

## CAPÍTULO 23

# Acción de los herbicidas en un arrozal: Modo y mecanismo

*Jairo Clavijo*

### Contenido

	Página
Resumen	431
Abstract	432
Introducción	432
Acción de los herbicidas usados en arroz	433
Inhibidores de la acetil-CoA carboxilasa (ACC-asa)	433
Inhibidores de la acetolactato sintasa (ALS)	435
Inhibidores del fotosistema II	437
Captador de electrones del fotosistema I	439
Inhibidores de la protoporfirinógeno oxidasa (PPO)	440
Inhibidor de la síntesis de carotenoides	441
Inhibidor de la EPSP sintasa	441
Inhibidores de la formación de microtúbulos	442
Inhibidores de la síntesis de ácidos grasos de cadena larga	443
Inhibidores de la síntesis de lípidos (no ACC-asa)	444
Auxinas sintéticas	444
Referencias bibliográficas	445

### Resumen

Se describen el modo y el mecanismo de acción de los herbicidas en el cultivo del arroz: inhibidores de la acetil-CoA carboxilasa (ACC-asa); de la acetolactato sintasa (ALS); del fotosistema II; captador de electrones del fotosistema I (paraquat); inhibidores de la protoporfirinógeno oxidasa (PPO); de la síntesis de carotenoides; de la EPSP sintasa; de la formación de microtúbulos; de la síntesis de ácidos grasos de cadena larga; de la síntesis de lípidos (no ACC-asa), y de las auxinas sintéticas. Se señala que el arroz es actualmente el cultivo que emplea el mayor número de herbicidas y el que consume la mayor cantidad de kilos de ingrediente activo por hectárea, entre los cultivos anuales en Colombia. En el país se aplican estos productos desde antes de la siembra, como 'quemantes', hasta la etapa de máximo macollamiento del cultivo, o 'aplicación postardía'. Este uso intensivo de productos agroquímicos —que implica, en algunos casos, el empleo de seis herbicidas en cinco aplicaciones (dos 'quemadas', un 'sello' y dos aplicaciones en posemergencia)— puede

llegar a utilizar, en serie, varios ingredientes activos que tengan el mismo mecanismo de acción, creando así una alta presión de selección entre los biotipos de malezas. Además, este tipo de manejo representa entre el 18% y el 20% del costo de producción del cultivo.

## Abstract

### Action mode and mechanism of herbicides in rice fields

The action mode and mechanism of herbicides in rice crops are described, specifically inhibitors of acetyl-CoA carboxylase (ACC); acetolactate synthase (ALS); photosystem II; photosystem I electron acceptor (paraquat); protoporphyrinogen oxidase (PPO); carotenoid synthesis; EPSP synthase; microtubule formation; synthesis of long-chain fatty acids; lipid synthesis (no ACC); and synthetic auxins. Among the annual crops planted in Colombia, rice is currently the crop that uses the largest number of herbicides and the one that consumes the highest number of kiloliters of active ingredient per hectare. Products are applied prior to planting (burn-down) through the crop's maximum tillering stage (late postemergence). In some cases, this intensive use of agrochemical products implies the use of six herbicides in five applications (two burn-out herbicides, one sealer, and two postemergence applications). Several active ingredients with the same action mechanism can even be used, creating a high selection pressure among weed biotypes. Furthermore, this type of management accounts for 18%-20% of the crop's production costs.

## Introducción

La acción fitotóxica total de un herbicida puede separarse en dos procesos bien diferenciados:

- **Modo de acción.** Se define como la suma de las respuestas anatómicas, fisiológicas y bioquímicas que dan lugar al efecto fitotóxico del agroquímico, es decir, la absorción, la traslocación y el metabolismo del producto en la planta.
- **Mecanismo de acción.** Comprende la acción bioquímica o biofísica primaria que conduce a la muerte de la planta; es decir, el efecto causado en una enzima o en una reacción metabólica simple (el sitio de acción) por la concentración más baja del herbicida o por cualquier concentración en el menor tiempo después de la aplicación.

El Comité de Acción sobre la Resistencia a los Herbicidas (HRAC, sus siglas en inglés) acoge actualmente sólo la

expresión 'modo de acción' para referirse a los dos procesos mencionados; clasifica, además, los herbicidas alfabéticamente en tres listados: según su modo y sitio de acción, según la semejanza de los síntomas de su acción en la planta y según su familia química.

Entre los cultivos anuales de Colombia, el arroz es, actualmente, el que emplea el mayor número de herbicidas y el que consume la mayor cantidad de kilolitros de ingrediente activo por hectárea. Se aplican en el país estos productos desde antes de la siembra, como 'quemantes', hasta la etapa de máximo macollamiento del cultivo, como la comúnmente denominada aplicación 'postardía'.

Las malezas gramíneas y ciperáceas tienen una gran capacidad competitiva, que se manifiesta en su tasa alta de emergencia y en su rápido desarrollo inicial; su manejo, por tanto, debe ser *integral* y requiere una *planeación* especial. Si no actúa de este modo, el cultivador tiene que depender de la

solución rápida y efectiva, basada en la aplicación de herbicidas preemergentes y posemergentes que, a veces, es intensiva para poder contrarrestar la competencia que hacen las malezas al cultivo. Por otra parte, la presencia del arroz rojo en la mayoría de las zonas arroceras de monocultivo hace necesaria la aplicación de herbicidas no selectivos a poblaciones de malezas inducidas por el riego anterior a la siembra del arroz. Se hacen, además, mezclas de herbicidas posemergentes para resolver problemas específicos de malezas que no fueron controladas por los tratamientos antes mencionados.

Este *uso intensivo* de productos agroquímicos —que implica, en algunos casos, el empleo de seis herbicidas en cinco aplicaciones (dos ‘quemadas’, un ‘sello’ y dos aplicaciones en posemergencia)— puede llegar a utilizar, en serie, varios ingredientes activos que tengan el mismo mecanismo de acción, creando así una alta *presión de selección* entre los biotipos de malezas. Ahora bien, este tipo de manejo representa del 18% al 20% del costo de producción del cultivo.

