

UNIVERSIDAD AUSTRAL DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

ESCUELA DE AGRONOMIA

Variación de la biodisponibilidad del metsulfuron – metil y triasulfuron bajo distintas condiciones de encalado en dos suelos de la décima región de Chile

Tesis presentada como parte de los
requisitos para optar al grado de
Licenciado en Agronomía

Jorge Ricardo Henríquez Rubio

VALDIVIA CHILE

2005

PROFESOR
PATROCINANTE

RICARDO FUENTES P.
Ingeniero Agrónomo,
M. Sc.

PROFESOR
INFORMANTE

DANTE PINOCHET T.
Ingeniero Agrónomo
M. Sc., Ph. D.

ROBERTO CARRILLO L.
Ingeniero Agrónomo
M. Sc., Ph. D.

INSTITUTO DE PRODUCCION Y SANIDAD VEGETAL

INDICE DE MATERIAS

Capitulo	Pagina
1 INTRODUCCION	1
2 REVISION BIBLIOGRAFICA	3
2.1 Características generales del metsulfuron-metil y triasulfuron	3
2.1.1 Metsulfuron-metil	3
2.1.2 Triasulfuron	4
2.2 Modo de acción	4
2.3 Comportamiento de los herbicidas en el suelo	5
2.4 Aspectos sobre la adsorción de los herbicidas	5
2.4.1 Procesos influenciados por la adsorción del metsulfuron-metil y triasulfuron	7
2.4.1.1 Movilidad	7
2.4.1.2 Degradación	7
2.5 Efectos de la cal sobre el suelo	7
2.5.1 Formas de cal	8
2.6 Carga dependiente del pH	9
2.7 Repulsión aniónica	11
3 MATERIAL Y METODO	12
3.1 Ubicación del ensayo	12
3.2 Muestras de suelo	12
3.3 Acondicionamiento de las muestras	12
3.4 Análisis preliminares	13
3.5 Características del ensayo	13

Capitulo	Pagina	
3.6	Diseño experimental	14
3.7	Control	14
3.8	Herbicidas utilizados	15
3.9	Enmienda calcárea	16
3.10	Indicador biológico	17
3.11	Preparación de la unidad experimental	17
3.12	Análisis de datos	18
3.13	Obtención de la constante de equilibrio o Kd	20
4	PRESENTACION Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	21
4.1	Suelo Malihue	21
4.1.1	Coeficientes del modelo utilizado y curvas de respuesta del metsulfuron – metil y triasulfuron en el suelo Malihue	22
4.1.1.1	Coeficientes del modelo y curvas de respuesta de metsulfuron - metil	22
4.1.1.2	Coeficientes del modelo y curvas de respuesta de triasulfuron	25
4.1.2	Efecto del encalado sobre el IC ₅₀ de metsulfuron – metil y triasulfuron en el suelo Malihue	27
4.13	Efecto del pH sobre la adsorción de metsulfuron – metil y triasulfuron en el suelo Malihue	29
4.14	Variación de la disponibilidad relativa(%) de metsulfuron – metil y triasulfuron por efecto del encalado, en el suelo Malihue	30
4.15	Efecto del encalado con Ca(OH) ₂ , sobre el Kd de metsulfuron – metil y triasulfuron en el suelo Malihue.	31
4.2	Suelo Fresia	32
4.2.1	Coeficientes del modelo utilizado y curvas de respuesta del metsulfuron – metil y triasulfuron en el suelo Fresia	33

Capitulo	Pagina
4.2.1.1 Coeficientes del modelo y curvas de respuesta de metsulfuron - metil	33
4.2.1.2 Coeficientes del modelo y curvas de respuesta de triasulfuron	35
4.2.2 Efecto del encalado sobre el IC ₅₀ de metsulfuron – metil y triasulfuron en el suelo Fresia	37
4.2.3 Efecto del pH sobre la adsorción de metsulfuron – metil y triasulfuron en el suelo Fresia	39
4.2.4 Variación de la disponibilidad relativa(%) de metsulfuron – metil y triasulfuron por efecto del encalado, en el suelo Fresia	40
4.2.5 Efecto del encalado con Ca(OH) ₂ , sobre el Kd de metsulfuron – metil y triasulfuron en el suelo Fresia	42
5 CONCLUSIONES	44
6 RESUMEN	45
SUMMARY	
7 BIBLIOGRAFIA	46
8 ANEXOS	50

INDICE DE CUADROS

Cuadro		Pagina
1	Características químicas y físicas de las muestras de suelo Malihue y Fresia utilizados en el estudio	15
2	Dosis de herbicida utilizadas en ambos suelos	16
3	Dosis de Ca(OH)_2 y CaCO_3 en t ha^{-1}	17
4	Variación de pH en muestras del suelo Malihue en función de la dosis de Ca(OH)_2	21
5	Coeficientes de regresión del modelo de curvas de respuesta utilizados para metsulfuron – metil bajo distintas dosis de encalado en el suelo Malihue	23
6	Coeficientes de regresión del modelo de curvas de respuesta utilizados para triasulfuron bajo distintas dosis de encalado en el suelo Malihue	25
7	Valores de IC_{50} de metsulfuron – metil y triasulfuron con diferentes dosis de encalado en el suelo Malihue	28
8	Valores de K_d para metsulfuron – metil y triasulfuron por efecto de diferentes dosis de encalado con Ca(OH)_2 en el suelo Malihue	32
9	Variación de pH en muestras del suelo Fresia en función de la dosis de Ca(OH)_2	32
10	Coeficientes de regresión del modelo de curvas de respuesta utilizados para metsulfuron – metil bajo distintas dosis de encalado en el suelo Fresia	33

Cuadro		Pagina
11	Coeficientes de regresión del modelo de curvas de respuesta utilizados para triasulfuron bajo distintas dosis de encalado en el suelo Fresia	36
12	Valores de IC_{50} de metsulfuron – metil y triasulfuron con diferentes dosis de encalado en el suelo Fresia	38
13	Valores de K_d para metsulfuron – metil y triasulfuron por efecto de diferentes dosis de encalado con $Ca(OH)_2$ en el suelo Fresia	44

INDICE DE FIGURAS

Figura		Pagina
1	Disminución relativa del largo radical en presencia de dosis crecientes de herbicida	19
2	Disminución relativa (%) del largo de raíz de arveja en presencia de dosis crecientes de metsulfuron – metil en el suelo Malihue	24
3	Disminución relativa (%) del largo de raíz de arveja en presencia de dosis crecientes de triasulfuron en el suelo Malihue	26
4	Efecto de la dosis de Ca(OH)_2 sobre el IC_{50} de metsulfuron-metil y triasulfuron en el suelo Malihue	29
5	Variación de la adsorción de metsulfuron – metil y triasulfuron bajo distintas condiciones de pH, en el suelo Malihue	30
6	Variación de la disponibilidad de metsulfuron – metil y triasulfuron bajo distintas dosis de encalado	31
7	Disminución relativa (%) del largo de raíz de arveja en presencia de dosis crecientes de metsulfuron – metil en el suelo Fresia	34
8	Disminución relativa (%) del largo de raíz de arveja en presencia de dosis crecientes de triasulfuron en el suelo Fresia	37
9	Efecto de la dosis de Ca(OH)_2 sobre el IC_{50} de metsulfuron-metil y triasulfuron en el suelo Fresia	39

Figura		Pagina
10	Variación de la adsorción de metsulfuron – metil y triasulfuron bajo distintas condiciones de pH, en el suelo Fresia	40
11	Variación de la disponibilidad de metsulfuron – metil y triasulfuron bajo distintas dosis de encalado	41

INDICE DE ANEXOS

Anexos		Página
1	Reducción relativa (%) del tamaño de raíz de arveja, bajo dosis crecientes de metsulfuron – metil en el suelo Malihue	51
2	Reducción relativa (%) del tamaño de raíz de arveja, bajo dosis crecientes de triasulfuron en el suelo Malihue	52
3	Reducción relativa (%) del tamaño de raíz de arveja, bajo dosis crecientes de metsulfuron – metil en el suelo Fresia	53
4	Reducción relativa (%) del tamaño de raíz de arveja, bajo dosis crecientes de triasulfuron en el suelo Fresia	54

1 INTRODUCCION

La efectividad de los herbicidas depende en gran parte de la disponibilidad que estos presentan en el suelo para ser absorbidos por las plantas. Esta disponibilidad dependerá de factores tales como: adsorción electrostática de los coloides del suelo, la adsorción específica de algunos de ellos en la matriz del suelo, su descomposición química en la solución del suelo, la descomposición biológica por los microorganismos del suelo y las pérdidas producidas por la lixiviación, la volatilización y la fotodescomposición.

Estudios recientes con los herbicidas metsulfuron – metil y triasulfuron han sugerido que uno de los factores que presentaría una mayor influencia en la disponibilidad de ellos en el suelo es la adsorción electrostática. La adsorción electrostática ha sido descrita como un importante factor de la disipación de los herbicidas en el suelo y su efecto puede ser determinante en suelos con alta carga variable. En la zona sur de Chile, los suelos trumaos (Hapludand) y los rojos arcillosos (Paleohumult) presentan una alta carga variable, la cual se debe principalmente a la naturaleza de las arcillas y los altos contenidos de materia orgánica de ambos suelos.

