

EXTRACTOS BOTÁNICOS COMO HERBICIDAS POTENCIALES EN UN CULTIVO DE MAÍZ

Botanical extracts as potential herbicides in a corn crop

Milton Carlos SOTO-BARAJAS^{1,2*}, Blanca PRADO²,
Augusto Esaú LÓPEZ-VADILLO³ y Norma Laura RODRÍGUEZ-ÁVILA³

¹ Investigadoras e investigadores por México, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONAHCyT), Av. de los Insurgentes Sur 1582, Col. Crédito Constructor, 03940 Ciudad de México, México.

² Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, 04510 Ciudad de México, México.

³ Tecnológico Nacional de México campus Chiná, Calle 11, Cementerio, Chiná, 24520 Campeche, México.

*Autor para correspondencia: miltonc@geologia.unam.mx

(Recibido: diciembre de 2023; aceptado: agosto de 2024)

Palabras clave: *Metopium brownei*, *Viguiera dentata*, arvenses, bioherbicidas, atrazina.

RESUMEN

La producción de metabolitos secundarios que las plantas utilizan como estrategia de sobrevivencia puede ayudar en el control de la maleza por su efecto alelopático inhibitor. El objetivo de este estudio fue evaluar, por primera vez, el efecto fitotóxico de extractos de *Metopium brownei* (MB) y *Viguiera dentata* (VD) caracterizados por su potencial alelopático en estudios previos in vitro. Se evaluó la capacidad inhibitoria de extractos botánicos (EB) solos, combinados y con atrazina (AZ) en dosis variables, en ensayos de campo en suelo desnudo y cultivo de maíz. La presencia de metabolitos secundarios en los EB se analizó por tamizaje fitoquímico. Además, se determinó el efecto de los EB sobre la germinación y desarrollo inicial del maíz. La composición de metabolitos en los EB de ambas especies tuvo escasa diferencia: se encontraron de manera exclusiva quinonas en el de MB y cumarinas en el de VD. Se comprobó la nula influencia de los EB en la germinación y crecimiento inicial del maíz. Los estudios de campo indicaron que a 60 días de la aplicación de los tratamientos en las parcelas con maíz el control de maleza por la mezcla VD:AZ (2 kg/ha) en relación 3:1 (v/v) fue similar al de AZ a la dosis mínima recomendada. Se propone esta formulación como opción ecológica para el control de malezas en maíz incluso con la adición de dosis reducidas de AZ, dado que permite establecer alternativas sostenibles y menos dependientes de químicos sintéticos tóxicos para el control de la maleza.

Key words: *Metopium brownei*, *Viguiera dentata*, weeds, bioherbicides, atrazine.

ABSTRACT

Secondary metabolite production, utilized by plants as a survival mechanism, may assist in weed control due to its inhibitory allelopathic effect. This study aimed to evaluate, for the first time, the phytotoxic effects of *Metopium brownei* (MB) and *Viguiera dentata* (VD) extracts, characterized by their allelopathic potential as reported in previous in vitro studies. The inhibitory effect of botanical extracts (BE) alone, combined, and

with atrazine (AZ) in variable doses was assessed through field trials on both bare soil and cultivated maize. The presence of secondary metabolites in the BE was analyzed by phytochemical screening 24 and 72 h after preparation. Furthermore, an in vitro effect of the BE on germination and initial development of maize was analyzed. Both species' composition of BE metabolites presented scarce differences; quinones were found exclusively in MB, while coumarins were only found in VD. No influence from de BE was shown on germination and initial growth of maize. Field studies indicated that 60 days after the application of the treatment in maize plots, weed control was similar both with the VD:AZ (2 kg/ha) mixture in a 3:1 (v/v) ratio and with atrazine at the minimum recommended dose. This formulation is proposed as an environmentally friendly option for weed control in corn, even with reduced doses of AZ. It allows for establishing sustainable alternatives that are less dependent on toxic synthetic chemicals for weed control.

INTRODUCCIÓN

Una de las principales desventajas del uso inadecuado de herbicidas de origen sintético es la generación de resistencia en las arvenses, lo que implica aumentos constantes en las dosis de aplicación (Khan y Khan 2015). En EUA se ha observado que, en terrenos cultivados con soya, en los cuales son recurrentes las aplicaciones de glifosato [N-(fosfonometil) glicina], arvenses como *Sorghum halepense* han adquirido resistencia a dicho herbicida (Johnson et al. 2014). Otro de los problemas del mal uso de herbicidas es que pueden contaminar cuerpos de agua y causar daños a especies no objetivo entre las que se encuentran algunos microorganismos benéficos como los fijadores de nitrógeno y los solubilizadores de fósforo (Mahmood et al. 2016). Este tipo de situaciones destaca la necesidad de desarrollar tecnologías para el control de la maleza que además de eficientes sean amigables con el ambiente.

La alelopatía constituye una de las opciones ambientalmente amigables para el manejo de arvenses debido a su baja residualidad en el suelo y a su amplitud para el control de diversas especies. La alelopatía es una propiedad de algunas plantas para estimular o inhibir la vegetación circundante a través de la liberación de metabolitos secundarios (Muller 1969), los cuales actúan de forma similar a los herbicidas sintéticos, pero con menos efectos nocivos para el ambiente (Cheng y Cheng 2015).

Uno de los inconvenientes del uso de las propiedades alelopáticas de los extractos botánicos (EB) como herbicidas, es que tienen un umbral de acción menor y su efecto es menos prolongado que el de los herbicidas de origen químico (Cerdeira et al. 2019). Una alternativa de solución a este problema es utilizar una mezcla de EB y herbicidas sintéticos, lo cual ofrece

un control amplio de arvenses, pero con menor aplicación de agroquímicos (Ihsan et al. 2015).

En la Península de Yucatán, el chechén (*Metopium brownei*) y el tajonal (*Viguiera dentata*) son dos especies vegetales silvestres con distribución espacial amplia en las cuales se ha encontrado la presencia de metabolitos secundarios con capacidad de inhibición de otras especies de plantas consideradas maleza (Anaya et al. 1999, Benvenuti et al. 2017). Por tanto, es posible inferir que las mezclas que contienen extractos acuosos de *M. brownei* y *V. dentata* son eficientes para el control de arvenses. El objetivo de esta investigación fue determinar a través de bioensayos in vitro y de campo los efectos fitotóxicos para control de otras arvenses de disoluciones preparadas con EB acuosos de *M. brownei* y *V. dentata* solos, combinados entre sí y mezclados con el herbicida de síntesis química atrazina.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los ensayos in vitro se realizaron en el Laboratorio de Biotecnología Vegetal y los experimentos de campo se llevaron a cabo en la Unidad Experimental rancho Xamantún (19° 43' 10.0" N, 90° 24' 55.0" W) del Instituto Tecnológico de Chiná en Campeche, México.

