regresión lineal, al evaluar el daño con los instrumentos digitales, se encontró que, por cada centésima de la lectura de GreenSeeker, el control visual se incrementó en 2,66 %, con un coeficiente de correlación de $-0,55$ ($p < 0,00019$). Con respecto a la relación del SPAD con el registro visual, se observó que, por cada unidad de este instrumento digital, el control de los herbicidas sobre *A. fatua* disminuyó 4,21 %. Esto con un coeficiente de correlación de $-0,7$ ($p < 0,0001$).

Discusión

De acuerdo con los datos de la observación visual, los herbicidas utilizados en la presente investigación causaron daños severos en *A. fatua*. Esto pudo deberse a que afectaron procesos fisiológicos relacionados con la degradación de la clorofila, ya que los herbicidas inhibidores de la ALS y de la ACCasa inhiben la síntesis de aminoácidos esenciales o de ácidos grasos, lo que provoca alteraciones que inciden en el funcionamiento de los cloroplastos y, por tanto, reducen la capacidad fotosintética de las plantas. Estos efectos se manifiestan visualmente como clorosis y, posteriormente, necrosis de los tejidos vegetales (Zhou et al., 2007; Kukorelli et al., 2013; Takano et al., 2021), así como en el cambio de la coloración de las hojas y tallos de las malezas (Ali et al., 2013). Como consecuencia de ello, la planta deja de crecer; estos cambios fueron captados por los instrumentos digitales SPAD y GreenSeeker.

Los resultados obtenidos coinciden con los reportados por Thomasi et al. (2021), quienes observaron reducciones significativas en los índices espectrales de borde rojo (NDRE) tras la aplicación de metribuzin en *A. sativa*, lo que evidencia que las alteraciones fisiológicas inducidas por herbicidas pueden ser detectadas mediante sensores ópticos. De manera similar, Yao et al. (2012) encontraron que diversos índices de vegetación, entre ellos NDVI, SAVI, TVI y VNNIR, fueron sensibles para evaluar el daño ocasionado por la deriva de glifosato en soya.

Es importante considerar las diferencias entre los sensores utilizados, ya que mediante el SPAD se estima indirectamente el contenido de clorofila en las hojas, lo que generalmente ofrece una alta precisión para detectar cambios fisiológicos asociados con la degradación de pigmentos fotosintéticos (Markwell et al., 1995; Uddling et al., 2007). Por su parte, con el sensor GreenSeeker se estima el índice de vegetación a partir de la reflectancia del dosel, integrando información relacionada con biomasa, cobertura vegetal y vigor de la planta (Raun et al., 2001; Solari et al., 2008). En consecuencia, mientras que el SPAD puede ser más sensible para detectar alteraciones tempranas en el contenido de clorofila, el GreenSeeker proporciona una evaluación más integral de la respuesta de la planta al herbicida a nivel de dosel.

Las reducciones observadas en los valores de SPAD y NDVI después de la aplicación de herbicidas inhibidores de la ALS y la ACCasa, en los tres experimentos, sugieren una disminución de la actividad fotosintética y del vigor vegetativo de *A. fatua*. Desde una perspectiva práctica, estos resultados indican que el uso de sensores ópticos puede constituir una herramienta complementaria para monitorear la eficacia de los tratamientos herbicidas, ya que permite detectar respuestas fisiológicas de la maleza.

Los resultados de la evaluación de los instrumentos digitales no se pueden extrapolar a los efectos que causarían los herbicidas en etapas fenológicas de *A. fatua* diferentes a la considerada en este estudio (plántulas de hasta 15 cm). La razón de ello es que la correlación entre las lecturas de los instrumentos digitales y la observación visual varía de acuerdo con la etapa fenológica de la planta (Fabbri et al., 2020), así como con la densidad de las malezas (Aditya et al., 2025). Ante esta situación, es recomendable efectuar evaluaciones que integren más etapas fenológicas y las demás especies presentes en el agroecosistema del trigo.

La falta de asociación entre la densidad de la maleza y los valores capturados por los instrumentos digitales en el experimento realizado en la zona sur puede explicarse por el incremento en el desarrollo del cultivo y la baja densidad de *A. fatua*. Esta, al ser dañada por el herbicida, disminuyó su capacidad competitiva, contribuyendo a mantenerla en densidades que no causaran daño al cultivo, ya que, en la relación competitiva entre las especies, el debilitamiento de una de ellas favorece el desarrollo de la otra (Begon et al., 2006). Sin embargo, en ese punto, los valores obtenidos con los equipos GreenSeeker y SPAD indicaban alta densidad de la maleza.