La carga variable del suelo también se conoce como carga dependiente del pH, debido a su dependencia de esta condición de la solución del suelo. La carga negativa de las superficies coloidales se hace mayor en la medida que el pH se hace más alcalino. Por el contrario, la carga positiva de la superficie se incrementa en la medida que el pH se hace más ácido. El pH del suelo es el indicador más generalizado del grado de acidez y mide la concentración de protones (H^+) presentes en la solución del suelo e indica la potencial toxicidad de elementos que se solubilizan. Entre ellos aluminio, manganeso y hierro

incrementan su concentración en la solución del suelo en desmedro de Ca y Mg. Debido al incremento de elementos tóxicos para las plantas, se hace imprescindible en suelos ácidos el uso de enmiendas calcáreas para elevar el pH a un valor adecuado, que no afecte la productividad de los cultivos agrícolas.

Al llevar un suelo a la neutralidad, no solo existe un aumento de la capacidad de intercambio de cationes (CIC), debido a la carga variable se produce una mayor repulsión de las moléculas cargadas negativamente (repulsión aniónica). Los herbicidas del grupo de las sulfonilureas presentan una carga electrostática negativa debida a la desprotonización como ácidos débiles. Esto provoca que la presencia en la solución del suelo de éstos, entre otros factores, sea dependiente del pH.

Los herbicidas del grupo de las sulfonilureas triasulfuron y metsulfuron – metil son ampliamente utilizados en control de malezas anuales en cultivos de cereales. De acuerdo a la revisión de FUENTES (1992) las moléculas de estos herbicidas son menos adsorbidas en la matriz del suelo cuando se encuentran ionizadas, ya que son más repelidas por las abundantes cargas negativas del suelo.

De esta manera, se sostiene como hipótesis que al aumentar el pH con un encalado de corrección se produce una menor adsorción o una mayor repulsión aniónica desde la matriz coloidal del suelo.

El objetivo de este trabajo fue determinar la variabilidad de la disponibilidad de los herbicidas triasulfuron y metsulfuron – metil frente al cambio del pH con distintas dosis de encalado en dos suelos agrícolas presentes en la décima región, bajo condiciones controladas.

2 REVISION BIBLIOGRAFICA

2.1 Características generales del metsulfuron-metil y triasulfuron.

Estos dos herbicidas pertenecen al grupo de las sulfonilureas, las cuales son utilizadas en diversos países principalmente en el control de malezas anuales en cultivos de cereales (WALKER y WELCH, 1989). La principal característica de estos productos es la que poseen un amplio espectro de acción a muy bajas dosis ($2-75 \text{ g ha}^{-1}$), una alta especificidad sobre plantas, muy baja toxicidad tanto aguda como crónica a especies animales y una baja tendencia a la bioacumulación en organismos vivos (BROWN, 1990).

Aún con estas bajas dosis, en algunos casos, causan problemas en rotaciones de cultivos de especies dicotiledóneas sensibles a bajas concentraciones de residuos de estos productos (FUENTES, 1992).

2.1.1 Metsulfuron-metil. Su nombre químico corresponde a Metil 2 ((((((4 metoxi – 6 metil – 1, 3, 5 triazin 2 – il) amino) carbaryl) amino) sulfonil) benzoato) (AFIPA, 1998).

Dentro de las características químicas mas importante entregadas por BLAIR y MARTÍN (1988) para metsulfuron-metil se puede mencionar su variación de la solubilidad a distintos pH, siendo 270 mg/L a pH 4,6 y hasta 9.500 mg/L a pH 6,1. También es importante señalar que la constante de disociación para esta molécula (pKa) es de 3,3.

2.1.2 Triasulfuron. Este producto es el más reciente de todas las sulfonilureas y se conoció originalmente como CGA – 131036 (Amrein y Gerber (1985) citados por BLAIR y MARTÍN, 1988). Su nombre químico es 1 – (2 – (2 cloro – etoxi) fenilsulfunil) – 3 (4 metoxi – 6 metyl – 1, 3, 5 trazin – 2 yl) urea (OPPONG y SAGAR, 1992).

Al igual que el metsulfuron – metil, el triasulfuron también presenta una marcada influencia del pH en la solubilidad de la molécula desde 40 mg/L a pH 5 hasta 10.000 mg/L a pH 8. El pKa del triasulfuron es de 4,5. (WALKER y WELCH, 1989; BLAIR y MARTÍN, 1988).

2.2 Modo de acción.

Las sulfonilureas son absorbidas tanto por el follaje como por el sistema radical y luego son traslocadas a toda la planta, ya sea vía apoplasto o por vía simplasto. Las condiciones de humedad del suelo, favorecen la acción de estos productos, los cuales, generalmente, son aplicados de postemergencia, siendo altamente activos en el suelo a pesar de ser utilizados en bajas dosis (FUENTES, 1992).

El mecanismo de acción de estos herbicidas consiste en la reducción, en la célula, de los niveles de tres aminoácidos alifáticos de cadena ramificada (valina, leucina e isoleucina), como resultado de la inhibición de la enzima acetolactato sintetasa (ALS) que cataliza la síntesis del ácido acetohidróxido, precursor de estos aminoácidos (FUENTES, 1992).

2.3 Comportamiento de los herbicidas en el suelo.

Según la revisión de FUENTES (1992), cada vez que un herbicida es aplicado a la superficie del suelo, es afectado por una serie de procesos que tienden a modificar su comportamiento. Estos procesos de disipación de un herbicida, según STREIBIG y KUDSK (1993), pueden ser de naturaleza biótica y abiótica. La disipación biótica es producida mediante la degradación microbial y la absorción de las plantas. La disipación abiótica es a través de la degradación química, fotodescomposición, volatilización y la adsorción del suelo.

2.4 Aspectos sobre la adsorción de los herbicidas.

Se entiende por adsorción a la atracción electrostática de las moléculas de herbicidas desde la solución del suelo por los coloides orgánicos e inorgánicos, produciendo una disminución de la concentración y disponibilidad del producto en la solución del suelo (KOGAN, 1993). FUENTES (1992), agrega, que este es un fenómeno de atracción y unión de las moléculas o iones a la superficie de sólidos. Este proceso resulta de una interacción del campo de fuerza emanada de la superficie del absorbente (coloide del suelo) y la superficie del absorbato (herbicida).

Las cargas eléctricas de los herbicidas tienen gran relevancia en la adsorción. Estas pueden ser permanentes, como en el caso de compuestos derivados de amonio cuaternario (bipirilos) o pueden ser resultado de procesos de ionización, tales como la protonización en bases débiles o por la liberación de un protón desde ácidos débiles (CALVET, 1980). El caso de las sulfonilureas es el de la liberación de un protón desde ácidos débiles (OPPONG y SAGAR, 1992).

WALKER *et al.* (1989), describen una forma de expresar esta concentración de equilibrio, mediante el coeficiente de distribución (K_d), calculado de la cantidad adsorbida por unidad de peso de suelo seco, dividido por la concentración de la solución. Así para el metsulfuron-metil existe una variación entre 0.040 y 0.132 en los valores de K_d en un estudio realizado en suelos de Inglaterra, y para el caso del triasulfuron, WALKER y WELCH (1989), obtuvieron valores K_d entre 0.188 y 0.553, para los mismos sitios, lo que indica una mayor adsorción del triasulfuron versus el metsulfuron-metil.

Con respecto a la determinación de la adsorción de los herbicidas en los suelos, se han empleado tanto análisis químicos como biológicos. Estos últimos son más conocidos como bioensayos y han sido utilizados para estudiar la eficacia y selectividad de los herbicidas (GRAYSON *et al.*, 1990). Incluso los bioensayos, han sido utilizados para sustituir los análisis químicos para determinar residualidad en suelos y agua (ALLOTT y O'NELLY, 1970). En contraste con los análisis químicos, los bioensayos son raramente estandarizados (NYFFELER *et al.*, 1982). Es así como GÜNTHER *et al.* (1989), a través de bioensayos, en el que se midió el largo radical con relación a dosis conocidas de herbicida lograron determinar la biodisponibilidad de los herbicidas sulfonilureas en el suelo. En esta metodología, se obtiene primero la disponibilidad potencial para las plantas, calculado de las curvas de respuestas en un sustrato no adsorbtivo y los correspondientes valores de IC_{50} (la dosis que inhibe el 50% del crecimiento radical) del suelo y por diferencia se obtiene la fracción biodisponible del herbicida.

Por último, la adsorción acompañada de la desorción determina la movilidad de los herbicidas en el perfil del suelo, así también la degradación y persistencia de estos (Weber, 1972, citado por MERSIE y FOY, 1986).

2.4.1 Procesos influenciados por la adsorción del metsulfuron-metil y triasulfuron. Los procesos que se ven más afectados por la adsorción en la matriz del suelo de estos herbicidas son la movilidad y la degradación de las sulfonilureas.