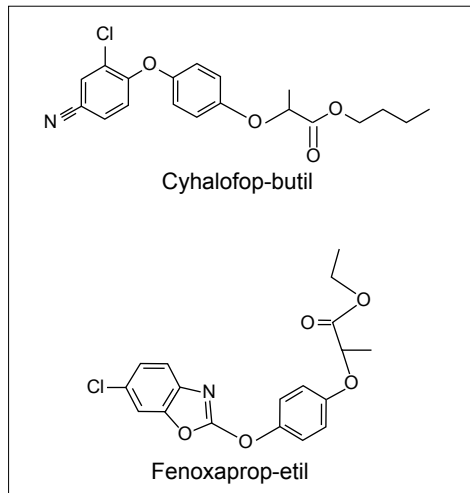
## Acción de los herbicidas usados en arroz

### Inhibidores de la acetil-CoA carboxilasa (ACC-asa)

Los ariloxi-fenoxy-propionatos (APP) y las ciclo-hexana-dionas (CHD) son dos grupos químicos que han dado posemregentes que controlan especies de gramíneas en los cultivos de cereales y de dicotiledóneas. Aunque la química de estos dos grupos difiere sustancialmente, su actividad fisiológica y bioquímica en la planta indica que deben tener elementos estructurales comunes que son responsables de su acción herbicida.

- Los APP se formulan como ésteres del ácido original (ácido padre) para facilitar su absorción por las hojas. Después de penetrar en el tejido foliar, el éster es hidrolizado y el ácido padre queda libre. En general, los APP son herbicidas lipofílicos y no poseen la alta movilidad simplástica (paso de un ión de célula a célula mediante plasmodesmos) de los ácidos débiles; sin embargo, dos de ellos, el cyhalofop-butil y el fenoxaprop-etil (Figura 1) son absorbidos rápidamente por el follaje de las plantas y traslocados a los tejidos meristemáticos, donde ejercen su acción fitotóxica. En su mayoría, los herbicidas de este grupo tienen las siguientes características:

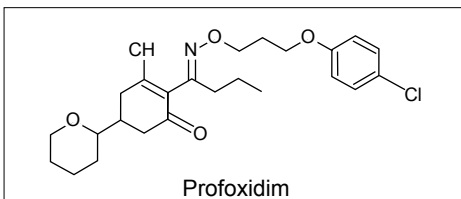
- son descompuestos por microorganismos, especialmente bajo condiciones aeróbicas;
- tienen baja movilidad y poca o ninguna actividad en el suelo;
- la vida media del fenoxaprop-etil, por ejemplo, es de 9 días bajo



**Figura 1.** Dos ingredientes activos del grupo químico APP empleados como herbicidas en posemergencia.

- condiciones aeróbicas y de 30 días en condiciones anaeróbicas;
- son incompatibles (por antagonismo) con los herbicidas hormonales y con las sulfonilureas; se recomienda, por tanto, aplicar estos últimos productos 7 días antes o 7 días después de la aplicación de un APP.
- Las CHD son ácidos débiles y muy móviles por el floema; algunas de ellas son muy inestables y están expuestas a una fotólisis rápida. No son persistentes en el suelo y la acción de los microorganismos las descompone fácilmente. Su vida media varía entre 3 y 5 días. La que se usa como ingrediente activo para controlar malezas en arrozales es el profoxidim o clefoxidim (Figura 2).

Los **efectos morfológicos** de estos dos grupos químicos en las plantas se aprecian principalmente en los meristemas, tanto los apicales como los intercalares: en ambos se detiene el crecimiento rápidamente después de la aplicación de los productos. Las hojas que emerjan se verán cloróticas al principio y más adelante tendrán apariencia necrótica y se desprenderán fácilmente del punto de inserción. Estos síntomas se desarrollan lentamente. Los dos grupos son graminicidas típicos y se conocen como ‘fops’ (los APP) y como ‘dims’ (las CHD). Se denominan también ‘inhibidores de la síntesis de lípidos’.



**Figura 2.** Ingrediente activo del grupo de las CHD empleado como herbicida en el cultivo del arroz.

### Mecanismos de acción

Se han propuesto dos mecanismos para estos dos grupos de herbicidas:

- Un **mecanismo bioquímico**, que consiste en la inhibición de la enzima acetil-CoA carboxilasa (ACC-asa) y, por consiguiente, de la biosíntesis de lípidos en los plastidios. Ahora bien, la biosíntesis de los ácidos grasos y de los lípidos es esencial para el crecimiento y el desarrollo de las plantas; esta biosíntesis se inicia con la síntesis de la malonil-CoA a partir del acetil-CoA, la cual es catalizada por la enzima acetil-CoA carboxilasa.
- Un **mecanismo biofísico**, que altera el gradiente de protones que se establece a través de la membrana plasmática. El gradiente ocurre gracias a la acción de una bomba electrogénica de protones, que es manejada por la hidrólisis del ATP (tanto en el plasmalemma como en el tonoplasto), que facilita el transporte activo de solutos orgánicos e inorgánicos a través de las membranas dichas, y que participa, además, en la regulación del pH intracelular.

De estos dos mecanismos de acción, el primero (inhibición de la ACC-asa) está mejor caracterizado por los ensayos *in vitro* que se han hecho y por la correlación observada entre la planta *in vivo* y la sensibilidad de la enzima. Se cree también que estos dos efectos (el bioquímico y el biofísico) ocurren, probablemente, de manera simultánea, al menos durante las primeras 12 horas después de la aplicación del herbicida. Por otra parte, el antagonismo de los compuestos auxínicos a la fitotoxicidad de los APP no implica una interacción con la ACC-asa sino más bien una asociación entre esos compuestos y algún estímulo de la actividad de la H<sup>+</sup>-ATP-asa, que altera el gradiente de protones de la membrana plasmática, disminuyéndolo.

## Resistencia

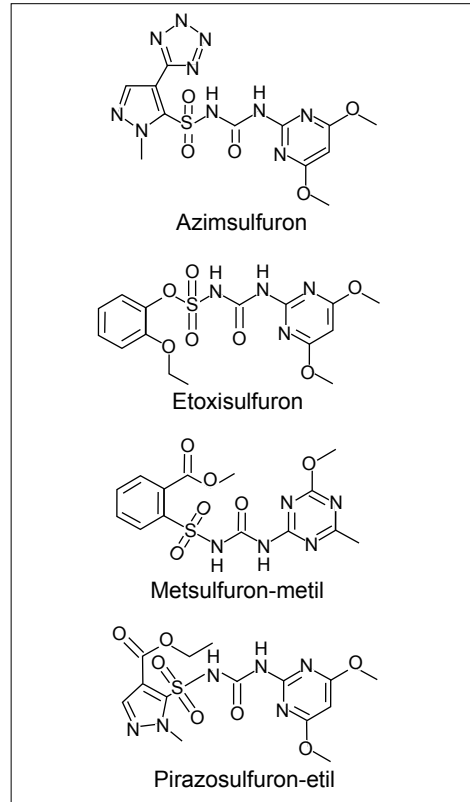
Puesto que los ariloxi-fenoxi-propionatos y las ciclo-hexana-dionas controlan gramíneas solamente, la resistencia a estos dos herbicidas se desarrolla en especies pertenecientes a ese grupo de plantas. De todos los biotipos resistentes de que se ha recibido información, 12% lo son por el uso repetido que se ha hecho de ambos herbicidas durante años. Estos biotipos resistentes se encuentran, por ejemplo, en las especies *Avena fatua*, *Digitaria sanguinalis*, *Echinochloa* spp., *Eleusine indica*, *Ischaemum rugosum*, *Lolium* spp. y *Sorghum halapense*.