Lo anterior sugiere que las lecturas de los instrumentos digitales fueron afectadas por la cobertura del trigo en la última etapa de medición (56 dda), ya que estas fueron dominantes sobre las plantas de *A. fatua* debilitadas. En este caso, las lecturas de NDVI se saturan con facilidad por la biomasa de otras plantas (Thomasi et al., 2021), por lo que pueden presentarse errores en las mediciones. Ante ello, al medir con estos instrumentos en las diferentes etapas de desarrollo, se debe considerar que puede llegar un momento en que la densidad del trigo interfiera en la lectura.

Es probable que las lecturas de los instrumentos hayan sido influidas por algún tipo de estrés adicional provocado por la acción de los herbicidas (Gaafar et al., 2022). Por ello, es importante considerar la apariencia de las malezas al momento de utilizar los dispositivos evaluados, ya que las plantas pueden estresarse por diferentes causas, por ejemplo, falta de agua, temperaturas extremas, desnutrición o la combinación de algunas de ellas (Zhang et al., 2023). Ante esta situación, las plantas reaccionan de diferentes maneras, incluida la disminución del crecimiento (Zhang et al., 2020).

Con los resultados también se mostró que los instrumentos digitales evaluados permiten estimar la altura y la densidad de las plantas de *A. fatua* afectadas por al menos los dos grupos de herbicidas inhibidores de la ALS y la ACCasa. Sin embargo, se debe tomar en cuenta que los valores registrados con estos dispositivos digitales pueden variar dependiendo de las características foliares de la especie, tales como color, contenido de cera y grosor de la hoja (Bracke et al., 2019). También se debe considerar que las lecturas generadas por los instrumentos pueden mejorar si se correlacionan con imágenes captadas mediante teledetección con vehículos aéreos no tripulados (Ma et al., 2024).

Conclusiones

Las mediciones realizadas con SPAD y GreenSeeker mostraron asociaciones significativas con la evaluación visual del daño causado por herbicidas inhibidores de la acetolactato sintasa (ALS) y la acetil coenzima A (ACCasa) sobre *Avena fatua* L. en las tres zonas estudiadas en el valle de Mexicali, Baja California, México. Estas asociaciones se reflejaron en los cambios en el contenido de clorofila y el vigor vegetativo de la maleza.

La relación observada entre las lecturas de ambos sensores y las variables de respuesta evaluadas indica el potencial de los instrumentos digitales evaluados para complementar la estimación de la eficacia herbicida mediante mediciones objetivas y no destructivas. Sin embargo, la magnitud de estas asociaciones estuvo influenciada por factores como la etapa fenológica de la maleza, su densidad y la interferencia del cultivo, por lo que su aplicación debe restringirse a condiciones similares a las de este estudio y requiere validación adicional para su extrapolación a otros escenarios productivos.

Los datos sugieren que cuando el SPAD registra una lectura aproximada de 20 unidades, no se tiene control, y cuando el valor se aproxima a 32, el daño es severo. También se infiere que cuando las lecturas obtenidas con GreenSeeker presentan valores de 0,7 no se tienen daños, y cuando los valores son de 0,5, el daño causado por los herbicidas es severo.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por la beca otorgada a Andrés González Ruiz para realizar sus estudios de doctorado en Ciencias Agropecuarias en la Universidad Autónoma de Sinaloa.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