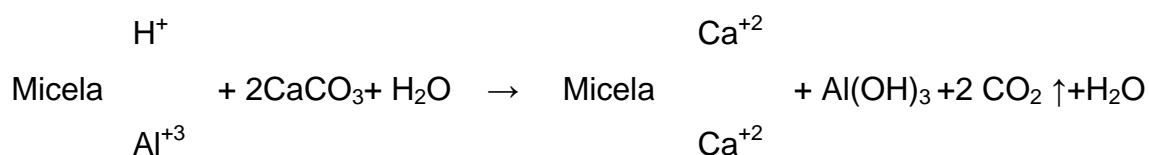
2.4.1.1 Movilidad. La movilidad del herbicida en los suelos es importante porque primero reduce la eficacia del herbicida cuando este es muy móvil y fácilmente lixiviado bajo la zona de semillas de malezas, y en segundo lugar puede contaminar aguas subterráneas (WEBER *et al.*, 1999). Estos mismos autores señalan que el movimiento del herbicida en el suelo depende de las propiedades del herbicida, las propiedades del suelo, las condiciones de la aplicación y las condiciones climáticas. La evaporación es importante en la influencia en el transporte capilar que retorna a la sulfonilurea a la superficie.

2.4.1.2 Degradación. La degradación de los compuestos puede seguir dos vías diferentes dependiendo si el herbicida es metabolizado por microorganismos, es decir un proceso biológico, o puede ser un proceso químico. En el primer caso existe una fase larga antes de la degradación, ya que pasa un tiempo antes de que los microorganismos sean potencialmente capaces de degradar el herbicida (etapa en que la enzima degradadora del sustrato es limitante). En el segundo caso, el herbicida comienza a ser degradado inmediatamente después de aplicado y solo está limitado por la presencia del sustrato (GUNTHER *et al.*, 1986).

2.5 Efectos de la cal sobre el suelo.

Según BRADY y WEIL (2000) los compuestos calcáreos cuando son aplicados a suelos ácidos, se hidrolizan produciendo hidróxidos y el catión portador. Los hidróxidos reaccionan neutralizando los protones presentes en la

solución del suelo. Todos los materiales calcáreos ya sean óxidos, hidróxidos y carbonatos, reaccionan produciendo este proceso. En el caso de los carbonatos antes de la reacción final existe como estado intermedio la presencia de bicarbonato, el cual se hidroliza posteriormente a dióxido de carbono e hidroxilo. Además, la presencia del catión, usualmente calcio, produce un desplace de hidrógenos y aluminios del complejo coloidal hacia la solución del suelo, en donde son precipitados o neutralizados por la presencia de los hidroxilos, formando gibsita en el caso del aluminio y agua en el caso de los protones. La reacción del carbonato de calcio puede ser resumida como sigue:



La insolubilidad del Al(OH)_3 (gibsita) y la liberación de CO_2 a la atmósfera dirigen la reacción hacia la derecha. En suma, la adición de iones de calcio aumentan el porcentaje de saturación de bases del complejo coloidal y los hidroxilos disminuyen la concentración de H y Al desde la solución del suelo (BRADY y WEIL, 2000).

2.5.1 Formas de cal.

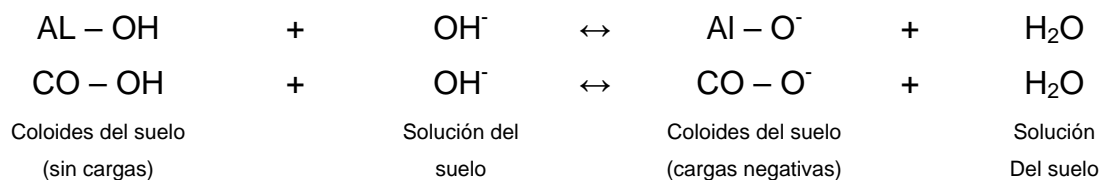
La única forma de dar solución práctica y rápida, eficiente y económica a la modificación del pH ácido es mediante el uso de enmiendas calcáreas (cales agrícolas) (SUAREZ, 1990). Sin embargo, las enmiendas más utilizadas para corregir el problema son: (1) las sales de ácidos débiles, como los carbonatos, y (2) los compuestos básicos, como óxidos e hidróxidos. Estos compuestos de calcio y magnesio se llaman comúnmente cales agrícolas y tienen la ventaja, entre otras cosas, de no dejar residuo de naturaleza perjudicial en el suelo (BUCKMAN, 1966).

2.6 Carga dependiente del pH.

Las cargas de los coloides del suelo tienen dos orígenes principales. Primero los grupos hidroxilos y otros grupos funcionales, que están presentes en la superficie de las partículas coloidales, liberan o aceptan iones hidrógenos y proporcionan tanto cargas negativas como positivas, dependiendo del pH de la solución del suelo. Todos los coloides tanto orgánicos como inorgánicos presentan en la superficie cargas asociadas a los grupos hidroxilos, cargas que son dependientes del pH (BRADY y WEIL, 2000).

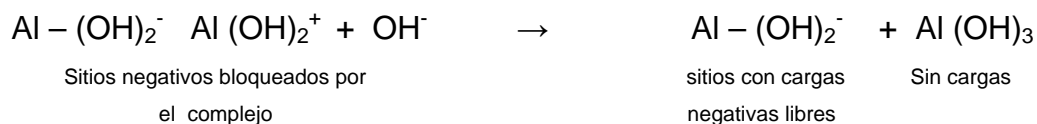
En segundo lugar, para el caso de las arcillas 2:1 las cargas superficiales son complementadas por un número más grande de cargas emanadas desde la sustitución isomorfa de un catión estructural por otro catión. Estas cargas no dependen del pH y se llaman cargas constantes o permanentes (BRADY y WEIL, 2000).

Las carga dependiente del pH es asociada principalmente con los grupos hidroxilos (OH) presentes en los bordes y superficies de los coloides inorgánicos y orgánicos. Los grupos hidroxilos son atraídos por el fierro y aluminio en el coloide inorgánico ($\text{Al} - \text{OH}$) y por el grupo carboxilo ($\text{CO} - \text{OH}$) en el Humus. Bajo condiciones cercanas a la neutralidad, las cargas dependientes del pH son pequeñas o no existen. Cuando el pH se hace alcalino se disocian los iones hidrogeno asociados a los grupos OH^- , con lo cual aumenta también las cargas negativas en la superficie coloidal (BRADY y WEIL, 2000).



Como se indica en las flechas, la reacción es reversible. Si el pH se hace más alcalino, más iones hidroxilos están disponibles para forzar la reacción hacia la derecha, y las cargas negativas en la superficie de las partículas aumentan. Si el pH disminuye, la concentración de iones OH^- se reduce, la reacción retrocede hacia la izquierda y la negatividad se reduce (BRADY y WEIL, 2000). TAN (1998), indica que la presencia de grupos (^-OH) en los bordes y planos de los cristales puede dar origen a cargas negativas especialmente a pH altos. Esta carga es llamada variable o dependiente del pH. También sostiene que la magnitud de la carga depende fundamentalmente del pH y del tipo de coloide.

Otro origen del incremento de las cargas negativas cuando el pH aumenta corresponde a la remoción de las cargas positivas del complejo iónico de hidróxido de aluminio ($\text{Al}(\text{OH})_2^+$). A niveles bajos de pH, estos iones forman un obstáculo en los sitios negativos en las arcillas silicatadas (vermiculita) y hacen inasequible el intercambio cationico. Cuando el pH es elevado, el ión $\text{Al}(\text{OH})_2^+$ reacciona con el ión $(\text{OH})^-$ en la solución del suelo formando una molécula insoluble de $(\text{Al}(\text{OH})_3)$, con lo cual libera sitios con carga negativa (BRADY y WEIL, 2000).



Empíricamente, sólo el 5 al 10% de la carga negativa de los silicatos laminares 2:1 depende del pH, en tanto que el 50% o más de la carga generada en los minerales 1:1 puede depender del pH (BOHN, 1993).

El alófan, como óxido hidratado amorfo con área superficial grande, también genera carga que depende del pH. Su carga depende mucho más del

pH que la de los óxidos cristalinos. Los polímeros de hidroxihierro e hidroxialuminio son comunes en suelos ácidos y también generan su carga por interacción con la solución de suelo. Estos polímeros son los que producen principalmente carga que depende del pH, aun en suelos intemperizados moderadamente (BOHN, 1993).

La formación de la carga en la materia orgánica es extensa y depende totalmente del pH. Está relacionada primordialmente con la disociación del H^+ de los grupos carboxílicos y fenólicos (BOHN, 1993).

2.7 Repulsión aniónica.

La repulsión aniónica desde la superficie coloidal es producida por la presencia de cargas negativas en la superficie de los coloides del suelo y es afectada por el pH del suelo, densidad de las cargas negativas del suelo, valencia de los aniones y presencia de cationes intercambiables (TAN, 1998). Esta repulsión es determinante en la presencia de aniones en la solución del suelo, produciendo una disponibilidad inmediata de éstos y su escasa retención por la matriz del suelo. Ello implica que los aniones frente a cargas negativas tendrán un bajo efecto residual, ya que si no son absorbidos por los cultivos podrían perderse a través de lixiviación desde el suelo (BRADY y WEIL, 2000).

3 MATERIAL Y METODO

3.1 Ubicación del ensayo.

El acondicionamiento de las muestras de suelo se realizó en el Laboratorio de Suelos de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Austral de Chile, posteriormente la aplicación de herbicidas e incubación de suelo se llevó a cabo en el Laboratorio de Microbiología de la Universidad Austral de Chile.