Elaboración de los tratamientos evaluados

Las hojas de *M. brownei* y de *V. dentata* se cortaron en secciones de 5 cm. Este material se depositó por separado para cada especie en un contenedor de 20 L al cual se le agregó agua potable hasta conseguir una relación 1:3 (v/v). La mezcla se dejó en reposo por 24 h a 18 °C, y fue filtrada con dos capas de gasa de algodón colocadas sobre un embudo de plástico. La solución obtenida se denominará

extracto botánico (EB), el cual se utilizó para preparar 12 tratamientos al realizar combinaciones entre ellos y con atrazina (6-cloro-N²-etil-N⁴-isopropil-1,3,5-triazina-2,4-diamina), tal como se indica en el **cuadro I**. La atrazina es uno de los herbicidas de origen sintético más utilizados a nivel mundial en cultivos de maíz (LeBaron et al. 2008). La proporción de atrazina utilizada fue de 1.0 y 2.0 kg/ha, correspondiente a las dosis mínima y máxima recomendadas por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura para cultivos de maíz (Labrada et al. 1996).

La cantidad de EB utilizados en los tratamientos fue la correspondiente a la dosis con efecto inhibitorio de la germinación y del desarrollo inicial de rábano (*Raphanus sativus*) y lechuga (*Lactuca sativa*) según Farooq et al. (2018).

Análisis de metabolitos secundarios en los extractos botánicos acuosos

Los procedimientos para el análisis de metabolitos secundarios en los EB de *M. brownei* y *V. dentata* fueron los descritos por Rufai (2016). Los EB se mantuvieron a 18 °C, sellados de manera hermética durante su almacenamiento y protegidos de la luz en frascos de vidrio de 1 L cubiertos con papel aluminio. El tamizaje fitoquímico de los EB se realizó transcurridas 24 y 72 h desde su preparación y tuvo la finalidad de identificar de forma cualitativa la presencia y abundancia relativa de cumarinas, flavonoides, compuestos glucosídicos, quinonas, saponinas, taninos y xantonas, los cuales representan metabolitos

secundarios con actividad alelopática (Hasan et al. 2021, Motmainna et al. 2021).

Efecto de los tratamientos sobre la germinación y el desarrollo inicial del maíz

Para evaluar el efecto de los EB sobre la germinación y en las plántulas de maíz, se colocaron cinco semillas en cajas de Petri de 10 cm de diámetro sobre papel filtro humectado con 3 mL de alguna de las disoluciones indicadas en el **cuadro I**. Para fines estadísticos se realizaron tres repeticiones por tratamiento. Las cajas de Petri se mantuvieron en una cabina de flujo laminar horizontal marca Labconco (Missouri, EUA) modelo 37400-00, con 12 h de luz, temperatura de 25 a 28 °C. Diariamente se aplicó 1 mL de agua potable a cada caja para mantener las semillas hidratadas. Después de 10 días se calculó la tasa de germinación, y se midieron la longitud de la radícula y el tamaño del coleóptilo de las plántulas de maíz.

Evaluación de la capacidad herbicida de los tratamientos en suelo sin cultivo

Este proceso experimental tuvo lugar a partir del 13 de mayo de 2019. Se utilizó un predio con una superficie de 2160 m² que se dividió en 12 parcelas de 9 × 5 m, con 1 m de separación entre ellas. El día anterior a la aplicación de los tratamientos se eliminó la maleza de forma manual. Durante el periodo experimental las parcelas se regaron por goteo con 300 mm de lámina total, distribuidos en eventos de 2 h en 2 días por semana. En cada parcela se aplicó

CUADRO I. TRATAMIENTOS EVALUADOS.

Clave del tratamiento	Composición	Peso (g) del extracto vegetal acuoso o del herbicida sintético adicionado *		
		<i>M. brownei</i>	<i>V. dentata</i>	Atrazina
T01	100 % agua	0.00	0.00	0.00
T02	100 % MB	333.00	0.00	0.00
T03	100 % VD	0.00	333.00	0.00
T04	1:1 MB:VD	166.50	166.50	0.00
T05	3:1 MB:AZmin	249.75	0.00	0.67
T06	3:1 VD:AZmin	0.00	249.75	0.67
T07	100 % AZmax	0.00	0.00	5.40
T08	100 % AZmin	0.00	0.00	2.70
T09	3:1 MB: AZmax	249.75	0.00	1.35
T10	3:1 VD: AZmax	0.00	249.75	1.35
T11	1/3 AZmax	0.00	0.00	1.35
T12	1/3 AZmin	0.00	0.00	0.67

MB: extracto de *M. brownei*; VD: extracto de *V. dentata*; AZmin: atrazina, 1.0 kg/ha; AZmax: atrazina, 2.0 kg/ha.

*La masa indicada se disolvió con agua potable hasta completar 1 L.

el tratamiento correspondiente con una mochila aspersora de bombeo manual, con la cual se distribuyó 1 L de concentrado en toda la superficie de la parcela experimental.

Para determinar el control de la maleza, el porcentaje de cobertura vegetal se calculó de forma visual. Cada parcela se dividió en 27 cuadrantes de 1×1 m y se registró el porcentaje promedio de superficie ocupada por arvenses (Raper et al. 2019). La cobertura se registró a los 15, 30, 45 y 60 días después de la aplicación (dda) de los tratamientos.

La identificación de arvenses a nivel familia y especie se llevó a cabo mediante claves dicotómicas, y la guía en línea del herbario virtual de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) denominada “naturalista”.

Evaluación del efecto de los tratamientos sobre el control de la maleza y el desarrollo vegetativo de maíz en campo

El maíz se sembró el 12 agosto de 2019. Cada parcela sembrada con maíz tuvo seis surcos de 12 m de longitud con 1 m de separación. El procedimiento de siembra fue manual. Se colocaron dos semillas cada 30 cm para un total de 72 semillas por parcela. Se realizó una fertilización única, simultánea a la siembra, con urea (46-00-00) a razón de 100 kg de fertilizante por hectárea.

Para evaluar el desempeño de los tratamientos sobre el control de la maleza en el cultivo de maíz se seleccionaron cuatro tratamientos que contuvieran EB y que hubieran demostrado efecto herbicida en una fase previa realizada en un terreno sin cultivo. Además, se incluyeron las dosis de atrazina recomendadas y el tratamiento testigo; cada uno de estos siete tratamientos se aplicó a dos parcelas sembradas con maíz. El control de arvenses se determinó a los 15, 30, 45 y 60 dda de los tratamientos. Adicionalmente, en cada parcela se registró el porcentaje de germinación. A los 45 días después de la siembra, periodo en que el maíz alcanza su mayor desarrollo vegetativo, se midió la altura y se contó el número de hojas de las plantas. Para estas dos últimas actividades se consideró como unidad de muestreo el promedio de cinco plantas seleccionadas de forma aleatoria por cada parcela.

Análisis estadístico

El efecto de los EB de chechén (*M. brownei*) y de tajonal (*V. dentata*) como potenciales herbicidas se evaluó a través de tres experimentos: *i*) fitotoxicidad de los herbicidas botánicos sobre semillas de maíz in vitro, *ii*) en campo en parcelas sin cobertura vegetal y

iii) sobre un cultivo de maíz. Los resultados obtenidos de estos tres experimentos fueron sometidos a análisis de varianza y pruebas Tukey post hoc ($p \leq 0.05$) de comparación de medias con el programa estadístico R v. 4.0.2. (R Core Team 2020).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Presencia y abundancia de metabolitos secundarios en los extractos botánicos

El tamizaje fitoquímico permitió detectar diferencias tanto en el tipo de metabolitos como en su abundancia entre los EB acuosos de *M. brownei* (MB) y de *V. dentata* (VD), además de modificaciones en su contenido debidas al tiempo de almacenamiento (**Cuadro II**).