## Inhibidores de la acetolactato sintasa (ALS)

Los inhibidores de la acetolactato sintasa pertenecen a cinco grupos químicos, pero los productos que se comercializan en Colombia contra las malezas del cultivo del arroz pertenecen a tres de ellos solamente: sulfonilureas, imidazolinonas y pirimidinil-tiobenzoatos. Su popularidad se debe a las siguientes características: se usan en dosis bajas, su impacto ambiental es bajo, la toxicidad que causan a los mamíferos es leve y su eficacia es grande.

### Sulfonilureas

A este grupo pertenecen los siguientes ingredientes activos: azimsulfuron, etoxisulfuron, metsulfuron-metil y pirazosulfuron-etil (Figura 3). En general, estos herbicidas se aplican en posemergencia, aunque algunos se pueden recomendar en preemergencia para el control selectivo de malezas de hoja ancha y de ciperáceas. Las hojas y las raíces de las malezas los absorben fácilmente y el xilema los trasloca ampliamente cuando la absorción es radical; la traslocación tiene menor alcance por el floema cuando la aplicación es foliar. Las sulfonilureas se acumulan en los tejidos meristemáticos.



**Figura 3.** Cuatro productos herbicidas pertenecientes al grupo químico de las sulfonilureas, que inhiben la enzima ALS.

**Síntomas.** El crecimiento de las plantas se inhibe pocas horas después de su aplicación, aunque los síntomas de fitotoxicidad aparecen de 1 a 2 semanas más tarde. Estos síntomas son, principalmente: clorosis de las áreas meristemáticas y de las hojas jóvenes, malformación de las hojas, aumento de la síntesis de antocianinas y muerte de tejidos (necrosis).

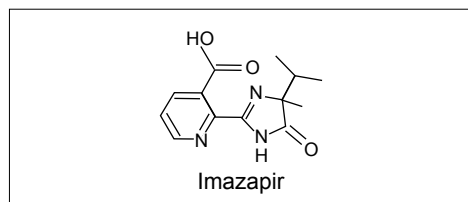
**Degradación.** En la planta, las sulfonilureas son metabolizadas por hidroxilación del anillo bencénico en el carbono 4, seguida de conjugación con glucosa. En el suelo se degradan por hidroxilación y por acción microbiana.

Las sulfonilureas son también adsorbidas por la materia orgánica del suelo, principalmente a pH bajo. La persistencia de estos herbicidas varía de pocos días a 40 días (si el pH del suelo es alto).

### Imidazolinonas

Este grupo está representado por el ingrediente activo imazapir (Figura 4) que, junto con la variedad de arroz CF-205, conforma un sistema de control de malezas registrado por BASF y denominado 'clearfield' (campo limpio). El imazapir se puede aplicar desde la preemergencia hasta cuando las malezas y el arroz rojo tengan cuatro hojas en posemergencia y el arroz del sistema 'clearfield' (CF-205) tenga cuatro hojas. Este producto se puede aplicar únicamente a la variedad de arroz 'Clearfield®'.

**Síntomas.** El imazapir puede ser absorbido por el follaje o por las raíces en un periodo de 24 horas y se trasloca rápidamente por el floema o el xilema. El producto inhibe el crecimiento de las malezas pocas horas después de su aplicación, pero los síntomas de fitotoxicidad sólo aparecen de 1 a 2 semanas más tarde. Las áreas meristemáticas de la planta afectada se tornan gradualmente cloróticas, y la clorosis se extiende luego lentamente en las hojas que, finalmente, mueren (necrosis foliar).



**Figura 4.** Imazapir, un herbicida del grupo de las imidazolinonas, empleado en el sistema de manejo de malezas 'clearfield' de la BASF.

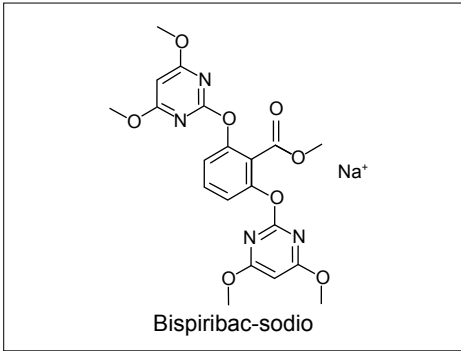
**Degradación.** En las plantas, el imazapir puede ser metabolizado por hidroxilación del anillo bencénico para formar el ácido 2-carbamoilnicotínico y, posteriormente, un derivado del ácido, el imidazo-pirrolopiridino. En el suelo, el producto es degradado por los microorganismos, especialmente bajo condiciones aeróbicas; también se une fuertemente a la materia orgánica. Si el suelo está seco, el producto es adsorbido por las partículas del suelo, pero si está húmedo, queda libre y es entonces degradado o tomado por las plantas. Si el pH es menor que 6.5, el imazapir es fuertemente adsorbido por la arcilla y por la materia orgánica; si el pH es mayor que ese valor, el producto es fácilmente degradado por los microorganismos. Tiene poca movilidad en el suelo y su vida media varía de 25 a 142 días, lo que depende de las condiciones del suelo.

### Pirimidinil-tiobenzoatos

A este grupo pertenece el bispiribac-sodio, un herbicida posemergente que controla una amplia gama de malezas gramíneas, ciperáceas, commelináceas y dicotiledóneas que aparecen en el cultivo de arroz.

**Síntomas.** El bispiribac-sodio es absorbido fácilmente por el follaje y por las raíces y se trasloca por el floema y por el xilema. Las malezas sensibles al producto suspenden su crecimiento, se vuelven cloróticas, sus tejidos jóvenes mueren (necrosis) y, finalmente, la planta muere.