3.2 Muestras de suelo.

Se utilizaron muestras de suelo pertenecientes a las Serie Fresia (Paleohumult) y Serie Malihue (Hapludand). Las muestras de suelo Fresia se recolectaron desde un sector ubicado en la carretera que une Fresia con Puerto Varas, a 30 km. del pueblo de Fresia. Las muestras de la serie Malihue fueron recolectadas desde el fundo Punahue ubicado en la carretera que une Los Lagos con Riñihue, específicamente a 29 km de Los Lagos. Dentro del predio se sacaron las muestras en el potrero llamado "Los Novillos". Ambas muestras de suelo correspondieron a los 10 primeros centímetros de profundidad, habiendo con anterioridad retirado la capa vegetal superficial de 1 cm.

3.3 Acondicionamiento de las muestras.

Las muestras de los dos suelos fueron secadas a 35° C durante 7 días. Luego fueron tamizadas a 4 mm. Posteriormente se realizó una esterilización de ambos suelos con bromuro de metilo. El proceso duró 48 horas para cada uno de los suelos.

3.4 Análisis preliminares.

En ambos suelos se midió el pH inicial de cada suelo, así como la humedad inicial de las muestras de suelo y su capacidad máxima de retención de humedad. La capacidad máxima de retención de agua se midió, saturando el suelo en macetas de 500 ml, selladas con polietileno evitando pérdidas por evaporación. Estas se dejaron drenar 48 horas, luego se extrajeron submuestras del centro de la maceta y se secaron en horno a 105° C hasta llegar a un peso constante. Por diferencia de peso se determina la cantidad de agua retenida como la capacidad máxima de retención de agua para cada suelo.

En el Cuadro 1 se muestran las características químicas y físicas principales de las muestras de suelos estudiadas. Todos los análisis fueron realizados en el laboratorio de suelos de la Facultad de Ciencias Agrarias durante el año 2003.

3.5 Características del ensayo.

Se utilizó el modelo de bioensayo de STORK y HANNA (1996) y revalidado por SHIBART (2000), quienes usaron la variación del largo radical de una especie vegetal como un indicador biológico de la respuesta a dosis crecientes de herbicida. Los valores son ajustados a curvas logísticas. En las curvas se determinó la dosis de herbicida que inhibe el 50% del crecimiento radical de arveja (*P. sativum* L.) en los distintos tratamientos con encalado (IC_{50}) y se comparó con el valor de IC_{50} del sustrato inerte. El sustrato inerte (cuarzo) no presentaría adsorción y dado que fue previamente esterilizado no tendría una degradación biológica significativa, se asume que la disipación del herbicida en esa condición es mínima. De esa manera, se supone que la diferencia entre los IC_{50} del testigo y los IC_{50} de los tratamientos permiten

obtener una medición de la cantidad de herbicidas adsorbido por el suelo en cada una de las condiciones de encalado.

3.6 Diseño experimental.

Se realizaron dos experimentos idénticos, uno para cada suelo. Cada experimento tuvo un diseño completamente al azar con tratamientos dispuestos en un arreglo factorial 2 x 4 x 11 con cinco repeticiones. Los factores correspondieron a dos tipos de herbicidas, por cuatro niveles de enmienda calcárea por 11 dosis de herbicidas. En cada experimento se agregaron dos testigos uno para cada herbicida. Este testigo correspondió a una secuencia de 11 dosis de herbicida en un sustrato inerte de cuarzo.

3.7 Control

Como testigo o sustrato inerte se utilizó arena de cuarzo, tamizado a 2 m. Debido a la naturaleza completamente silícica del cuarzo se asume que no presenta adsorción, ni carga variable y por lo tanto que el 100% de la dosis aplicada se encontraría disponible en la solución del suelo. Además, por no existir posibilidad de lixiviación se asume que el 100% esta disponible.

Para evitar alguna degradación microbial se realizó una esterilización del cuarzo con bromuro de metilo durante 48 horas, bajo condiciones de sellado hermético. Se midió la humedad inicial y la capacidad máxima de retención de agua del cuarzo de la misma forma descrita para los suelos.

CUADRO 1 Características químicas y físicas de las muestras de suelo Malihue y Fresia utilizados en el estudio.

Características	Suelo Malihue	Suelo Fresia
Materia orgánica (g 100 g ⁻¹)	16	11
Fósforo Olsen (mg kg ⁻¹)	2.0	3.2
pH (agua)	5.22	5.55
Ca (cmol+ kg ⁻¹)	2.191	1.940
Mg (cmol+ kg ⁻¹)	0.728	0.252
K (cmol+ kg ⁻¹)	0.235	0.066
Na (cmol+ kg ⁻¹)	0.10	0.046
Aluminio Intercambiable (cmol+ kg ⁻¹)	0.115	1.723
Arena (g 100 g ⁻¹)	10	4.4
Limo (g 100 g ⁻¹)	62.1	32.1
Arcilla (g 100 g ⁻¹)	27.9	63.5
Densidad aparente (g cm ⁻³)	0.65	0.72
Capacidad máxima de retención (g 100 g ⁻¹)	122	78

3.8 Herbicidas utilizados.

Los Herbicidas utilizados corresponden a un producto comercial de triasulfuron y metsulfuron – metil. Ambos se aplicaron en 11 dosis crecientes e iguales para cada suelo. Las dosis utilizadas se muestran en el Cuadro 2.

CUADRO 2 Dosis de herbicidas utilizadas en ambos suelos.

Dosis	Dosis equivalente de herbicida mg ia/kg s.s.	
	Suelo Malihue	Suelo Fresia
1	0	0
2	0.008	0.012
3	0.02	0.036
4	0.07	0.109
5	0.22	0.328
6	0.66	0,98
7	1.97	2.95
8	5.92	8.85
9	17.76	26.57
10	53.29	79.71
11	159.88	239.13

s.s. = suelo seco

3.9 Enmienda calcárea.

Como enmienda se utilizaron 4 dosis de hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), el cual se caracteriza por ser inmediatamente hidrolizable y tener un efecto rápido sobre la variación del pH. Las dosis de hidróxido de calcio se muestran en el Cuadro 3, junto con una comparación con el equivalente en carbonato de calcio (CaCO_3), debido a que esta última es la enmienda mas utilizada en términos prácticos por los agricultores de la zona estudiada.

CUADRO 3 Dosis de Ca(OH)_2 y CaCO_3 en t ha^{-1} .

Dosis Ca(OH)_2 (t ha^{-1})	Dosis equivalente de CaCO_3 (t ha^{-1}) 1)
0	0
1,9	2,5
3,7	5,0
7,4	10,0

3.10 Indicador biológico.

La especie indicadora corresponde a *Pisum sativum* L. cv. Calle – Calle, creada por la unidad experimental Santa. Rosa. La elección de arveja se debe a que SHIBART (2000) determinó mediante un bioensayo que la especie *Pisum sativum* L. es susceptible a la aplicación de las sulfonilureas y que representa adecuadamente el efecto de la dosis como toxicidad en el largo radical. Adicionalmente esta especie presenta un alto porcentaje de germinación (98%).

3.11 Preparación de la unidad experimental

Se separaron ambos suelos en cuatro bolsas de polietileno de 10 kg cada una aproximadamente. A cada bolsa se le agregó la dosis de Ca(OH)_2 correspondiente en cristales. Estas Muestras se dejaron incubando a 35°C durante 48 horas, con una humedad inicial de 10% bss para el suelo Fresia y de un 13% para el suelo Malihue. Al término de la incubación se midió el pH de cada uno de los tratamientos de dosis de cal aplicada a los suelos estudiados.

Con las muestras de suelo en distintos niveles de pH se realizó el llenado de las unidades experimentales, que correspondieron a vasos plásticos de 300 ml, cada vaso se llenó con 150 g. de suelo.

Posteriormente en el Laboratorio de Microbiología de la Universidad Austral de Chile se aplicó el herbicida respectivo en 11 dosis para cada suelo y al control cuarzo, con cinco repeticiones. Finalmente, se adiciono agua hasta alcanzar una humedad correspondiente al 90% de la capacidad máxima de retención. Posteriormente cada vaso fue sellado con polietileno presionado con tapas de esponja. La incubación se llevo a cabo en dos cámaras bioclimaticas en ausencia de luz y duró 8 días a una temperatura constante de 25° C. Posteriormente se realizó la medición del largo radical con un pie de metro.

3.12 Análisis de datos

Con los valores de largo radical de cada tratamiento y repetición, se construyeron curvas logísticas en función de la dosis de herbicida versus la disminución relativa del largo radical. La disminución relativa se expresó en términos porcentuales, siendo el 100% del largo radical correspondiente al de la dosis 0 en cada repetición. Estos valores fueron Ajustados de acuerdo al método descrito por STORK y HANNA (1996). La función logística utilizada fue ($y = a + c / (1 + e^{b(x-m)})$), donde **y** es el largo radical relativo del bioensayo, los coeficientes **a+c** y **a** son las mayores y menores asíntotas de la curva, respectivamente, el coeficiente **b**, es la gradiente de la curva, el coeficiente **m** = $\ln(IC_{50} + 1)$ es el punto de inflexión horizontal a mitad de camino entre **a+c** y **a**, y **x** es la transformación logarítmica de la concentración de herbicida aplicada. De esa manera, usando el programa GRAPHPAD PRISM 4.0 se ajustaron las regresiones y se determino la dosis que inhibe el 50% del crecimiento radicular (IC_{50}) en los distintos tratamientos (Figura 1). Al proyectar el 50% de disminución radical hacia el eje de las ordenadas (X), se obtiene la dosis que inhibe el 50% del crecimiento radical (IC_{50}).