CUADRO II. METABOLITOS IDENTIFICADOS EN LOS EXTRACTOS ACUOSOS DE *Metopium brownei* Y *Viguiera dentata*.

Metabolito *	Extracto botánico			
	<i>M. brownei</i>		<i>V. dentata</i>	
	Tiempo de almacenamiento			
	24 h	72 h	24 h	72 h
Cumarinas	—	—	+	—
Flavonoides	++	++	++	++
Glicosídicos	—	—	—	—
Quinonas	++	+	—	—
Saponinas	—	—	—	—
Taninos	+	+	++	++
Xantonas	++	+	++	—

* Abundancia relativa del compuesto en el extracto: (++) = moderada; (+) = baja; (–) = ausente.

De los siete grupos químicos de metabolitos secundarios analizados, en cada extracto solamente se detectaron flavonoides, taninos, xantonas, cumarinas y quinonas. La presencia de flavonoides, taninos y xantonas fue común en los dos EB. Las cumarinas se encontraron de manera exclusiva en el extracto de VD y las quinonas en el de MB. En ninguno de los dos EB se identificó la presencia de compuestos glucosídicos, pero tampoco de saponinas, lo cual es congruente al ser estas últimas derivadas de los primeros (García y Carril 2009).

A las 24 h de la preparación de los EB, la abundancia relativa de metabolitos secundarios fue moderada. En general, los flavonoides y las xantonas, además

de ser compuestos comunes, tuvieron abundancia similar tanto en MB como en VD; el contenido de taninos fue menor en MB y el de cumarinas en VD. De entre los compuestos identificados en los EB, la literatura especializada señala que las cumarinas son especialmente inhibidoras naturales del ciclo celular y sustancias promotoras de la senescencia en las plantas (Abenavoli et al. 2003).

La presencia de los metabolitos fue similar en ambos EB tras 72 h de su elaboración para flavonoides y taninos, mientras que la de xantonas fue menor en VD. En MB también se observó que la presencia de las quinonas disminuyó y en VD la de las cumarinas. Tanto los flavonoides como los taninos y las xantonas son compuestos hidrosolubles (Ferreira y Aquila 2000), lo cual facilita su dispersión en el suelo; sin embargo, esta característica tiene dos aspectos a resaltar: *i*) su estructura es más inocua para el ambiente al otorgarles una vida media corta y *ii*) esta corta persistencia pudiera no ser suficiente para que se manifieste su efectividad herbicida (Dorota et al. 2013; Motmainna et al. 2021).

Debido a los contrastes en la presencia y abundancia de los metabolitos secundarios identificados en los extractos acuosos de MB y VD, es posible esperar que cada tratamiento preparado a partir de estos EB (**Cuadro I**) posea diferente potencial herbicida.

Fitotoxicidad de los extractos botánicos sobre semillas de maíz

En el ensayo in vitro con semillas de maíz, después de 10 días de observación, la tasa de germinación, la longitud de la radícula y el tamaño del coleóptilo de

las plántulas tratadas con las mezclas de EB y atrazina resultaron similares a los del testigo (T01, 100 % agua) ($p > 0.05$, para los tres casos), al observarse que la germinación fue de 100 %, la longitud de la radícula de 0.9 a 2.4 cm y el tamaño del coleóptilo de 1.0 a 1.7 cm. Dada esta respuesta fisiológica, ninguno de los tratamientos influyó de forma negativa en la germinación o el desarrollo inicial de las plántulas de maíz (**Cuadro III**). Lopes et al. (2022) indican que la longitud de la radícula es el indicador más sensible de la acción de los aleloquímicos; sus estudios muestran que la toxicidad se manifiesta principalmente de forma cualitativa, visible en deformaciones de la raíz o tejidos necróticos. Aunque en esta investigación no se detectó ningún tipo de lesión en la radícula, es importante considerar que este tipo de efecto puede dar acceso a patógenos o enfermedades que afectan el crecimiento de las plantas (Lopes et al. 2022).

Control de arvenses en parcelas sin vegetación

La efectividad bioherbicida de los tratamientos en el control de malezas varió a lo largo de los cuatro muestreos ($p \leq 0.05$). Fue especialmente notable en los primeros tres (15, 30 y 45 dda) en comparación con el último (60 dda). Dichas diferencias fueron más visibles entre los tratamientos que incluyeron atrazina (AZ) en su formulación (T05 a T12), en los cuales se observó un alto porcentaje de maleza a los 60 dda respecto a los muestreos en fechas anteriores (15, 30 y 45 dda; **Fig. 1a**).

El análisis estadístico indicó que para el control de la maleza existió una interrelación entre el tratamiento

CUADRO III. EFECTO DE LOS TRATAMIENTOS SOBRE LA GERMINACIÓN Y EL DESARROLLO INICIAL DE PLÁNTULAS DE MAÍZ.

Clave del Tratamiento	Composición de la disolución	Germinación* (%)	Longitud de la radícula* (cm)	Tamaño del coleóptilo* (cm)
T01	100 % agua	100 ± 0.0	2.4 ± 0.4	1.6 ± 0.4
T02	100 % agua	86.7 ± 6.7	1.2 ± 0.2	1.7 ± 0.3
T03	100 % VD	93.3 ± 6.7	1.1 ± 0.2	1.4 ± 0.3
T04	1:1 MB:VD	100 ± 0.0	2.2 ± 0.8	1.0 ± 0.3
T05	3:1 MB:AZmin	80 ± 11.6	1.2 ± 0.3	1.4 ± 0.5
T06	3:1 VD:AZmin	86.7 ± 13.3	1.2 ± 0.3	1.4 ± 0.3
T07	100 % AZmax	100 ± 0.0	1.3 ± 0.2	1.2 ± 0.3
T08	100 % AZmin	86.7 ± 13.3	1.2 ± 0.2	1.1 ± 0.2
T09	3:1 MB: AZmax	100 ± 0.0	1.0 ± 0.2	1.7 ± 0.5
T10	3:1 VD: AZmax	93.3 ± 6.7	0.9 ± 0.2	1.5 ± 0.3
T11	1/3 AZmax	100 ± 0.0	1.8 ± 0.2	1.2 ± 0.3
T12	1/3 AZmax	93.3 ± 6.7	0.9 ± 0.2	1.4 ± 0.3

M. brownei: extracto acuoso de *M. brownei*; *V. dentata*: extracto acuoso de *V. dentata*; AZmin: atrazina, 1.0 kg/ha; AZmax: atrazina, 2.0 kg/ha.

*Los valores son el promedio ($n = 15$) ± el error estándar de la media.