**Degradación.** El bispiribac-sodio (Figura 5) es metabolizado por hidrólisis dentro de la planta y es degradado por microorganismos en el suelo. Presenta una movilidad entre media y baja, lo que depende del tipo de suelo y de su cantidad de materia orgánica. Tiene una vida media entre 45 y 60 días, según las condiciones del medio.



**Figura 5.** Un herbicida del grupo químico de los pirimidinil-tiobenzoatos que inhibe la ALS en las malezas que controla.

### Mecanismo de acción

Los compuestos anteriormente mencionados comparten un mismo sitio de acción en la planta, que es la enzima acetolactato sintasa (ALS); ésta es la primera enzima común en la biosíntesis de los aminoácidos valina, leucina e isoleucina. Se la conoce también como acetohidroxiácido sintasa (AHAS), cuando se localiza en el cloroplasto. Se han aislado tres isoenzimas, de las cuales la más sensible es la ALS II, que tiene capacidad para condensar dos moléculas de piruvato formando el acetolactato (el precursor de la valina y la leucina), y para unir una molécula de piruvato con una de ketobutirato, formando así el acetohidroxibutirato (el precursor de la isoleucina).

### Resistencia

La actividad residual de muchos de los inhibidores de ALS aquí mencionados ha contribuido al desarrollo de resistencia a los productos, porque esa actividad incrementa la efectividad del control y, por ende, la presión de selección sobre las malezas. En algunos casos, aunque se mezclaron herbicidas de diferente mecanismo de acción, la presión de selección permaneció relativamente alta, por la siguiente razón: el control efectivo

de los biotipos susceptibles continúa, muchas veces, más allá del periodo de eficacia del componente menos residual de la mezcla aplicada.

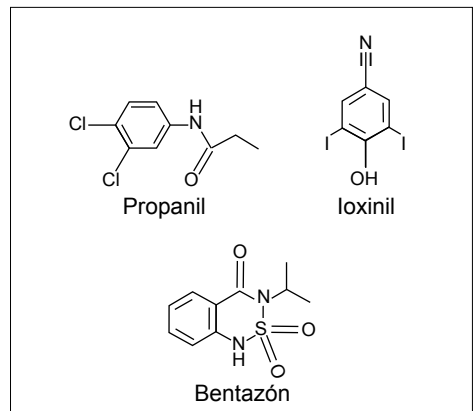
Entre todos los biotipos de malezas resistentes que se han mencionado hasta la fecha, el mayor número (31%) está relacionado con el mecanismo de acción de los herbicidas aquí considerados.

### Inhibidores del fotosistema II

A varios grupos químicos pertenecen los herbicidas que inhiben la fotosíntesis al nivel del fotosistema II; se distribuyen, además, en tres subclases (C1, C2 y C3) según la forma en que se unen a la proteína D<sub>1</sub>. Por ejemplo, el ingrediente activo propanil pertenece a la familia química de las amidas y entra en la subclase C2; el ioxinil es un nitrilo y el bentazón es una benzotio-diazinona, y ambos pertenecen a la subclase C3 (Figura 6).

#### Propanil

Este herbicida es muy selectivo respecto al arroz. Se aplica en posemergencia para controlar algunas



**Figura 6.** Tres herbicidas que inhiben el fotosistema II de la fotosíntesis.

malezas gramíneas, casi todas las de hoja ancha y muchas especies de ciperáceas. El follaje lo absorbe fácilmente, pero su movilidad dentro de la planta, desde el sitio tratado hasta los puntos de crecimiento, es limitada.

**Síntomas.** Su acción herbicida empieza con la clorosis de las plantas a los pocos días de aplicado; viene luego un secamiento foliar y finalmente la necrosis de los tejidos. Su acción es rápida y se inicia de 4 a 8 horas después de aplicado.

**Degradación.** El propanil es hidrolizado rápidamente en la planta de arroz por la enzima arilacil-amidasa, y se convierte en 3,4-dicloroanilina. Esta reacción metabólica del arroz, que es diferencial, le permite al propanol ser muy selectivo respecto a este cultivo, al tiempo que controla otras gramíneas. En el suelo, y en condiciones aeróbicas, el compuesto es metabolizado hasta ácido propiónico y 3,4-dicloroanilina, 7 días después de su aplicación; en condiciones anaeróbicas, esta degradación dura 14 días. Esos dos metabolitos son adsorbidos por la materia orgánica o pueden ser atacados por microorganismos. La vida media del propanil está entre 1 y 3 días, bajo condiciones de humedad y temperatura altas.

**Resistencia.** En Colombia, Costa Rica y Estados Unidos se han encontrado biotipos de la maleza *Echinochloa colona* resistentes al propanil, especialmente en terrenos en que se han hecho aplicaciones continuas del producto durante más de 10 años. En otros países se ha reportado la resistencia de la maleza *Echinochloa crus-galli*.

### **Ioxinil**

Este producto se aplica al arroz en mezcla formulada con 2,4-D para controlar malezas de hoja ancha y

ciperáceas en posemergencia, incluyendo especies resistentes al 2,4-D. El follaje de las malezas absorbe fácilmente el herbicida, pero su traslocación es mínima: actúa por contacto.

**Síntomas.** Los síntomas aparecen a las pocas horas de aplicado: son manchas necróticas sobre las hojas y clorosis alrededor de ellas, hasta que toda la hoja se seca. El ioxinil puede actuar también como desacoplador en la fosforilación oxidativa, como hacen los disruptores de membranas.

**Degradación.** En las plantas, el anillo bencénico se hidroxila, probablemente, y luego se conjuga. En el suelo, los microorganismos lo degradan. Su vida media es de 7 días.

### **Bentazón**

Es un herbicida selectivo, posemergente y de contacto, que controla malezas de hoja ancha y ciperáceas en el cultivo del arroz. Es absorbido principalmente por el follaje. Se requieren como mínimo 4 horas de tiempo seco después de la aplicación para que pueda actuar; la lluvia lo lava del follaje.

**Síntomas.** El primer síntoma es una clorosis que empieza de 3 a 5 días después de la aplicación; la clorosis avanza hasta producir necrosis de los tejidos foliares y, finalmente, secamiento de las hojas.

**Degradación.** En la planta se metaboliza rápidamente formando conjugados glucosilados. En el suelo es débilmente adsorbido por las partículas de suelo; también es degradado por los microorganismos. Su vida media es de 20 días.