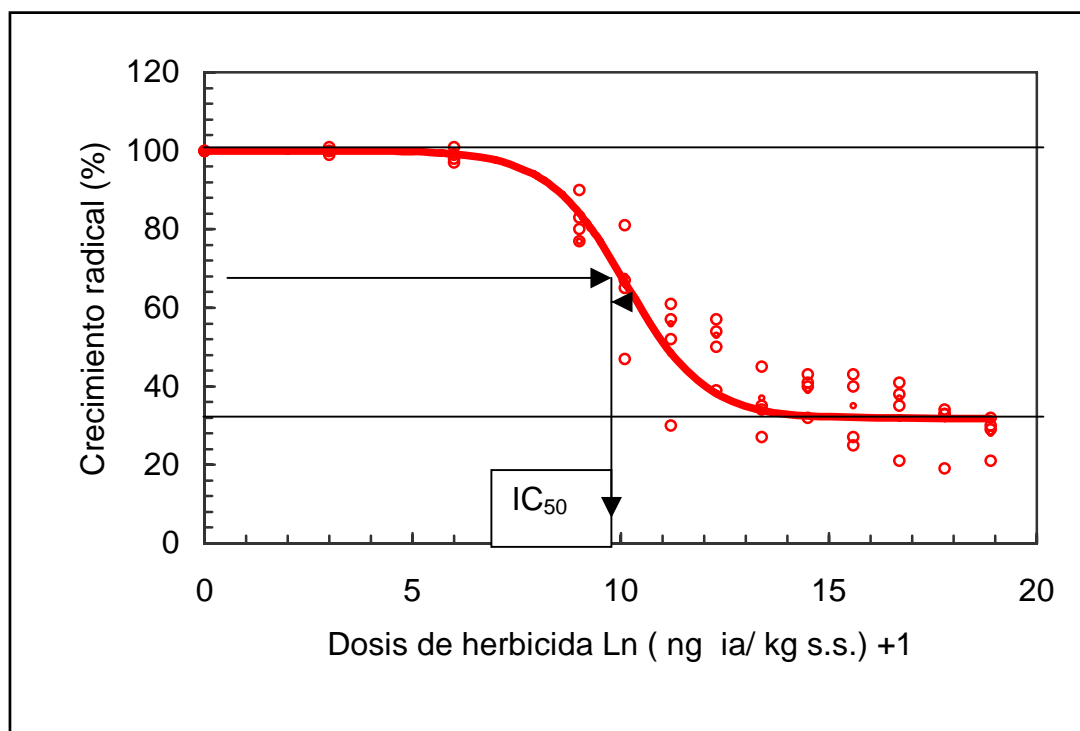


FIGURA 1 Disminución relativa del largo radical en presencia de dosis crecientes de herbicida.

Luego de obtenidos los distintos IC_{50} por repetición se les aplicó un análisis de varianza multifactorial, de acuerdo al diseño experimental utilizado con el programa STATGRAPHIC 2.0 y se determinó a través de un test de medias (Tukey 5%) para determinar diferencias significativas entre las medias de los distintos tratamientos.

3.13 Obtención de la constante de equilibrio o Kd.

El Kd se calculó mediante el procedimiento utilizado por WALKER *et al.* (1989), quienes expresan la concentración de equilibrio del metsulfuron – metil y triasulfuron en el suelo mediante el coeficiente de distribución (Kd), calculado desde la cantidad adsorbida por unidad de peso de suelo seco (ng i a/kg s.s.), dividido por la concentración de la solución (ng i a/ L).

La cantidad adsorbida se obtiene de la diferencia entre el IC₅₀ del testigo con el IC₅₀ del tratamiento y se utilizó la concentración en solución correspondiente al IC₅₀ del cuarzo en un litro de solución.

4 PRESENTACION Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados obtenidos del bioensayo que midió el efecto de cuatro dosis de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ aplicadas a dos series de suelo y su testigo, sobre la disponibilidad de dos herbicidas (metsulfuron – metil y triasulfuron), pertenecientes al grupo de las sulfonilureas.

4.1 Suelo Malihue

Las dosis de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ que se aplicaron a muestras del suelo Malihue alcanzaron rápidamente a presentar diferencias en el pH del suelo. De esta manera, los valores de pH utilizados como tratamiento se muestran en el Cuadro 4.

CUADRO 4 Variación de pH en muestras del suelo Malihue en función de la dosis de $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Dosis de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (t ha^{-1})	pH del suelo en agua
0	5.22
1.9	5.49
3.7	5.72
7.4	6.18

Los valores obtenidos en el Cuadro 4 indicarían que para aumentar el pH del suelo Malihue en 0.1 en los primeros 20 cm. de suelo se necesitan alrededor de entre $0.7 - 0.77 \text{ t ha}^{-1} \text{ Ca}(\text{OH})_2$.

4.1.1 Coeficientes del modelo utilizado y curvas de respuesta del metsulfuron – metil y triasulfuron en el suelo Malihue. A continuación se presentan los coeficientes del modelo (Cuadro 5) y las curvas de respuesta obtenidas en el suelo Malihue (Figura 2), bajo distintos niveles de encalado.

Los valores que se presentan como IC50 en ambos casos, están expresados en el Ln ((Dosis ng i a/kg s s)+1), que corresponden a la dosis que inhibe el 50% del crecimiento radical.

4.1.1.1 Coeficientes del modelo y curvas de respuesta del metsulfuron – metil. En el Cuadro 5 y Figura 2 se muestran los coeficientes de la ecuación y los IC₅₀ del modelo utilizado. En la Figura 2 se puede observar el ajuste de curvas realizado en el programa estadístico GRAPHPAD PRISM 4,0.

El coeficiente de determinación en todos los casos fue mayor a 0.96, (Cuadro 5) esto indicaría que el modelo descrito por STORK y HANNA (1996) se ajustó bien a la relación entre la reducción del tamaño radical y la dosis de herbicida. Los resultados de los IC₅₀ obtenidos en los distintos encalados presentaron diferencias, lo cual indicaría que las dosis que inhiben el 50% del crecimiento radical varían según la dosis de cal aplicada al suelo. De esta manera, a mayor dosis de encalado se necesitaría una menor dosis de herbicida para lograr el mismo efecto que a encalados menores.

CUADRO 5 Coeficientes de regresión del modelo de curvas de respuesta utilizados para metsulfuron – metil bajo distintas dosis de encalado en el suelo Malihue.

Coeficientes	Dosis de Ca(OH) ₂ t ha ⁻¹				
	0	1.9	3.7	7.4	Cuarzo
m(IC ₅₀)	10.13	9.16	8.58	8.17	7.29
a	31.85	19.49	29.03	21.72	12.67
c	100	100	100	100	100
b	-0.46	-1.01	-0.84	-0.61	-0.61
Coeficiente de determinación (r ²)	0.97	0.98	0.96	0.98	0.99

La Figura 2 presenta las reducciones relativas (%) del tamaño de la raíz obtenidas en cada uno de los tratamientos, bajo distintas dosis de herbicida. Los IC₅₀ fueron obtenidos desde el 50% de la reducción relativa proyectada hacia el eje de las X (ordenadas).

Se puede apreciar como la curva del control (cuarzo) comienza a caer antes que los tratamientos con encalado, posteriormente es seguido por la curva del tratamiento con un encalado de 7.4 t ha⁻¹ de Ca(OH)₂, luego el tratamiento de 3.7 t ha⁻¹ de Ca(OH)₂, 1.9 t ha⁻¹ y finalmente el tratamiento sin encalado.

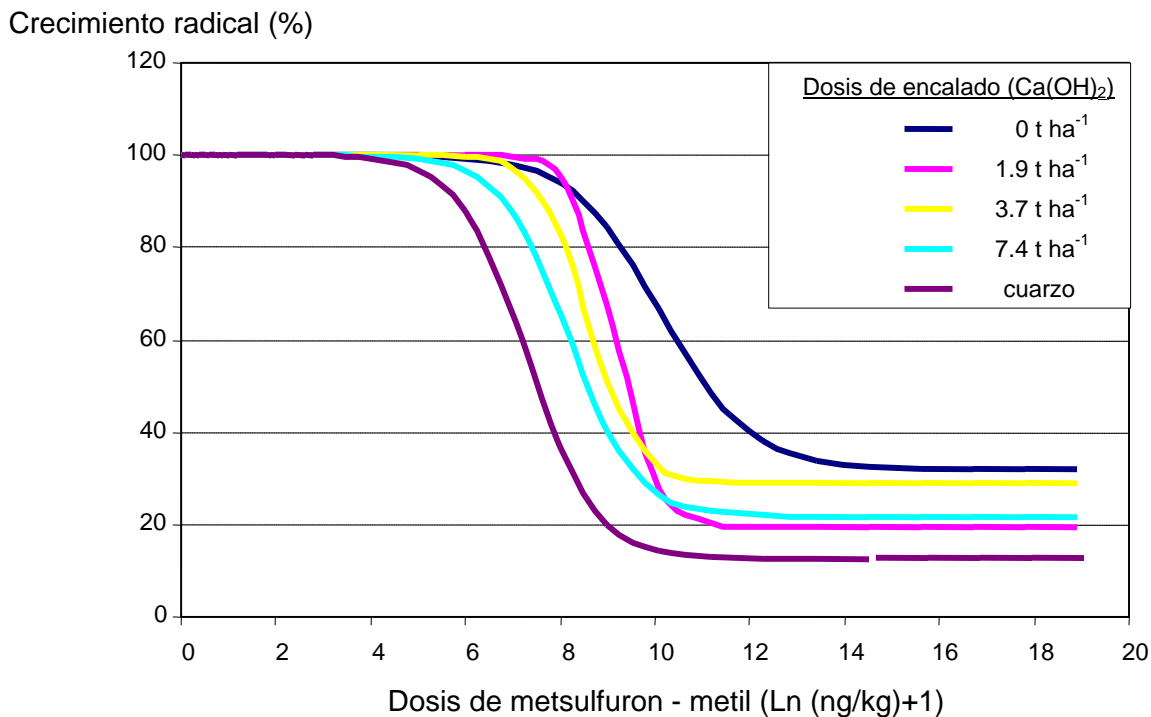


FIGURA 2 Disminución relativa (%) del largo de raíz de arveja en presencia de dosis crecientes de metsulfuron – metil en el suelo Malihue.