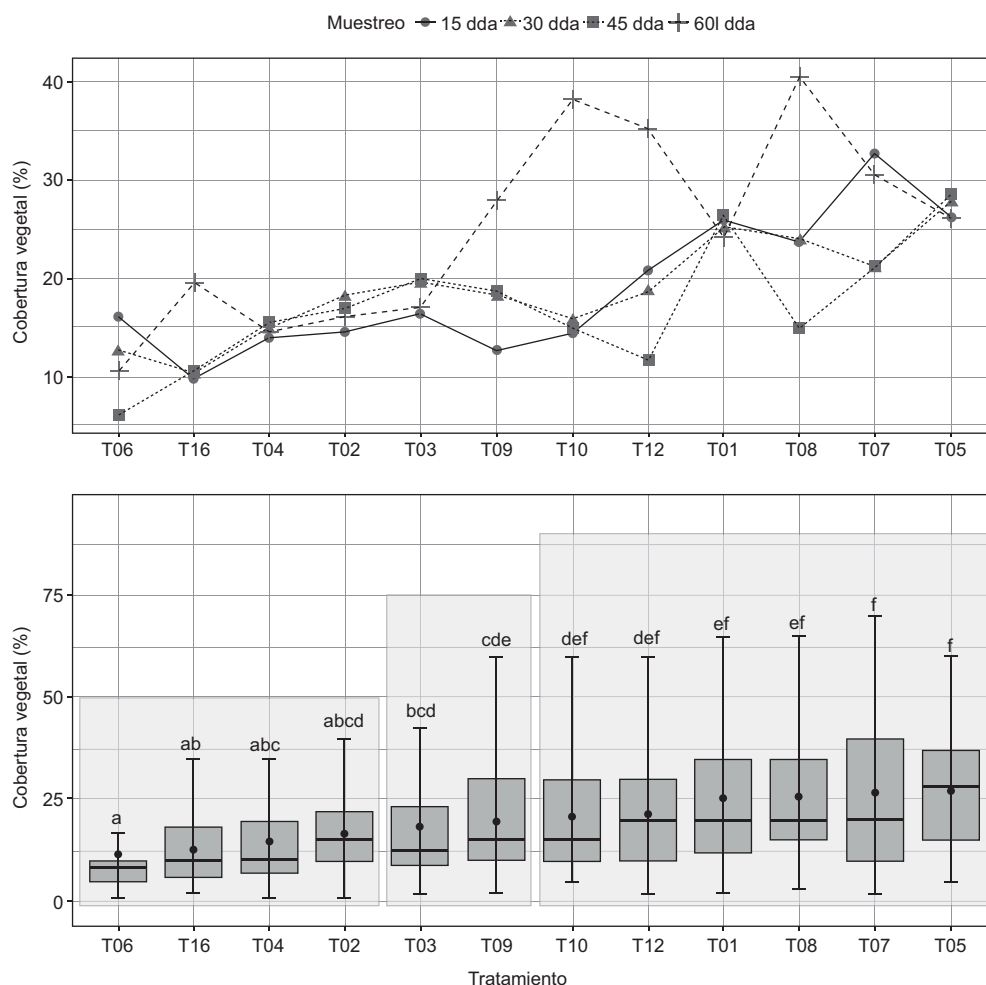


Fig. 1. (a) Cobertura vegetal de la maleza (%) por cada tratamiento evaluado a los 15, 30, 45 y 60 días después de su aplicación en las parcelas sin cultivo; (b) agrupación de los tratamientos en función de su efectividad para el control de la maleza. Las barras de error representan el error estándar de la media. Letras diferentes indican diferencias significativas (Tukey, $p < 0.05$). Tratamientos: T01, 100 % agua; T02: extracto 100 % VD; T3: extracto 100% MB; T04: disolución MB:VD 1:1 (v/v); T05: disolución MB:AZmin 3:1 (v/v); T06: disolución VD:AZmin 3:1 (v/v); T07: disolución 100% AZmax; T08: disolución 100 % AZmin; T09: disolución MB:AZmax 3:1 (v/v); T10: disolución VD:AZmax 3:1 (v/v); T11: disolución 1/3 AZmax; T12: disolución 1/3 AZmax. (MB: extracto acuso de *M. brownei*; VD: extracto acuso de *V. dentata*; AZmin: atrazina, 1.0 kg/ha; AZmax: atrazina, 2.0 kg/ha).

y el tiempo de contacto de éste con el suelo. Es decir, la capacidad herbicida de los tratamientos se ve afectada con el paso del tiempo, pero no de manera lineal (**Fig. 1a**). Al no ser compuestos estables, los componentes presentes en las disoluciones acuosas aplicadas como tratamientos sufren cambios con el paso del tiempo en función de su interacción con el medio, debido a procesos naturales de transformación y degradación. Dorota et al. (2013) indican que es común encontrar este tipo de respuesta debido a las modificaciones de los compuestos alelopáticos, a su

comportamiento, su persistencia y reacción a otros componentes presentes en la disolución en que se encuentran y a las interacciones con los componentes del suelo y el medio.

El desempeño de los tratamientos para el control de la maleza, considerando el promedio por tratamiento durante los cuatro eventos (15, 30, 45, y 60 dda), se puede dividir estadísticamente en tres grupos ($p \leq 0.05$). El primero, en el cual se observó un mejor control de arvenses con cobertura de 11.2 ± 1.1 a 16.5 ± 1.3 %, estuvo constituido por cuatro tratamientos:

T02 (100 % MB), T04 (1:1 MB:VD), T06 (3:1 VD:AZmin) y T11 (1/3 AZmax). El segundo grupo estuvo conformado por los tratamientos que ejercieron control intermedio (cobertura porcentual de 18.2 ± 1.3 a 19.5 ± 1.4 %) conformado por los tratamientos T03 (100 % VD) y T09 (3:1 MB:AZmax). Así, el tercer grupo estuvo conformado por los tratamientos T01 (100 % agua), T05 (3:1 MB:AZmin), T07 (100 % AZmax), T08 (100 % AZmin), T10 (3:1 VD:AZmax) y T12 (1/3 AZmin), los cuales ejercieron control de arvenses inferior al 20 %, con coberturas de 20.9 ± 1.4 a 27.2 ± 1.53 % (**Fig. 1b**).

Las diferencias en el control de la maleza por efecto de los EB puros de MB y VD, pudiera estar relacionado con el tipo y concentración de los metabolitos que los constituyen (**Cuadro II**). Por ejemplo, las diferencias en el control de la maleza entre extractos acuosos puros de MB (T02, 100 % MB) con 16.5 ± 1.3 % de cobertura y VD (T03, 100 % VD) con 18.5 ± 1.2 % pudieran atribuirse a que en el primero se detectó mayor cantidad de quinonas. Diversos estudios han indicado que las quinonas inhiben la germinación y el crecimiento de *Abutilon theophrasti*, *Amaranthus retroflexus*, *Echinochloa crusgalli*, *Digitaria sanguinalis* y *Setaria viridis*, especies identificadas como maleza (Li et al. 2021).