### **Mecanismo de acción**

Estos inhibidores de la fotosíntesis actúan de la siguiente manera:

- Se unen primero a la plastoquinona  $Q_B$  en su nicho sobre la proteína  $D_1$  del fotosistema II, en las membranas tilakoides del cloroplasto.
- Esa unión bloquea el flujo de electrones desde  $Q_A$  hasta  $Q_B$ .
- Este bloqueo impide la reducción de NADP (nicotinamida adenín dinucleótido fosfato), un compuesto necesario para la fijación del  $CO_2$ .

Ahora bien, la acción herbicida de estos compuestos no consiste tanto en la interrupción de la fotosíntesis sino en el *estrés oxidativo* que genera al bloquear el transporte fotosintético de electrones; este bloqueo destruye el centro de reacción del fotosistema II, y causa la foto-oxidación de la clorofila y de los lípidos.

Se ha propuesto, además, una interferencia en el proceso de degradación y nueva síntesis de la proteína, el cual opera normalmente para reparar el daño oxidativo que aparece durante la operación del fotosistema II.

El comportamiento de adhesión a la proteína  $D_1$  que exhiben estos compuestos se relaciona con la fuerte interacción que hay entre ellos y los aminoácidos presentes en el nicho de la plastoquinona  $Q_B$ . Se ha observado que el propanil interactúa con Ser 264, mientras que ioxinil y bentazón lo hacen con His 215.

### Resistencia

Conviene mencionar que el mecanismo de acción descrito ha generado un número muy alto de biotipos resistentes (ocupa el segundo lugar después de los inhibidores de la ALS), es decir, un 23% de todos los biotipos resistentes de que se ha informado hoy en el mundo. Hay casi certeza de que la causa de esta resistencia es una mutación ocurrida en la cadena de aminoácidos en el sitio de acción.

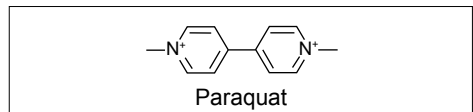
## Captador de electrones del fotosistema I

En el grupo químico de los bipyridilos hay dos ingredientes activos de herbicidas, de los cuales paraquat se emplea en el cultivo del arroz para la 'quemadura química', ya que actúa por contacto y no es selectivo, es decir, controla especies de hoja ancha y de hoja angosta, ya sea en aplicación total o dirigida (Figura 7).

El paraquat es absorbido por las hojas de las malezas pero, en condiciones normales, no se trasloca fácilmente a otras partes de la planta. Sus efectos son relativamente rápidos y necesita luz para ser más efectivo.

**Síntomas.** Los síntomas que produce son desecación de las hojas, necrosis de tejidos foliares y, finalmente, la muerte de las hojas. La causa probable de los síntomas es la disrupción de las membranas celulares, porque las especies reactivas a base de oxígeno (especialmente el radical hidroxilo,  $OH^\cdot$ ) que se forman en la planta, una vez aplicado el herbicida, actúan sobre los lípidos de las membranas.

**Degradación.** En el suelo, el paraquat es inactivado rápidamente porque establece un fuerte enlace con las arcillas. No hay evidencia de degradación del producto por la planta pero puede sufrir fotodescomposición sobre la superficie de las hojas.



**Figura 7.** Un herbicida del grupo químico de los bipyridilos empleado para hacer 'quemadura química'.

### Mecanismo de acción

El paraquat es un compuesto redox activo que interactúa con el fotosistema I de la reacción de luz de la fotosíntesis, capturando los electrones de uno de los centros de hierro y azufre y formando un radical catión bipyridilo (BP<sup>+</sup>); éste es inestable y reacciona rápidamente con el oxígeno, regenerando luego el catión y produciendo varios compuestos fitotóxicos, como el peróxido de hidrógeno (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), el radical superóxido (O<sub>2</sub><sup>-</sup>), el radical hidroxilo (OH<sup>-</sup>) y el oxígeno simple (O<sub>2</sub>).

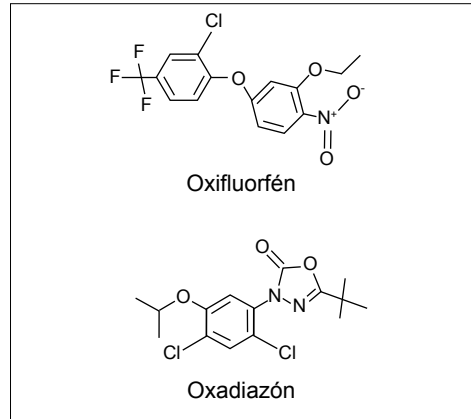
### Resistencia

Se han encontrado, en total, 22 biotipos resistentes a paraquat, principalmente de los géneros *Coniza*, *Erigeron* y *Poa*: representan un 8% de todos los biotipos resistentes a herbicidas que hayan sido mencionados. El mecanismo de resistencia a paraquat no ha sido bien establecido, y se cree que es muy poco frecuente en las poblaciones naturales.

### Inhibidores de la protoporfirinógeno oxidasa (PPO)

Los difenil éteres y los oxadiazoles son dos familias químicas que comparten el mecanismo de acción mencionado; en la primera está el oxifluorfen y en la segunda el oxadiazón (Figura 8). Estos productos se utilizan para controlar malezas gramíneas y de hoja ancha. Se consideran herbicidas de contacto, con capacidad para destruir membranas de células vegetales, de acción rápida, y de escaso o nulo movimiento dentro de la planta cuando son absorbidos.

En general, se aplican en preemergencia sobre suelos húmedos y bien preparados, donde son absorbidos por las plántulas de las malezas que están en crecimiento activo; aunque éstas logran emerger, son débiles y presentan tejidos necróticos y secos.



**Figura 8.** Un difenil éter y un oxadiazol que controlan malezas gramíneas y de hoja ancha en los arrozales.

### Degradación

En las plantas, se metabolizan por hidroxilación de los anillos y luego por conjugación con glucosa o lignina. En el suelo, son fuertemente adsorbidos por los coloides del suelo, donde quedan inmovilizados. El oxifluorfen puede ser también fotodegradado o descompuesto por los microorganismos, y su vida media es de 35 días; la del oxadiazón llega a 60 días.