Referencias

- Addinsoft. (2022). *XLSTAT Statistical and data analysis solution* (Versión 2022.3) [Software]. Lumivero. <https://www.xlstat.com>
- Aditya, K., Milind, P., Aravinda, K. B. N., Gurupada, B., Anushka, A. S., & Yalamareddy, K. (2025). Assessing the utility of GreenSeeker® based normalized difference vegetation index (NDVI) for weed variability differentiation in Bt cotton. *Plant Science Today*, 12(2), 1-6. <https://doi.org/10.14719/pst.7511>
- Ali, A., Streibig, J. C., Duus, J., & Andreassen, C. (2013). Use of image analysis to assess color response on plants caused by herbicide application. *Weed Technology*, 27(3), 604-611. <https://doi.org/10.1614/WT-D-12-00136.1>
- Begon, M., Harper, J., & Townsend, C. (2006). *Ecology: from individuals to ecosystems* (4.^a ed.). Blackwell Publishing.
- Bracke, J., Elsen, A., Adriaenssens, S., Schoeters, L., Vandendriessche, H., & Van Labeke, M. C. (2019). Application of proximal optical sensors to fine-tune nitrogen fertilization: opportunities for woody ornamentals. *Agronomy*, 9(7), Artículo 408. <https://doi.org/10.3390/agronomy9070408>
- Burrill, L. C., Cárdenas, J., & Locatelli, E. (1977). *Manual de campo para investigación en control de malezas*. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza.
- Cruz-Hipólito, 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. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59(13), 7261-7267.
- Dear, B. S., Sandral, G. A., Spence, D., Khan, M. R. I., & Higgins, T. J. V. (2003). The tolerance of three transgenic subterranean clover (*Trifolium subterraneum* L.) lines with the *bxn* gene to herbicides containing bromoxynil. *Australian Journal of Agricultural Research*, 54(2), 203-210. <https://doi.org/10.1071/AR02134>
- Ekhator, F., Ola, O. T., & Ikuenobe, C. E. (2018). Effectiveness of tank mixture of glyphosate plus metsulfuron for weed control in a juvenile oil palm in Nigeria. *International Journal of Agronomy and Agricultural Research*, 13(1), 29-38.
- Fabbri, C., Napoli, M., Verdi, L., Mancini, M., Orlandini, S., & Dalla Marta, A. (2020). A sustainability assessment of the GreenSeeker N management tool: a lysimetric experiment on barley. *Sustainability*, 12(18), Artículo 7303. <https://doi.org/10.3390/su12187303>
- Gaafar, R. M., Osman, M. E.-A. H., Abo-Shady, A. M., Almohisen, I. A. A., Badawy, G. A., El-Nagar, M. M. F., & Ismail, G. A. (2022). Role of antioxidant enzymes and glutathione S-transferase in bromoxynil herbicide stress tolerance in wheat plants. *Plants*, 11(20), Artículo 2679. <https://doi.org/10.3390/plants11202679>

- Gitsopoulos, T., Tsaliki, E., Korres, N. E., Georgoulas, I., Panoras, I., Botsoglou, D., Vazanelli, E., Fifis, K., & Zisis, K. (2024). Response of industrial hemp (*Cannabis sativa* L.) to herbicides and weed control. *International Journal of Plant Biology*, 15(2), 281-292. <https://doi.org/10.3390/ijpb15020024>
- González-Ruiz, A., Ail-Catzim, C. E., López-Orona, C. A., Medina-López, R., Estrada-Acosta, M. D., & López-Urquidez, G. A. (2024). Herbicidas inhibidores de acetolactato sintasa y acetil carboxil coenzima A en *Avena fatua*. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 15(7), Artículo e3506. <https://doi.org/10.29312/remexca.v15i7.3506>
- Gutiérrez-Soto, M. V., Cadet-Piedra, E., Rodríguez-Montero, W., & Araya-Alfaro, J. M. (2011). El GreenSeeker™ y el diagnóstico del estado de salud de los cultivos. *Agronomía Mesoamericana*, 22(2), 397-403. <https://doi.org/10.15517/am.v22i2.11799>
- Kaur, S., Singh, S. P., & Kingra, P. K. (2017). Detection and management of abiotic stresses in wheat using remote sensing technique. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 6(8), 616-628. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2017.608.079>
- Kousta, A., Katsis, C., Tsekoura, A., & Chachalis, D. (2024). Effectiveness and selectivity of pre- and post-emergence herbicides for weed control in grain legumes. *Plants*, 13(2), Artículo 211. <https://doi.org/10.3390/plants13020211>
- Kukorelli, G., Reisinger, P., & Pinke, G. (2013). ACCase inhibitor herbicides– selectivity, weed resistance and fitness cost: a review. *International Journal of Pest Management*, 59(3), 165-173. <https://doi.org/10.1080/09670874.2013.821212>
- Lewis, K. A., Tzilivakis, J., Warner, D. J., & Green, A. (2016). An international database for pesticide risk assessments and management. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 22(4), 1050-1064. <https://doi.org/10.1080/10807039.2015.1133242>
- Ma, W., Han, W., Zhang, H., Cui, X., Zhai, X., Zhang, L., Shao, H., Niu, Y., & Huang, S. (2024). UAV multispectral remote sensing for the estimation of SPAD values at various growth stages of maize under different irrigation levels. *Computers and Electronics in Agriculture*, 227(1), Artículo 109566. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109566>
- Markwell, J., Osterman, J. C., & Mitchell, J. L. (1995). Calibration of the Minolta SPAD-502 leaf chlorophyll meter. *Photosynthesis Research*, 46(3), 467-472. <https://doi.org/10.1007/BF00032301>
- Medina-Cázares, T., Solís-Moya, E., Grageda-Cabrera, O. A., & González-Figueroa, S. S. (2024). Control de maleza de hoja angosta y ancha en trigo. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 15(6), Artículo e3105. <https://doi.org/10.29312/remexca.v15i6.3105>
- Miranda, G. R. B., Bregagnoli, M., & Dias, R. A. P. (2021). A scale of grades for evaluation of herbicide weed control efficiency. *Revista Agrogeoambiental*, 13(3), 481-487. <https://doi.org/10.18406/2316-1817v13n320211621>
- Onwuchekwa-Henry, C. B., Van Ogtrop, F., Roche, R., & Tan, D. K. Y. (2023). Evaluation of pre-emergence herbicides for weed management and rice yield in direct-seeded rice in Cambodian lowland ecosystems. *Farming System*, 1(2), Artículo 100018. <https://doi.org/10.1016/j.farsys.2023.100018>
- Pineda, M., Barón, M., & Pérez-Bueno, M.-L. (2021). Thermal imaging for plant stress detection and phenotyping. *Remote Sensing*, 13(1), Artículo 68. <https://doi.org/10.3390/rs13010068>
- Raun, W. R., Solie, J. B., Johnson, G. V., Stone, M. L., Lukina, E. V., Thomason, W. E., & Schepers, J. S. (2001). In-season prediction of potential grain yield in winter wheat using canopy reflectance. *Agronomy Journal*, 93(1), 131-138. <https://doi.org/10.2134/agronj2001.931131x>