En la evaluación de tratamientos herbicidas en las parcelas sin cultivo, no hubo una correlación evidente entre el tipo de maleza predominante y el tratamiento herbicida aplicado. Es decir, no se pudo establecer que un tratamiento específico fuera selectivo para alguna especie en particular de maleza. Autores como Dorota et al. (2013) han indicado que las monocotiledóneas son plantas más resistentes a los aleloquímicos que las dicotiledóneas; sin embargo, en general en esta etapa en nuestro experimento las arvenses dominantes fueron de las familias Poaceae y Fabaceae en todas las parcelas, independientemente de tratamientos, y las especies con mayor abundancia relativa en comparación con otras especies fueron *Digitaria ischaemum*, *Senna tora* y *Sorghum halapense*.

Control de la maleza y efecto de los tratamientos sobre el desarrollo vegetativo del cultivo de maíz en campo

Los tratamientos elaborados con EB seleccionados para investigar el control de la maleza en campo en un cultivo de maíz fueron: T02 (100 % MB), T04 (1:1 MB:VD) y T06 (3:1 VD:AZmin), que mostraron mejor desempeño en el control de arvenses; T10 (3:1 VD:AZmax), con contenido de atrazina bajo, que mostró control de arvenses similar al testigo; T01, el tratamiento control

(100 % agua); T07, tratamiento con atrazina a dosis máxima (100 % AZmax), y T08, tratamiento con atrazina a dosis mínima (100 % AZmin). El control de arvenses de estos tratamientos a los 15, 30, 45 y 60 dda en las parcelas sembradas con maíz se presenta en la **figura 2a**.

Existió efecto de los tratamientos en el control de la maleza en las parcelas cultivadas con maíz. Además, hubo diferencias entre la cobertura vegetal observada para un mismo tratamiento según el tiempo de contacto del herbicida con el suelo, a los 15, 30, 45 y 60 dda. A través del análisis estadístico también se detectó un efecto significativo ($p \leq 0.05$) sobre el control de la maleza a partir de la interacción entre el tratamiento y el tiempo de contacto de los tratamientos con el suelo, fenómeno explicado por las transformaciones y degradación natural de los EB a través del tiempo.

La cobertura vegetal promedio de la maleza varió significativamente en los días 15, 30, 45 y 60 dda para un mismo tratamiento. La menor cobertura vegetal fue en el primer muestreo, 15 dda, cuando se registró 25.2 ± 2.1 % de la superficie de las parcelas cubiertas por maleza. A los 30 y 60 dda se detectó una superficie ocupada por arvenses de 49.2 ± 2.7 a 53.7 ± 3.1 %. El mayor porcentaje de cobertura vegetal se registró 45 después de haber aplicado los tratamientos (60.4 ± 2.9 %). El crecimiento de la maleza que se registró en este experimento es un comportamiento típico de arvenses anuales, las cuales después de alcanzar su máximo desarrollo en la floración empiezan su decaimiento (Batlla y Benech-Arnold 2014), como se observó en el muestreo a los 60 dda (**Fig. 2a**).

La eficacia de los tratamientos aplicados para el control de malezas en terrenos cultivados con maíz refleja los porcentajes de cobertura vegetal observados a los 15, 30, 45 y 60 dda. Por ejemplo, a los 60 días postaplicación, el porcentaje más bajo observado de cobertura vegetal fue del 17.3 % con el T07, que representa el tratamiento con mayor eficacia (82.7 %), mientras que valores intermedios y bajos se observaron con el T06 (49.1 % de cobertura, eficacia del 50.9 %) y el T02 (cobertura de 68.7 %, eficacia del 31.3 %). Después del análisis de medias post hoc se logró identificar a cinco grupos estadísticos según la eficiencia del tratamiento aplicado. El mejor control de la maleza se observó en las parcelas en que se aplicó atrazina a la máxima concentración recomendada (T07, 100 % ATZmax), en las cuales se cuantificó una cobertura de 14.8 ± 1.9 %. En segundo lugar de eficiencia estuvieron los tratamientos T10 (3:1 VD:AZmax) y T08 (100 % ATZmax), con cobertura de 30.7 ± 1.7 a 36.9 ± 2.5 %. El tercer lugar de eficiencia

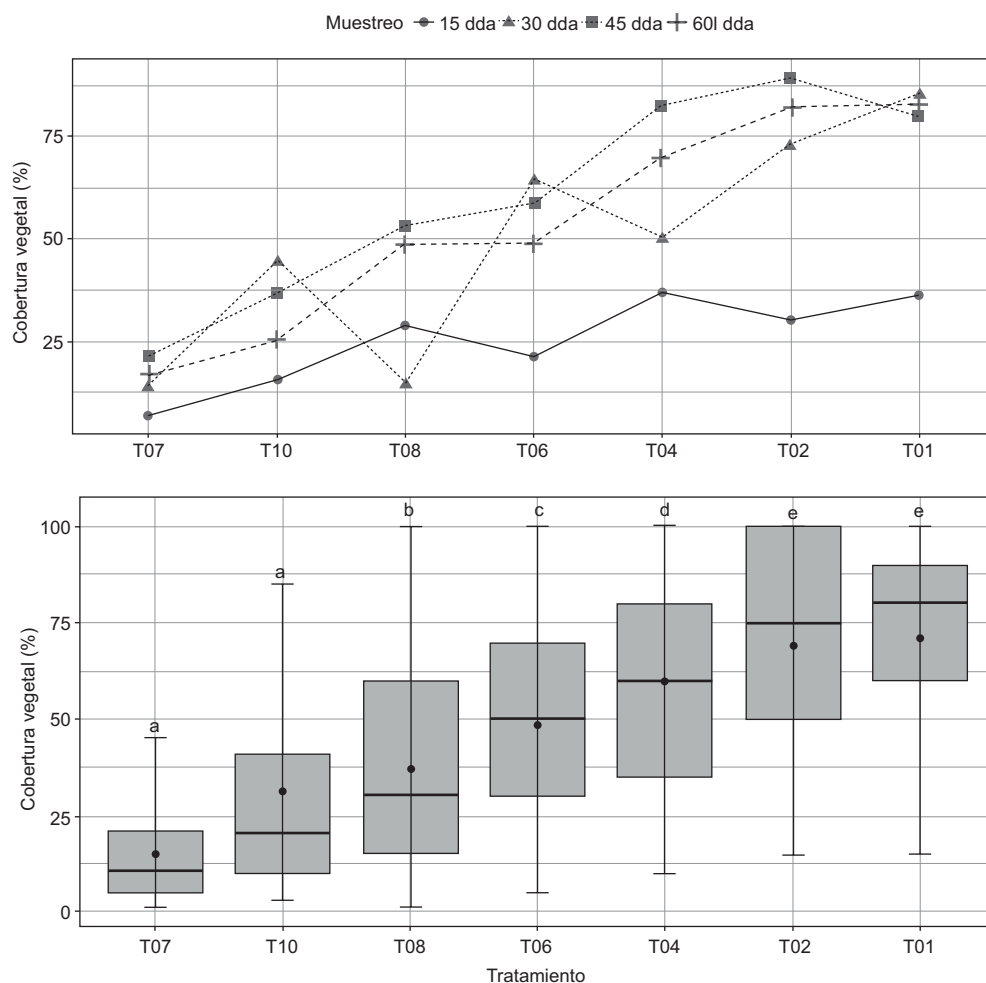


Fig. 2. (a) Cobertura vegetal de la maleza (%) por cada tratamiento evaluado a los 15, 30, 45 y 60 días después de su aplicación en las parcelas cultivadas con de maíz; (b) agrupación de los tratamientos en función de su efectividad para el control de la maleza. Las barras de error representan el error estándar de la media. Letras diferentes indican diferencias significativas (Tukey, $p < 0.05$). Tratamientos: T01, 100 % agua; T02: extracto 100 % VD; T04: disolución MB:VD 1:1 (v/v); T06: disolución VD:AZmin 3:1 (v/v); T07: disolución 100% AZmax; T08: disolución 100 % AZmin; T10: disolución VD:AZmax 3:1 (v/v). (MB: extracto acuso de *M. brownei*; VD: extracto acuso de *V. dentata*; AZmin: atrazina, 1.0 kg/ha; AZmax: atrazina, 2.0 kg/ha.