### Mecanismo de acción

El sitio de acción de estos dos compuestos es la enzima protoporfirinógeno oxidasa, que cataliza la oxidación del protoporfirinógeno IX a protoporfirina IX durante la biosíntesis de clorofila y de un heme (una ferroporfirina o, si está libre, un grupo prostético o complejo de coordinación que lleva un átomo de Fe). Ambos inhiben la enzima y, como resultado, se acumula la protoporfirina IX; ésta absorbe luz y produce un estrés oxidativo que ataca lípidos y proteínas en las células, dando como resultado una pérdida de clorofila y de carotenoides.

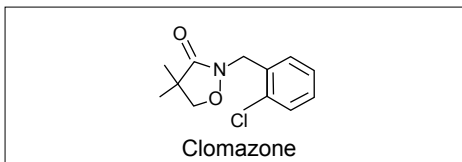
Los biotipos **resistentes** a este herbicida son muy pocos: solamente representan un 0.3% de todos los casos reconocidos actualmente.

### Inhibidor de la síntesis de carotenoides

Entre los diferentes grupos de herbicidas que producen blanqueamiento de los tejidos vegetales están las isoxazolidinonas; a ellas pertenece el ingrediente activo clomazone, que se usa para el control de malezas gramíneas, en preemergencia y en posemgerencia temprana, en el cultivo del arroz (Figura 9). Por su residualidad y por su compatibilidad con herbicidas de contacto, este producto puede usarse como 'sello' o en presiembrá como 'quema química'.

#### Síntomas

El clomazone penetra fácilmente en las plantas por las raíces y por los ápices o retoños (el coleóptilo y el hipocótilo) y es traslocado por el xilema al follaje. Cuando se aplica al follaje, la planta lo absorbe mucho más lentamente. Las plántulas de las malezas susceptibles emergen del suelo tratado exhibiendo un color de blanco a translúcido y se vuelven cloróticas unos días más tarde. Aplicado en posemgerencia, las partes tratadas de las plantas se tornan blancas; lo mismo ocurre con las plantas que son alcanzadas por los vapores en lotes aledaños al área asperjada.



**Figura 9.** Una isoxazolidinona que controla malezas gramíneas en el arroz.

Se desconoce aún el **mecanismo de acción** del clomazone, aunque se sabe que sus moléculas interfieren en la síntesis de carotenoides e inhiben, aparentemente, una enzima después de la formación del farnesil pirofosfato.

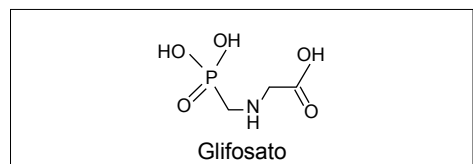
#### Degradación

En las especies de hoja ancha (malezas o cultivos como la soya), las moléculas de clomazone presentan un rompimiento oxidativo en el que se producen metabolitos de alta polaridad; este metabolismo diferencial es el que confiere tolerancia a las plantas de hoja ancha. En el suelo, la molécula de clomazone es degradada fácilmente por los microorganismos; también es susceptible de fotodegradación. Su vida media en el suelo es, en promedio, de 24 días (varía entre 16 y 36 días).

Hasta el momento no se conocen malezas resistentes a clomazone en condiciones de campo.

### Inhibidor de la EPSP sintasa

Del grupo químico de las glicinas, el glifosato es el principal herbicida empleado en los cultivos de arroz (Figura 10). El glifosato es un compuesto no residual y no selectivo que actúa en las hojas, que lo absorben sin dificultad; mezclado con sulfato de amonio o con un surfactante (o con ambos compuestos), mejora su penetración. Es traslocado por el xilema y por el floema, aunque sigue, principalmente, el movimiento de los fotoasimilados que van de la fuente al sitio de demanda.



**Figura 10.** Un herbicida del grupo de las glicinas muy usado en arroz.

Se hacen aplicaciones totales o dirigidas de glifosato en un sinnúmero de situaciones agrícolas. En arroz es el herbicida más usado para hacer ‘quemada química’ antes de la siembra y para controlar el arroz rojo al término del cultivo, haciendo de ‘trapeo químico’.

### **Síntomas**

Entre sus efectos morfológicos más importantes está la clorosis de las hojas, que es seguida por una necrosis foliar, por anomalías en las hojas de los rebrotes (macollas) y por el desarrollo de múltiples tallos. El glifosato se degrada lentamente en las plantas y sus principales metabolitos son el aminometil fosfonato, la sarcosina y la glicina.

### **Mecanismo de acción**

El mecanismo principal es la inhibición de la enzima 5-enolpiruvilshiquimato-3-fosfato sintasa (EPSPS), que es la penúltima enzima en la síntesis de aminoácidos aromáticos por la ruta del ácido shiquímico. La enzima cataliza la formación de enolpiruvilshiquimato fosfato y de un fosfato inorgánico a partir de fosfoenilpiruvato y de shiquimato 3-fosfato, en una reacción de transferencia de un carbovinilo. El glifosato actúa como un inhibidor competitivo de la EPSPS respecto al fosfoenilpiruvato, y la inhibe interactuando con ella para formar un complejo. Aunque otras enzimas utilizan el fosfoenilpiruvato, sólo la EPSPS interactúa con éste en un complejo enzima-sustrato en que la enzima ya no actúa libremente. El glifosato actúa entonces como un análogo del fosfoenilpiruvato en un estado de transición. La planta muere por falta de sus aminoácidos aromáticos (triptófano, tirosina y fenilalanina), aunque hay pruebas evidentes de que el herbicida afecta otros procesos de la planta.

### **Resistencia**

Desde su introducción en 1974, el glifosato ha sido usado extensamente. Sin embargo, el porcentaje de malezas resistentes a este herbicida de que se ha tenido mención hasta ahora no alcanza el 2% de todos los biotipos resistentes en condiciones de campo que se conocen. Las hay, por ejemplo, entre especies de los géneros *Conyza*, *Lolium* y *Eleusine*.

Se ha propuesto una nueva y particular estrategia de manejo de malezas basada en los siguientes puntos: sembrar un cultivar de arroz (o de otro cultivo) resistente al glifosato; controlar las malezas haciendo aplicaciones totales de un herbicida no selectivo, no residual y benigno para el ambiente, en este caso el glifosato; hacer rotación con otro cultivo y rotar por tanto los herbicidas de acuerdo con la selectividad de cada cultivo.

### **Inhibidores de la formación de microtúbulos**

Diversas familias químicas inhiben el desarrollo de los microtúbulos celulares; entre ellas están las dinitroanilinas, y una de éstas, la pendimetalina, es ingrediente activo de un herbicida que se aplica al arroz.