Esto indicaría que las raíces de arveja comienzan a reflejar una disminución de su tamaño en presencia de dosis menores de metsulfuron - metil en el testigo. Esto debido fundamentalmente a que el cuarzo no presenta ningún tipo de adsorción de herbicida y por lo tanto la dosis se encuentra 100% disponible y de esa manera necesita de dosis más bajas para lograr una disminución del 50% del crecimiento de las raíces (IC_{50}). Luego el suelo sin tratamiento (0 t) presentó la mayor diferencia de IC_{50} con el cuarzo debido a la naturaleza adsorptiva del suelo Malihue, el cual corresponde a un suelo trumao que se caracteriza por tener arcillas reactivas (alofan) y alto contenido de materia orgánica. Al agregar 1.9 t ha^{-1} de Ca(OH)_2 al suelo Malihue el IC_{50} disminuye, lo cual se debería fundamentalmente al aumento del pH lo cual produce que la superficie coloidal comience a aumentar las cargas negativas provocando un fenómeno de repulsión electrostática de las moléculas de metsulfuron – metil hacia la solución del suelo. De esa manera el suelo Malihue

bajo esa condición de pH necesita una menor dosis de herbicida para lograr el 50% de la inhibición del crecimiento radical. Lo mismo sucede a medida que se aumenta la dosis de enmienda calcárea, el suelo comienza a aumentar el pH y la repulsión aniónica, lo que dejaría aun más en evidencia la disminución del IC_{50} .

4.1.1.2 Coeficientes del modelo y curvas de respuesta del triasulfuron. Se calcularon los coeficientes y se ajustaron las curvas correspondientes a la disminución relativa del tamaño radical en presencia de 11 dosis triasulfuron. De esa manera en el Cuadro 6 se presentan las dosis que inhiben el 50% del crecimiento radical (IC_{50}). También se presenta el coeficiente de determinación que presenta la ecuación. El coeficiente de determinación permite establecer que en cada uno de los tratamientos las curvas se ajustaron correctamente, lo cual indicaría que el modelo utilizado en el bioensayo representa la relación existente entre la reducción del tamaño de la raíz y la dosis de triasulfuron.

CUADRO 6 Coeficientes de regresión del modelo de curvas de respuesta utilizados para triasulfuron bajo distintas dosis de encalado en el suelo Malihue.

Coeficientes	Dosis de $Ca(OH)_2$ t ha ⁻¹				
	0	1.9	3.7	7.4	Cuarzo
m(IC_{50})	9.51	9.27	8.91	7.91	5.68
a	23.92	20.83	17.66	18.17	12.63
c	100	100	100	102	117
b	-0.89	-0.49	-0.37	-0.25	-0.13
Coeficiente de determinación (r^2)	0.99	0.98	0.97	0.98	0.99

La Figura 3 presenta la reducciones relativas (%) alcanzadas por las raíces del indicador biológico (*P. sativum* L.) en presencia de dosis creciente de triasulfuron. Estas curvas son alcanzadas bajo distintas condiciones encalado.

Al igual que en el caso del metsulfuron – metil, los IC_{50} se obtienen de la proyección hacia el eje de las X del 50% de la reducción relativa. De esta manera nuevamente se observan diferencias entre las dosis de cal. Lo cual indicaría que las dosis de triasulfuron en el suelo Malihue, de la misma manera que el metsulfuron – metil, se ven afectadas según sea la condición de encalado del suelo.

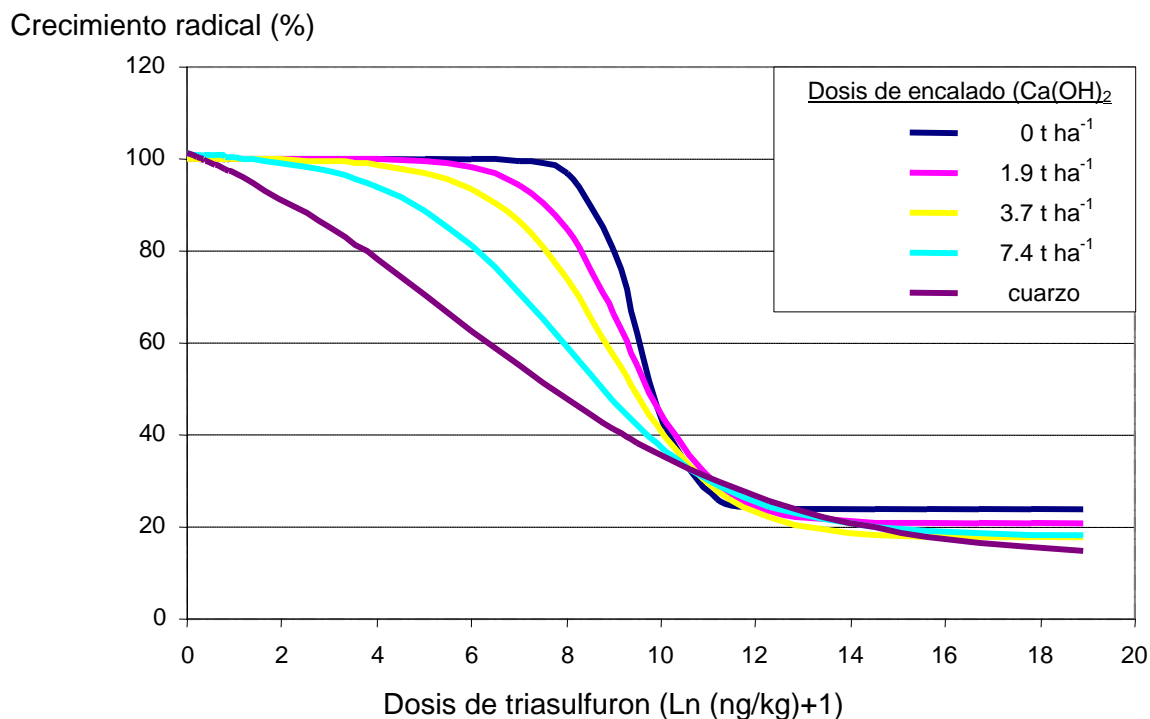


FIGURA 3 Disminución relativa (%) del largo de raíz de arveja en presencia de dosis crecientes de triasulfuron en el suelo Malihue.

La curva del control (cuarzo) es la primera en decrecer, seguida por los tratamientos 7.4, 3.7, y 1.9 ton ha^{-1} de Ca(OH)_2 respectivamente.

4.1.2 Efecto del encalado sobre el IC₅₀ de metsulfuron – metil y triasulfuron en el suelo Malihue. En el Cuadro 7 se pueden ver los valores (IC₅₀) para metsulfuron – metil y triasulfuron bajo distintas dosis de Ca(OH)₂.

Los IC₅₀ de metsulfuron – metil y triasulfuron disminuyen significativamente con el aumento de la dosis de Ca(OH)₂.

Al aumentar la dosis de encalado aumentó también el pH, lo cual trae consigo una mayor capacidad de intercambio de cationes (CIC), y a la vez un aumento en la repulsión aniónica, afectando directamente la adsorción del herbicida. Esto provocaría que la dosis que inhibe el 50% del crecimiento radical haya sido mayor en un suelo con pH más bajo, debido principalmente al gran poder adsorptivo que presenta el suelo a pH más bajo. Este resultado concuerda con WALKER *et al.* (1988), quienes encuentran una correlación negativa entre la adsorción de herbicida y el pH. A su vez WALKER y WELCH (1989), encontraron que a valores altos de pH, los herbicidas metsulfuron – metil y clorsulfuron se comportan como moléculas aniónicas y son débilmente adsorbidos por el suelo.