correspondió al T06 (3:1 VD:AZmin) con cobertura de 48.3 ± 1.8 %. El cuarto lugar fue para la parcela con el tratamiento T04 (1:1 MB:VD), en la cual se registró 59.8 ± 1.8 % de cobertura vegetal. El quinto grupo se compuso de los predios en que se aplicaron los tratamientos T02 (100 % MB) y T01 (100 % agua), en que la cobertura fue la mayor registrada para todos los tratamientos, fluctuando entre 68.7 ± 1.7 y 71.0 ± 1.7 % (**Fig. 2b**).

Los tratamientos de control de malezas evaluados fueron más efectivos en suelo desnudo que en terrenos cultivados con maíz. Cabe señalar que la Sociedad Europea para el Estudio de la Maleza

(European Weed Research Society, EWRS) indicó que coberturas superiores a 18 % corresponden a un nivel de eficacia del herbicida no adecuado (Burrill et al. 1977), porcentaje que únicamente se consiguió cuando los tratamientos se aplicaron a suelos sin cultivo. La participación de la microbiota presente en la rizosfera del maíz podría ser una de las razones que aceleraron el proceso de degradación de los metabolitos con potencial herbicida de los tratamientos aplicados. Al respecto, De Souza et al. (1998) encontraron que los microorganismos utilizan a la atrazina como fuente de nitrógeno; en este mismo sentido, Serafini et al. (2022) indicaron que la microbiota de

la rizosfera se ve beneficiada por la aplicación de atrazina, observando en sus estudios un aumento en la cantidad de microorganismos en suelos que tuvieron contacto con el herbicida.

La aplicación de fertilizante al suelo es un factor que podría explicar la mayor proliferación de maleza en las parcelas sembradas con maíz. El fertilizante no únicamente promueve el desarrollo del cultivo, sino que la maleza también se ve beneficiada por el aporte de nutrientes, además de ser fuente de alimentación para la microbiota del suelo, al introducir una fuente de nitrógeno más asimilable. Se pudo garantizar una mayor persistencia de atrazina en el suelo y por lo tanto se observó un incremento en la efectividad para el control de arvenses en la parcela en que se aplicó atrazina a la dosis máxima (T07, 100 % AZmax).

Sin embargo, existen otros factores a tomar en cuenta en la eficiencia de un bioherbicida cuando se realizan experimentos de campo. Uno de los más importantes es la influencia de elementos ambientales como la luz, el contenido de carbono, la temperatura, la humedad del suelo, la humedad relativa ambiental, la lluvia y el viento. Estos factores podrían impactar directamente la efectividad de los bioherbicidas al alterar la penetración de las raíces de las plantas y los mecanismos de traslocación, o indirectamente al modificar las características fisiológicas y de crecimiento de las plantas. Por ello la efectividad en el control de la maleza entre los experimentos de suelo desnudo y el ensayo con cultivo se pudo ver afectada significativamente por las diferencias estacionales en que se realizaron las mediciones, debido a que el primero se realizó antes del periodo sin lluvias, y el segundo después de éste.

No se detectó algún patrón distintivo de crecimiento de alguna especie o familia entre la maleza que creció en las parcelas sembradas con maíz. Arvenses de la familia Fabaceae fueron las dominantes en todas las parcelas experimentales. Las especies más abundantes, presentes en todas las parcelas experimentales, fueron *S. tora* y *Ballota nigra*, por lo que se puede decir que la aplicación de los tratamientos no fue un factor condicionante para el crecimiento y desarrollo de un determinado tipo de maleza.

En campo, al igual que en el experimento in vitro, no se detectaron diferencias en el porcentaje de germinación ($p > 0.05$). La totalidad de semillas sembradas en los siete casos (T01, T02, T04, T06, T07, T08 y T10) nacieron. Por otra parte, después de 45 dda de los tratamientos, se registraron diferencias ($p \leq 0.05$) en el tamaño de las plantas y la cantidad de hojas producidas. La mayor altura (50.4 ± 4.8 a 56.0 ± 3.8 cm) la alcanzaron las plantas de maíz que

se desarrollaron en las parcelas en las que se aplicaron los tratamientos T02 (100 % MB) y T10 (3:1 VD:AZmax), mientras aquellas en las que se aplicaron disoluciones compuestas de atrazina sola, ya sea a la concentración mínima (T08, AZmin) o máxima (T07, AZmax), presentaron el menor crecimiento (24.6 ± 1.4 a 25.8 ± 2.3 cm). Las plantas en que se aplicaron los tratamientos T04 (3:1 VD:AZmin) y T06 (3:1 VD:AZmin), así como el testigo T01 (100 % agua), tuvieron un crecimiento intermedio con alturas de 32.1 ± 3.5 a 43.0 ± 6.6 cm (**Fig. 3a**).

A los 45 días de la aplicación de los tratamientos, la cantidad de hojas producidas por las plantas de maíz alcanzó una diferencia de hasta cuatro hojas entre aquellas plantas que crecieron en la parcela en que se aplicó el T02 (100 % MB), con 11.4 ± 0.5 hojas, y las de las parcelas tratadas con el testigo T01 (100 % agua), que produjeron 7.3 ± 0.4 hojas. El resto de los tratamientos tuvieron diferencias de menor grado: entre el T04 (1:1 MB:VD) y el T06 (3:1 VD:AZmin) la diferencia fue de alrededor de tres hojas, y para las plantas que crecieron en los terrenos en que se aplicaron los tratamientos T07 (100 % AZmax), T08 (100 % AZmin) y T10 (3:1 VD:AZmax), el número de hojas fluctuó entre 7.8 ± 0.5 y 9.4 ± 0.9 (**Fig. 3b**). La importancia de la cantidad de hojas producidas por las plantas de maíz radica en su capacidad para realizar actividades fisiológicas como transpiración, respiración y fotosíntesis. Una reducción en el número de hojas se refleja directamente en el rendimiento del cultivo. Estos resultados indican que existió un efecto positivo de los EB sobre el desarrollo vegetativo de las plantas de maíz, mientras que se tuvo una respuesta fisiológica negativa de las plantas a los tratamientos en cuya formulación había atrazina.