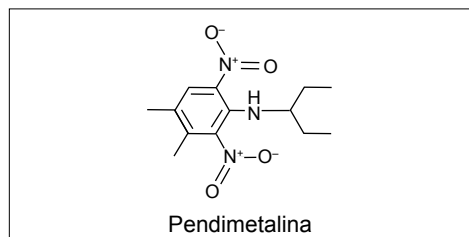
La pendimetalina es un herbicida residual y selectivo que elimina las gramíneas anuales y la mayoría de las malezas de hoja ancha. Se aplica al suelo tanto en preemergencia como en posemergencia temprana. El producto es absorbido por las semillas de las malezas desde que están en proceso de germinación hasta cuando tienen dos hojas, como máximo. Su selectividad se basa en el contenido de lípidos de la semilla, que es mayor en las dicotiledóneas que en las monocotiledóneas: a menos lípidos seminales (como en las gramíneas), mayor efectividad del herbicida.

### Mecanismo de acción

La pendimetalina no se trasloca porque las raicillas que emite la semilla y el tallito de la plántula en emergencia la absorben; el crecimiento de estas estructuras se inhibe porque el producto afecta la división celular. La molécula de pendimetalina (Figura 11) es un disruptor mitótico (un veneno de la célula en mitosis). En las raíces tratadas, las células avanzan normalmente hasta la metafase pero no pasan al siguiente estado, porque los cromosomas duplicados quedan envueltos en una membrana nuclear que no permite su expansión. Además, las fotografías tomadas con el microscopio electrónico revelan un huso cromático muy pobre en microtúbulos, estructuras que se encargan del movimiento de los cromosomas dentro de la célula durante la mitosis. Los análisis bioquímicos han detectado una alta concentración de tubulina en los tejidos de estas raíces, lo que demuestra que esta proteína no se polimeriza bien cuando forma los microtúbulos. El herbicida se metaboliza en el suelo y sus metabolitos pueden ser transportados por la planta, los absorbe por las raíces y los transporta en el xilema con el agua absorbida.

### Resistencia

Aunque este herbicida se usa extensamente y es muy eficaz, existen pocos informes (sólo un 3.5% del total reportado) de biotipos de malezas

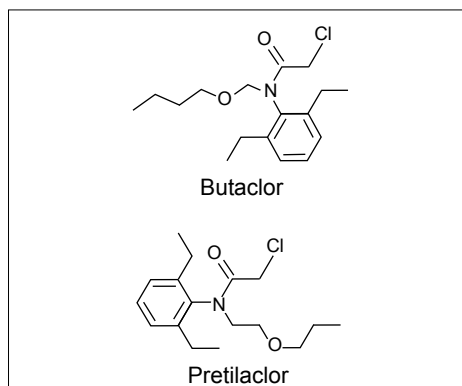


**Figura 11.** Una dinitroanilina que inhibe el crecimiento de los microtúbulos en las células de las malezas.

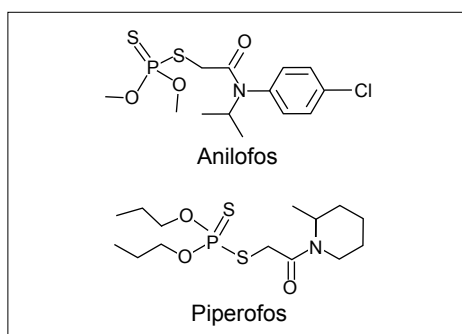
resistentes a las dinitroanilinas, entre ellos los pertenecientes a las especies *Eleusine indica*, *Setaria viridis* y *Sorghum halapense*.

### Inhibidores de la síntesis de ácidos grasos de cadena larga

Estos compuestos se conocen también como inhibidores de la división celular. Tienen este mecanismo de acción butaclor y pretilaclor, que pertenecen a las cloroacetamidas (Figura 12), y también anilofos y piperofos, que no tienen un grupo químico definido (Figura 13).



**Figura 12.** Dos cloroacetamidas que inhiben la división celular en las malezas de los arrozales.



**Figura 13.** Dos herbicidas selectivos del arroz que inhiben la síntesis de ácidos grasos en las malezas que controlan.

Estos herbicidas son selectivos del arroz, y hacen un buen control de malezas en especies de gramíneas, de ciperáceas y en algunas de hoja ancha. Cuando se utilizan solos, se aplican al suelo en preemergencia; cuando se mezclan con propanil, son sinergistas que rompen la resistencia de *Echinochloa* sp. y se aplican en posemergencia del arroz, desde que las plantas emiten la primera hoja hasta que inician la etapa de macollamiento.

### Síntomas y acción

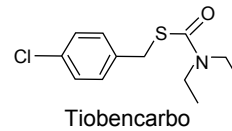
Son absorbidos, generalmente, por el coleóptilo o el epicótilo de las plántulas de las malezas, y les causan deformaciones morfológicas o les inhiben su crecimiento y, al final, la mayoría de ellas no emergen. Estos herbicidas son metabolizados por hidrólisis dentro de las plantas y son también adsorbidos por los coloides del suelo.

No se conoce aún su sitio exacto de acción en las malezas; se postula, sin embargo, una posible conjugación con la acetil-coenzima A, cuya consecuencia sería la inhibición de varias rutas metabólicas en la planta, como la síntesis de ácidos grasos y lípidos, de proteínas, de isoprenoides (giberelinas) y de flavonoides (antocianinas).

Entre todos los biotipos de malezas resistentes a los herbicidas en el mundo, sólo un 0.3% lo son por resistencia en el campo a estos cuatro productos.

### Inhibidores de la síntesis de lípidos (no ACC-asa)

El tiobencarbo o bentiocarbo (tiocarbamato) es un herbicida selectivo que se aplica en preemergencia o en posemergencia temprana para el control de gramíneas, de ciperáceas y de algunas especies de hoja ancha. Es absorbido por las raicillas, la plúmula, el tallo, las hojas y, principalmente, a través del mesocótilo (Figura 14). Su traslocación es acropétala



**Figura 14.** Un herbicida selectivo del arroz que es absorbido por las estructuras primigenias de las plántulas de las malezas.

(vía xilema, de la base hacia el ápice). Su efecto se observa de 5 a 8 días después de la aplicación.

El arroz lo metaboliza completamente. Es fuertemente adsorbido por los coloides del suelo y también lo degradan los microorganismos. Su vida media varía de 30 a 60 días.