Al presentar el suelo una débil adsorción, existiría un aumento de la presencia de herbicida en la solución junto con esto una mayor disponibilidad. A su vez el triasulfuron también presentó diferencias en cuanto a su adsorción, esto se explicaría de la misma forma que el metsulfuron – metil, debido a que ambas moléculas no difieren mucho una de la otra en cuanto a su estructura química molecular. En el Cuadro 7 también se observó como en el suelo en estado natural (sin encalado) el herbicida metsulfuron – metil necesitó de una dosis muy alta (25.134 ng i a kg⁻¹) para lograr el mismo efecto que logró una dosis de 3.544 (ng i a kg⁻¹) con un encalado de 7.4 t ha⁻¹ de Ca(OH)₂, al calcular la dosis de IC₅₀ al total equivalente en una hectárea de suelo con una

profundidad de 10 cm y una densidad aparente de 0.6 g cm^{-3} para el suelo Malihue se puede observar que una dosis de 15 g ha^{-1} en condiciones naturales inhibe el 50% del crecimiento, sin embargo al tener una dosis de encalado de 7.4 t ha^{-1} de Ca(OH)_2 la dosis se reduce a 2 g ha^{-1} . Esto indicaría que el herbicida metsulfuron – metil en condiciones naturales presenta una alta adsorción en el suelo, y que logra quedar rápidamente disponible a medida que el encalado se incrementa en el suelo.

CUADRO 7 Valores del IC_{50} de metsulfuron – metil y triasulfuron con diferentes dosis de encalado en el suelo Malihue.

Herbicida (unidad)	Dosis de Ca(OH)_2 (t ha^{-1})				
	0	1.9	3.7	7.4	Cuarzo
metsulfuron-metil IC_{50}					
(Ln (ng/kg+1))	10 .13a*	9.17b	8.59c	8.17d	7.29e
(ng/kg s.s.)	25.134	9.586	5.353	3.544	1.469
(g ha^{-1})	15	6	3	2	1
triasulfuron IC_{50}					
(Ln (ng/kg+1))	9.51a	9.27b	8.91c	7.91d	5.68e
(ng/kg s.s.)	13.520	10.708	7.414	2.732	292
(g ha^{-1})	8	6	4	2	0.2

* = Letras diferentes en la fila indican diferencias significativas (P 0.05) por el test de tukey

Según GUNTER *et al.* (1989), los IC_{50} de metsulfuron – metil y triasulfuron son mayores en suelos con alto contenido de materia orgánica.

El triasulfuron presentó diferencias de IC_{50} menos marcada y más proporcionales que el metsulfuron – metil. Esto se puede apreciar mejor en la Figura 4 donde se observa la tendencia de la curva del metsulfuron – metil a caer en forma más brusca, en cambio la tendencia del triasulfuron es más lineal.

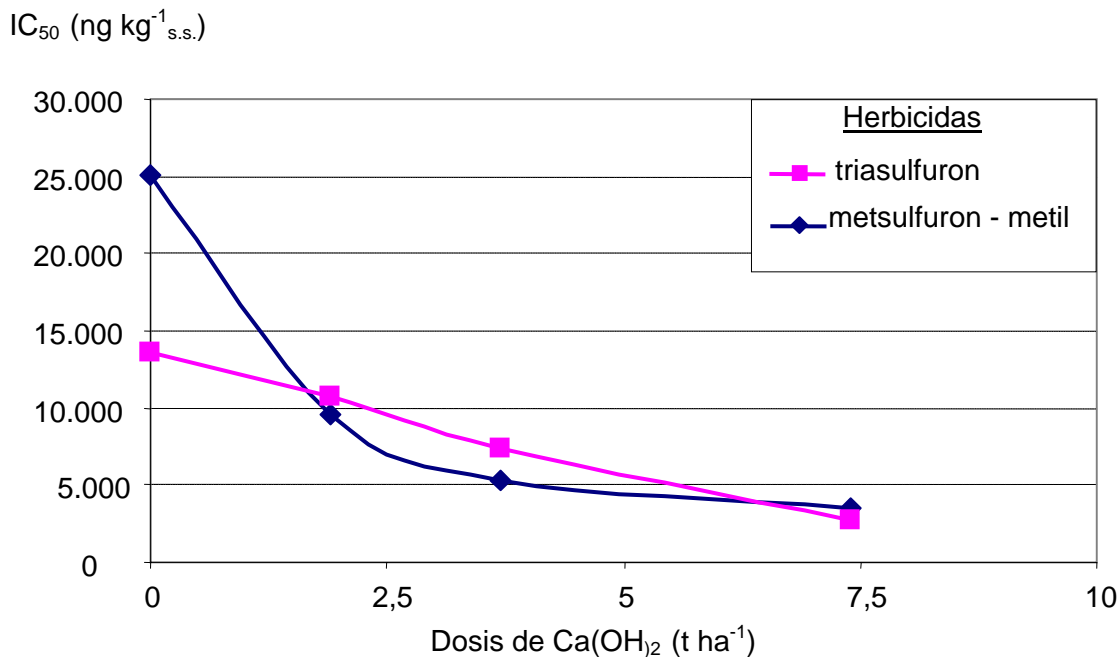


Figura 4 Efecto de la dosis de Ca(OH)₂ sobre el IC_{50} de metsulfuron-metil y triasulfuron en el suelo Malihue.

4.1.3 Efecto del pH sobre la adsorción de metsulfuron – metil y triasulfuron en el suelo Malihue.

El efecto del pH sobre la adsorción de metsulfuron – metil y triasulfuron queda en evidencia en la Figura 5. A pesar de aumentar el pH desde 5.22 hasta 6.18, sigue existiendo una gran adsorción de herbicida por parte del suelo Malihue. Esto se debe al alto contenido de materia orgánica (16%) y a la naturaleza de las arcillas presentes en el suelo Malihue (alofan). Aun así se observa una clara tendencia a la disminución de la adsorción de herbicida bajo condiciones de pH mas alto, esto indicaría que al

disminuir la adsorción el herbicida queda presente en la solución del suelo aumentando su disponibilidad, lo cual mejora la eficiencia del herbicida para controlar malezas o simplemente es lixiviado a capas más profundas de suelo o regímenes de agua subterránea.

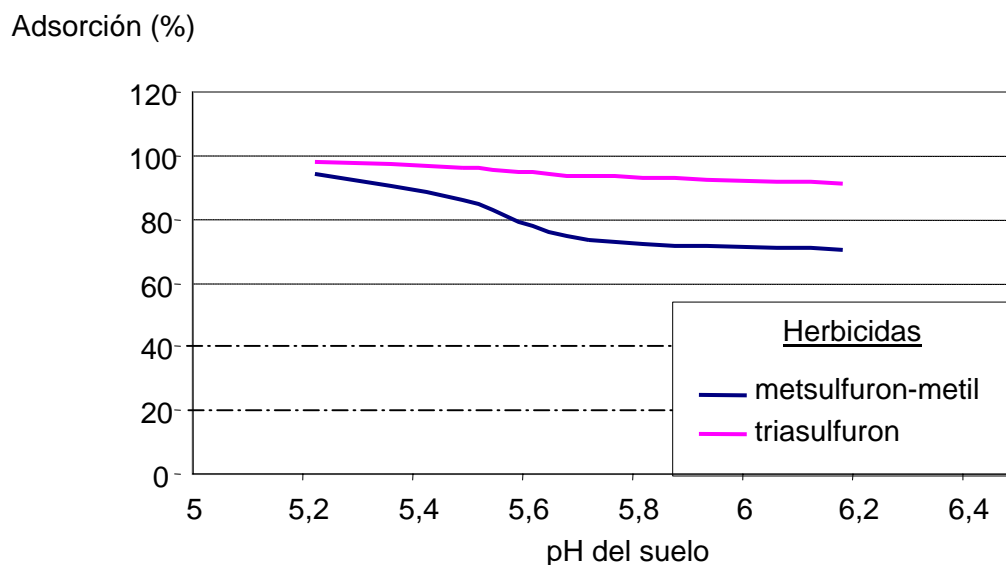


FIGURA 5 Variación de la adsorción de metsulfuron – metil y triasulfuron bajo distintas condiciones de pH, en el suelo Malihue.

4.1.4 Variación de la disponibilidad relativa (%) de metsulfuron – metil y triasulfuron por efecto del encalado, en el suelo Malihue. En la Figura 6, se observa que el suelo Malihue tiene una gran respuesta al encalado, logrando diferencias en la disponibilidad de herbicida.

Lo más relevante de los resultados presentados en el Figura 6 corresponde al aumento que presentan ambos herbicidas en la disponibilidad, a medida que aumenta el encalado. Esta mayor disponibilidad sería la respuesta del suelo a la disminución de su capacidad de adsorber aniones provocado por el aumento artificial del pH, de esta forma el herbicida que antes estaba adsorbido por las cargas positivas de los coloides a pH más bajo, en

condiciones de pH más alto, fue repelido por la matriz coloidal provocando un mayor daño en el desarrollo radical del indicador biológico (*Pisum sativum* L., var Calle-Calle).