La aplicación de EB en combinación con dosis reducidas de plaguicidas de síntesis química ha resultado una práctica adecuada para el control de arvenses, además de favorecer el desarrollo y rendimiento de los cultivos. Se han probado extractos botánicos de sorgo, girasol, mostaza y morera blanca solos o en mezclas, con dosis reducidas de los herbicidas químicos bromoxinil (3,5-dibromo-4-hidroxibenzonitrilo) (Iqbal et al. 2010), mesosulfuron [Metil 2-(4-metoxi-6-metil-1,3,5-triazin-2-ilcarbamoilsulfamoil)benzoato] + idosulfuron [(5-yodo-2-(metoxicarbonil)fenil)sulfonil]carbamoil(4-metoxi-6-metil-1,3,5-triazin-2-il)azanida de sodio] (Mahmood et al. 2013) y atrazina (Ihsan et al. 2015) en cultivos de trigo y de maíz, con los que se obtuvo un control efectivo de la maleza con beneficios en el desarrollo de los cultivos. Esta combinación de beneficio a los cultivos en

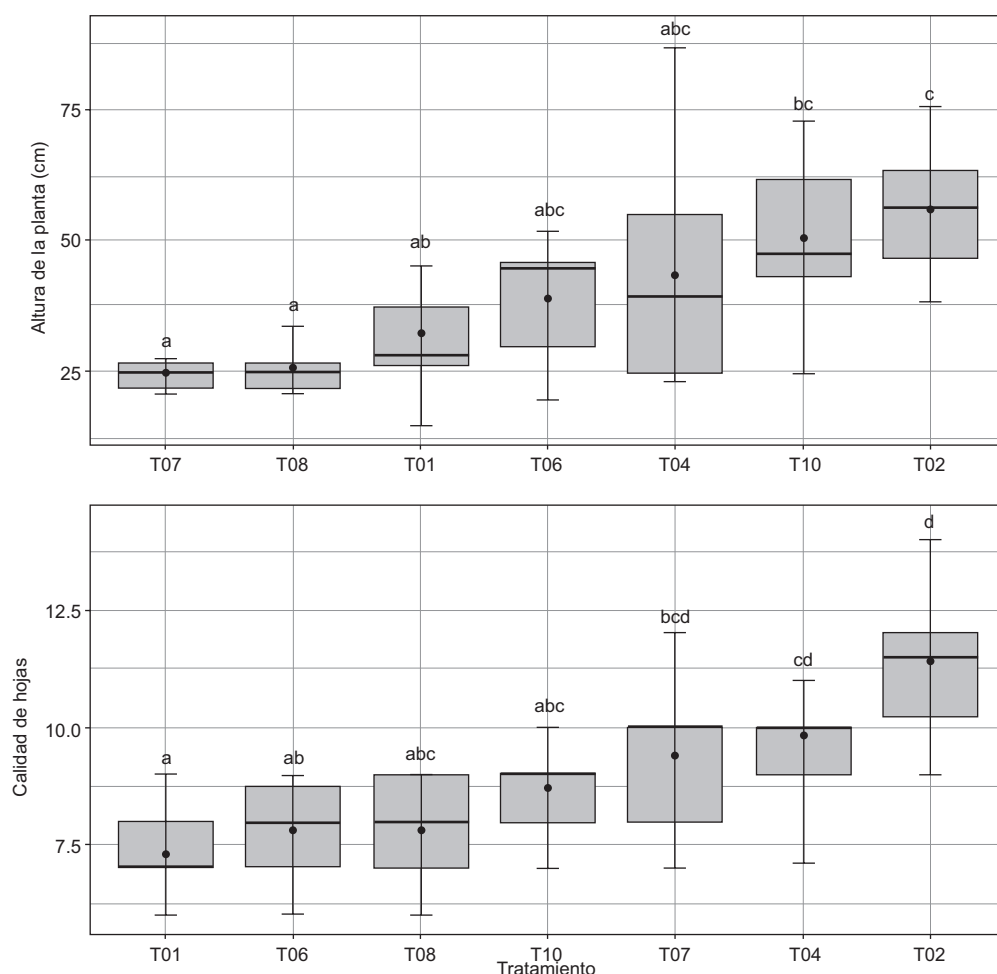


Fig. 3. (A) Altura y (b) cantidad de hojas de las plantas de maíz 45 días después de la aplicación de los tratamientos. Las barras de error representan el error estándar de la media. Letras diferentes indican diferencias significativas (Tukey, $p < 0.05$). Tratamientos: T01, 100 % agua; T02: extracto 100 % VD; T04: disolución MB:VD 1:1 (v/v); T06: disolución VD:AZmin 3:1 (v/v); T07: disolución 100% AZmax; T08: disolución 100 % AZmin; T10: disolución VD:AZmax 3:1 (v/v). (MB: extracto acuoso de *M. brownei*; VD: extracto acuoso de *V. dentata*; AZmin: atrazina, 1.0 kg/ha; AZmax: atrazina, 2.0 kg/ha.

cuanto al control de la maleza y mejoras fisiológicas en las plantas se observó en las parcelas en las que se aplicó el tratamiento T10 formulado con el extracto de VD y atrazina en relación 3:1 (v/v), lo que ofrece una reducción en la aplicación de atrazina de 75 % respecto de la dosis máxima recomendada, además de promover el desarrollo vegetativo del maíz.

CONCLUSIONES

La efectividad de los herbicidas sintéticos en el control de malezas superó a la de los extractos botánicos; sin embargo, los resultados de la investigación

son concluyentes: el uso de extractos de plantas con capacidad alelopática puede contribuir al control de malezas y favorecer el desarrollo fisiológico de los cultivos de interés agronómico, lo que permitiría disminuir tanto los costos económicos como los impactos ambientales.

Se evaluaron 12 tratamientos constituidos por extractos botánicos elaborados a partir de *V. dentata* y *M. brownie* solos o mezclados entre sí o con el herbicida de síntesis química atrazina. El tratamiento que presentó mejor resultado fue el elaborado con extractos botánicos acuosos de *V. dentata* y atrazina, en dosis de aplicación de 2 kg/ha con en relación 3:1 (v/v). Esta formulación tuvo efecto inhibitor de

la maleza sin afectar la germinación y contribuyó a incrementar tanto la altura de las plantas de maíz como la cantidad de hojas producidas, lo cual indica que este tratamiento es una alternativa viable para el control de la maleza en el cultivo de maíz y permite la reducción del uso de atrazina.