Aunque el sitio específico en que actúa en las malezas no se ha identificado, se postula una inhibición de la síntesis de lípidos en un sitio diferente a aquél en que actúa la ACC-asa. Se conocen también otras respuestas bioquímicas a su acción relacionadas con la inhibición de la síntesis de proteínas, de isoprenoides y de flavonoides.

De todos los biotipos resistentes a herbicidas en el mundo, el 3% corresponde actualmente al mecanismo de acción postulado.

### Auxinas sintéticas

Hay compuestos catalogados en varias familias químicas que causan en las plantas los síntomas siguientes:

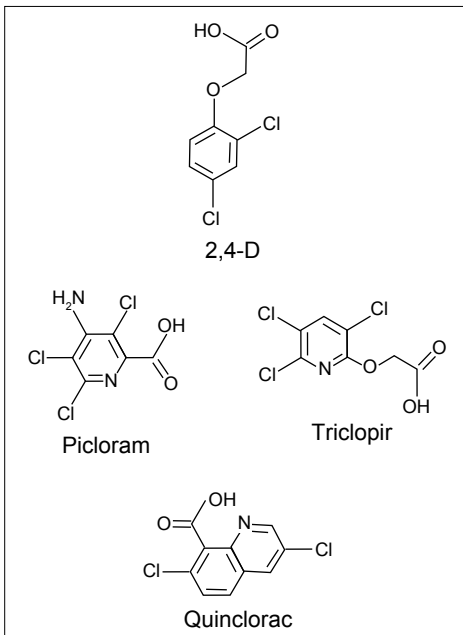
- Crecimiento anormal de raíces y tallos.
- Epinastia, elongación y entorchamiento de las hojas.
- Siguen a éstos la inhibición del crecimiento y la clorosis de la planta y, finalmente, la necrosis de sus tejidos.

Estos productos se aplican como un tratamiento foliar para el control de malezas de hoja ancha en cultivos de gramíneas, aunque también pueden ser absorbidos por las raíces.

En la familia de los ácidos fenoxicarboxílicos está el herbicida 2,4-D; en la de los ácidos piridincarboxílicos están las mezclas formuladas de picloram+2,4-D y de propanil+triclopir; y en la de los ácidos quinolinicarboxílicos aparece el quinclorac (Figura 15).

### Características

Se traslocan fácilmente por el floema y el xilema, aunque en dosis altas actúan como herbicidas de contacto y así su traslocación decrece. Cuando se aplican en dosis muy bajas, se convierten en reguladores del crecimiento, como las auxinas, se acumulan en los puntos de crecimiento, y generan en la planta respuestas positivas.



**Figura 15.** Cuatro auxinas sintéticas pertenecientes a tres familias de ácidos carboxílicos.

El mecanismo de acción de estos herbicidas no está aún completamente definido. Se sabe que afecta la plasticidad de la pared celular; que incrementa la acción de la polimerasa del ARN; que aumenta el ADN, el ARN y la síntesis de proteínas; y que estimula la producción de etileno. De todos los biotipos resistentes de que se ha recibido información, el 9% lo son para este mecanismo de acción.

El quinclorac puede aplicarse también en preemergencia. Este producto controla ciertas gramíneas afectando una enzima asociada con la biosíntesis de la celulosa que conforma la pared celular. En los biotipos resistentes, esta enzima está alterada.

### Degradación

Estos compuestos son metabolizados lentamente, dentro de la planta, por hidrólisis y por conjugación con otros compuestos. En el suelo se degradan rápidamente si la temperatura y la humedad son altas.

### Referencias bibliográficas

- Clavijo, J. 1999. Mecanismo de acción de nuevos herbicidas. In: Actualización en malherbología; Curso y precongreso. Memorias del XIV Congreso ALAM y XXIX Congreso COMALFI celebrados en Cartagena, Colombia, en agosto de 1999. Bogotá, Colombia. p. 38-40.
- Clavijo, J. 2000. Modo y mecanismo de acción de los herbicidas. Revista Ventana al Campo Tropical (Colombia) 3(1):5-9. [Disponible también en: Robayo, G. (ed.). Herbicidas 2000 y medio ambiente. COMALFI, Bogotá, Colombia].

- Clavijo, J. 2001. Herbicidas inhibidores de la ALS y el problema de las malezas en arroz. *Revista COMALFI* (Colombia) 28(1):17-29.
- Dusky, J.; Tredaway, J. 2000. Weeds in the sunshine: Weed management in rice. SS-A 10. Cooperative Extension Service, University of Florida. 4 p.
- Edifarm. 2004. *Vademecum arrocero* 2004. 1a. ed. Bogotá, Colombia. 424 p.
- Federación Nacional de Arroceros de Colombia (Fedearroz). 2000. Segundo censo nacional arrocero. División de Investigaciones Económicas. Bogotá, Colombia. 197 p.
- Fuentes, C. 1997. Los herbicidas sulfonilureas: Actividad biológica y modo de acción. *Revista COMALFI* (Colombia) 24(1-2):37-67.
- HRAC (Herbicide Resistance Action Committee). 2003. Classification of herbicides according to mode of action. Consultado enero 15 de 2005 en: [www.plantprotection.org/hrac](http://www.plantprotection.org/hrac)
- ICA (Instituto Colombiano Agropecuario). 2005. Lista de herbicidas registrados para arroz. División de Insumos Agrícolas. Bogotá, Colombia. 4 p.
- Iowa State University Extension Service. 2004. Herbicide manual for agricultural professionals: Herbicide site of action and injury. Ames, IO, EE.UU. p. 38-42. Disponible también en: [www.weeds.iastate.edu](http://www.weeds.iastate.edu)
- Martin, H. 2004. Herbicide mode of action categories. Ministry of Agriculture and Food, Ontario. Canadá. 13 p. Disponible también en: [www.omafra.gov.on.ca/english/crops/facts/00-061.htm](http://www.omafra.gov.on.ca/english/crops/facts/00-061.htm)
- Powles, S.; Holtum, J. (eds.). 1994. Herbicide resistance in plants: Biology and biochemistry. Lewis Publishers, Boca Raton, FL, EE.UU. 353 p.
- Puentes, B. 2004. Modo de acción en los herbicidas: Arrocero moderno con el mejor entorno ambiental. *Revista Ventana al Campo Tropical* (Colombia) 1-3:103-104.
- Weed Science Society of America. 2002. *Herbicide handbook*. 8a. ed. Urbana, IL, EE.UU. 400 p.