- Servicio de Información Agropecuaria y Pesquera. (2024). *Anuario estadístico de la producción agrícola 2023*. <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>
- Solari, F., Shanahan, J., Ferguson, R., Schepers, J., & Gitelson, A. (2008). Active sensor reflectance measurements of corn nitrogen status and yield potential. *Agronomy Journal*, 100(3), 571-579. <https://doi.org/10.2134/agronj2007.0244>
- Takano, H. K., Ovejero, R. F. L., Belchior, G. G., Maymone, G. P. L., & Dayan, F. E. (2021). ACCase-inhibiting herbicides: mechanism of action, resistance evolution and stewardship. *Scientia Agrícola*, 78, Artículo e20190102. <https://doi.org/10.1590/1678-992X-2019-0102>
- Thomasi, R. M., Lúcio, A. D., Amado, T. J. C., Pott, L. P., Zanon Junior, A., Werle, I. S., Macedo, M., & Ulguim, A. R. (2021). Relationship of vegetation indices with herbicide phytotoxicity in winter cereals. *Advances in Weed Science*, 39, Artículo e02100050. <https://doi.org/10.51694/AdvWeedSci/2021;39:00017>
- Uddling, J., Gelang-Alfredsson, J., Piikki, K., & Pleijel, H. (2007). Evaluating the relationship between leaf chlorophyll concentration and SPAD-502 chlorophyll meter readings. *Photosynthesis Research*, 91, 37-46. <https://doi.org/10.1007/s11120-006-9077-5>
- Wang, Y., Shi, P., Qian, Y., Chen, G., Xie, J., Guan, X., Shi, W., & Xiang, H. (2024). Enhancing nitrogen nutrition index estimation in rice using multi-leaf SPAD values and machine learning approaches. *Frontiers in Plant Science*, 15, Artículo 1492528. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1492528>
- 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. *Scientific Reports*, 5, Artículo 13389. <https://doi.org/10.1038/srep13389>
- 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. *Computers and Electronics in Agriculture*, 89, 145-157. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2012.09.001>
- Zadoks, J. C., Chang, T. T., & Konzak, C. F. (1974). A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed Research*, 14(6), 415-421. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.1974.tb01084.x>
- Zar, J. H. (2010). *Biostatistical analysis* (5.^a ed.). Prentice Hall.
- Zhang, Y., Xu, J., Li, R., Ge, Y., Li, Y., & Li, R. (2023). Plants' response to abiotic stress: mechanisms and strategies. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(13), Artículo 10915. <https://doi.org/10.3390/ijms241310915>
- Zhang, H., Zhao, Y., & Zhu, J. K. (2020). Thriving under stress: how plants balance growth and the stress response. *Developmental Cell*, 55(5), 529-543. <https://doi.org/10.1016/j.devcel.2020.10.012>
- Zhou, Q., Liu, W., Zhang, Y., & Liu, K. K. (2007). Action mechanisms of acetolactate synthase-inhibiting herbicides. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 89(2), 89-96. <https://doi.org/10.1016/j.pestbp.2007.04.004>