REFERENCIAS

- Abenavoli M.R., Sorgona A., Sidari M., Badiani M. y Fuggi A. (2003). Coumarin inhibits the growth of carrot (*Daucus carota* L. cv. Saint Valery) cells in suspension culture. *Journal of Plant Physiology* 160 (3), 227-237. <https://doi.org/10.1078/0176-1617-00867>
- Anaya A.L., Mata R., Rivero-Cruz F., Hernández-Bautista B.E., Chávez-Velasco D. y Gómez-Pompa A. (1999). Allelochemical potential of *Metopium brownei*. *Journal of Chemical Ecology* 25, 141-156. <https://doi.org/10.1023/A:1020845318284>
- Batlla D. y Benech-Arnold R.L. (2014). Weed seed germination and the light environment: Implications for weed management. *Weed Biology and Management* 14 (2), 77-87. <https://doi.org/10.1111/wbm.12039>
- Benvenuti S., Cioni P.L., Flamini G. y Pardossi A. (2017). Weeds for weed control: Asteraceae essential oils as natural herbicides. *Weed Research* 57 (5), 342-353. <https://doi.org/10.1111/wre.12266>
- 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, 64 pp.
- Cerda H., Carpio C., Ledezma-Carrizalez A.C., Sánchez J., Ramos L., Muñoz-Shugulí C. y Chiurato M. (2019). Effects of aqueous extracts from amazon plants on *Plutella xylostella* (Lepidoptera: Plutellidae) and *Brevicoryne brassicae* (Homoptera: Aphididae) in laboratory, semifield, and field trials. *Journal of Insect Science* 19 (5), 8. <https://doi.org/10.1093/jisesa/iez068>
- Cheng F. y Cheng F. (2015). Research progress on the use of plant allelopathy in agriculture and the physiological and ecological mechanisms of allelopathy. *Frontiers in Plant Science* 6, 1020. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.01020>
- De Souza M.L., Newcombe D., Alvey S., Crowley D.E., Hay A., Sadowsky M.J. y Wackett L.P. (1998). Molecular basis of a bacterial consortium: Interspecies catabolism of atrazine. *Applied and Environmental Microbiology* 64 (1), 178-184. <https://doi.org/10.1128/AEM.66.3.1252-1252.2000>
- Dorota S., Urszula K., Renata B. y Agnieszka G. (2013). Allelochemicals as bioherbicides – Present and perspectives. En: *Herbicides – Current research and case studies in use* (Andrew J.P. y Jessica A.K., Eds.) IntechOpen Limited, Londres, Reino Unido, 517-542. <https://doi.org/10.5772/56185>
- Farooq O., Atique-Ur-Rehman, Sarwar N., Hussain M., Wasaya A., Naeem M., Iqbal M. M. y Khaliq A. (2018). Herbicidal potential of sorghum and brassica against the weeds of cotton. *Planta Daninha* 36, 1-6. <https://doi.org/10.1590/S0100-83582018360100144>
- Ferreira A.G. y Aquila M.E.A. (2000). Allelopathy: An emerging topic in ecophysiology. *Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal* 12, 175-204.
- García A.Á. y Carril E.P.U. (2009). Metabolismo secundario de plantas. *Reduca (Biología) Serie Fisiología Vegetal* 2 (3), 119-145.
- Hasan M., Ahmad-Hamdani M.S., Rosli A.M. y Hamdan H. (2021). Bioherbicides: An eco-friendly tool for sustainable weed management. *Plants* 10 (6), 1212. <https://doi.org/10.3390/plants10061212>
- Ihsan M.Z., Khaliq A., Mahmood A., Naeem A., El-Nakhlawy F. y Alghabari F. (2015). Field evaluation of allelopathic plant extracts alongside herbicides on weed management indices and weed-crop regression analysis in maize. *Weed Biology and Management* 15 (2), 78-86. <https://doi.org/10.1111/wbm.12070>
- Iqbal J., Karim F. y Hussain F. (2010). Response of wheat crop (*Triticum aestivum* L.) and its weeds to allelopathic crop water extracts in combination with reduced herbicide rates. *Pakistan Journal of Agricultural Sciences* 47 (3), 309-316.
- Johnson D., Norsworthy J. y Scott R. (2014). Distribution of herbicide-resistant johnsongrass (*Sorghum halepense*) in Arkansas. *Weed Technology* 28, 111-121. <https://doi.org/10.1614/WT-D-13-00093.1>
- Khan I. y Khan M. I. (2015). Técnicas ecológicas de control de malezas (extracto alelopático) en el cultivo de trigo. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 6 (6), 1307-1316.
- Labrada R., Caseley J.C. y Parker C. (1996). Manejo de malezas para países en desarrollo, vol. 120. Food and Agriculture Organization (FAO), Roma, Italia, 403 pp.
- LeBaron H.M., McFarland J.E. y Burnside O. (2008). The triazine herbicides: A milestone in the development of weed control technology. En: *The triazine herbicides 50 years revolutionizing agriculture* (LeBaron H.M., McFarland J.E. y Burnside O.C., Eds.), Elsevier, Ámsterdam, Países Bajos, 1-12.
- Li J., Chen L., Chen Q., Miao Y., Peng Z., Huang B. y Du H. (2021). Allelopathic effect of *Artemisia argyi* on the germination and growth of various weeds. *Scientific Reports* 11, 4303. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-83752-6>

- Lopes R.W.N., Marques M.E., Lacerda J.J.d.J. y Araújo F.D.d.S. (2022). Bioherbicidal potential of plant species with allelopathic effects on the weed *Bidens bipinnata* L. *Scientific Reports* 12, 13476. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-16203-5>
- Mahmood A., Rashid A., Ali M.A. y Waqar M.Q. (2013). Efficacy of aqueous extracts of different allelopathic plants combined with reduced herbicide doses for weed control in wheat. *Journal of Agricultural Research* 51 (4), 399-410.
- Mahmood I., Imadi S., Shazadi K., Gul A. y Hakeem K. (2016). Effects of pesticides on environment. En: *Plant, soil and microbes* (Hakeem K., Akhtar M. y Abdullah S., Eds.), Springer, Nueva York, EUA, 253-269. https://doi.org/10.1007/978-3-319-27455-3_13
- Motmainna M., Juraimi A.S., Uddin M.K., Asib N.B., Islam A.K.M.M. y Hasan M. (2021). Assessment of allelopathic compounds to develop new natural herbicides: A review. *Allelopathy Journal* 52 (1), 21-40. <https://doi.org/10.26651/allelo.j/2021-52-1-1305>
- Muller C.H. (1969). Allelopathy as a factor in ecological process. *Vegetatio* 18, 348-357.
- R Core Team (2020). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria [en línea]. <https://www.R-project.org/> 20/12/2020
- Raper T.B., McClure M.A., Butler S., Yin X. y Blair R. (2019). Impacts of single- and multiple-species cover crop on soybean relative to the wheat-soybean double crop system. *Crop, Forage & Turfgrass Management* 5, 1-9. <https://doi.org/10.2134/cftm2018.12.0104>
- Rufai Y. (2016). Comparative phyto-constituents analysis from the root bark and root core extractives of *Cassia ferruginea* (Schrad D. C.). *Scholars Journal of Agriculture and Veterinary Sciences* 3 (4), 275-283. <https://doi.org/10.21276/sjavs.2016.3.4.1>
- Serafini C.G., Clerici N.J., Della-Flora I.K., Dupont G.K., da Costa Cabrera L. y Daroit D.J. (2022). Effects of atrazine on soil microbial indicators and the evaluation of herbicide attenuation in microcosms. *Journal of Soils and Sediments* 22, 1165-1175. <https://doi.org/10.1007/s11368-021-03121-8>