Disponibilidad relativa (%)

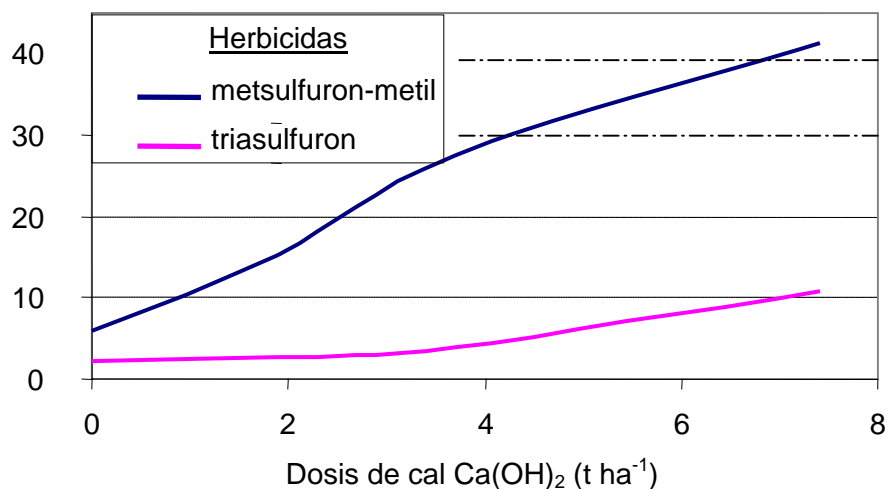


FIGURA 6 Variación de la disponibilidad de metsulfuron – metil y triasulfuron bajo distintas dosis de encalado

En general la tendencia es que el metsulfuron – metil este menos disponible que el triasulfuron en el suelo Malihue (URRUTIA, 2001).

4.1.5 Efecto del encalado con Ca(OH)₂, sobre el Kd de metsulfuron – metil y triasulfuron en el suelo Malihue. En el cuadro 8 se muestran los datos de Kd obtenidos bajo distintas condiciones de encalado.

Estos resultados dejarían en evidencia como el Kd disminuyó a medida que aumentó la dosis de encalado. Esto comprobaría como la dosis presente en la solución del suelo comienza a aumentar con relación a la dosis adsorbida.

CUADRO 8 Valores de Kd para metsulfuron – metil y triasulfuron por efecto de diferentes dosis de encalado con Ca(OH)₂ en el suelo Malihue.

Herbicidas	Dosis de Ca(OH) ₂ (t ha ⁻¹)			
	0	1.9	3.7	7.4
metsulfuron – metil	0.88	0.30	0.14	0.08
triasulfuron	2.89	2.28	1.56	0.53

Los datos del Cuadro 8 coinciden con datos obtenidos con anterioridad (URRUTIA, 2001), donde los Kd de metsulfuron – metil fueron menores que los Kd de triasulfuron bajo distintas dosis de PO₄⁻².

4.2 Suelo Fresia

A continuación se presentan y se discuten los resultados obtenidos en el suelo Fresia. Los pH alcanzados en el suelo Fresia en los distintos tratamientos con Ca(OH)₂ se describen en el Cuadro 9.

CUADRO 9 Variación de pH en muestras del suelo Fresia en función de la dosis de Ca(OH)₂.

Dosis de Ca (OH) ₂ (t ha ⁻¹)	pH del suelo en agua
0	5.55
1.90	6.17
3.70	6.66
7.40	7.22

En términos generales el suelo Fresia presenta un nivel de fósforo inicial mayor que el suelo Malihue (Cuadro 1), lo cual afecta la adsorción específica que pudiera existir entre sitios activos de las arcillas y la materia orgánica con el metsulfuron – metil y triasulfuron. Según URRUTIA (2001), existe una

competencia adsorptiva entre las moléculas de herbicida y el ión fosfato, por lo tanto al haber más fosfatos en el suelo existiría una menor adsorción de moléculas de metsulfuron – metil y triasulfuron.

4.2.1 Coeficientes del modelo utilizado y curvas de respuestas del metsulfuron – metil y triasulfuron en el suelo Fresia. A continuación se presentan los coeficientes de las curvas de respuestas obtenidos en el ensayo realizado en el suelo Fresia con los herbicidas metsulfuron – metil y triasulfuron.

4.2.1.1 Coeficientes del modelo y curvas de respuesta del metsulfuron – metil.

Los coeficientes de la ecuación del modelo utilizado se presentan en el Cuadro 10 junto a los IC_{50} . A su vez se entregan los valores del coeficiente de determinación (r^2) para cada tratamiento.

CUADRO 10 Coeficientes de regresión del modelo de curvas de respuesta utilizados para metsulfuron - metil bajo distintas dosis de encalado en el suelo Fresia.

Coeficientes	Dosis de $Ca(OH)_2$ t ha ⁻¹				
	0	1.9	3.7	7.4	Cuarzo
m(IC_{50})	10.16	9.29	8.64	8.51	7.30
a	40.48	37.90	25.66	15.46	21.66
c	97	100	100	100	101
b	-2.52	-0.82	-1.09	-0.71	-0.30
Coeficiente de determinación (r^2)	0.96	0.93	0.98	0.99	0.99

El coeficiente de determinación alcanzo valores muy alto para todos los tratamientos, lo cual indica que el modelo se ajustó adecuadamente a las

curvas de respuesta. Los IC_{50} disminuyeron a medida que aumentó el encalado. El control presentó el valor de IC_{50} más bajo, lo cual indicaría que el metsulfuron - metil necesitaría de una menor dosis para alcanzar el 50% del daño a nivel de raíz. Esto es debido principalmente a la naturaleza no adsorbtiva del cuarzo.

Las curvas de respuesta se presentan en la Figura 7. En ella se observan las tendencias que siguen las curvas en cada uno de los tratamientos. De este ajuste propuesto por STORK y HANNA (1996) se obtuvieron los IC_{50} para cada tratamiento.

Nuevamente la curva del testigo fue la primera en caer, lo cual indicaría la eficacia del metsulfuron- metil en esa condición, fundamentalmente por la nula adsorción que presenta el cuarzo encontrándose disponible en la solución del suelo Fresia.

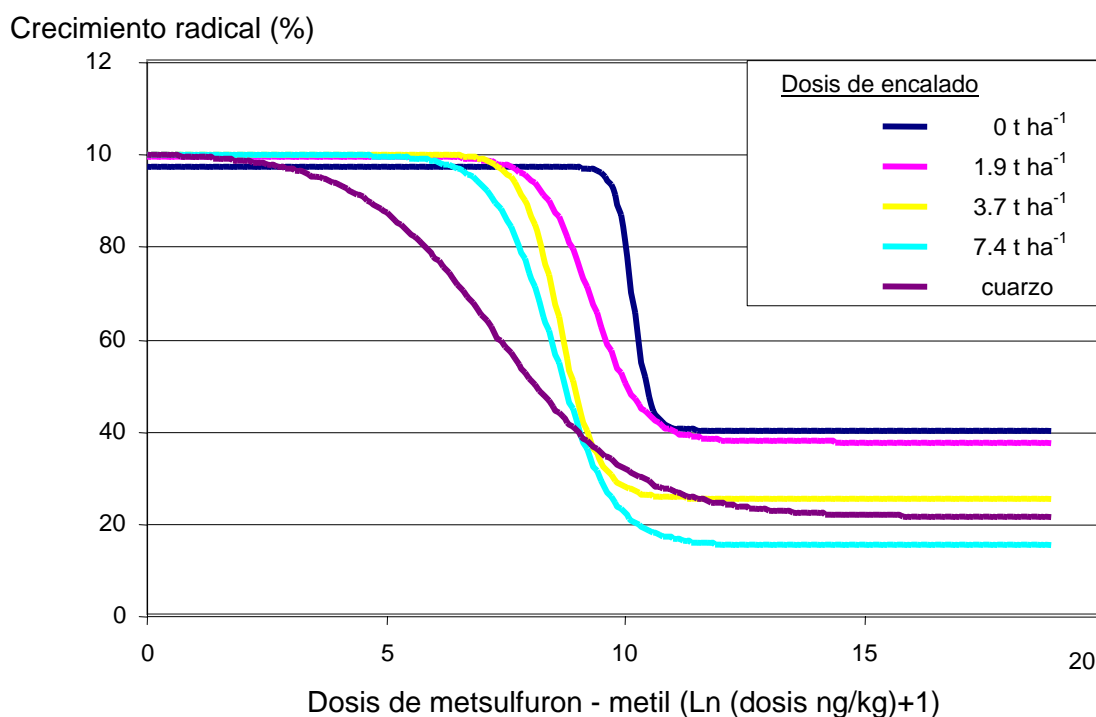


FIGURA 7 Disminución relativa (%) del largo de raíz de arveja en presencia de dosis crecientes de metsulfuron – metil en el suelo Fresia.

La curva más cercana al control (cuarzo) corresponde a las dosis más altas de encalado y la más distinta a la curva del suelo con 0 t ha^{-1} de Ca(OH)_2 . La explicación de porque las curvas de los encalados mayores tienden a estar más cerca del cuarzo es debido fundamentalmente a que las dosis más altas de encalado (3.7 y 7.4 t ha^{-1}) en el suelo Fresia alcanzaron pH más altos (6.66 y 7.22), lo cual influye en la carga variable del suelo, provocando un aumento de las cargas negativas, lo mismo sucede con el metsulfuron – metil, debido al alto nivel de desprotonización que alcanzan las moléculas de herbicida. De esta manera al aumentar las cargas electrostáticas negativas de ambas partes, se produce un fenómeno de repulsión aniónica, lo cual reduce la adsorción del metsulfuron – metil y de esa manera queda presente en mayor cantidad en la solución del suelo.

4.2.1.2 Coeficientes del modelo y curvas de respuesta del triasulfuron Los coeficientes del modelo se obtuvieron en el programa GRAPHPAD PRISM 4.0, estos se pueden observar en el Cuadro 11.

El coeficiente de determinación es para todas las curvas superior a 0.96 , lo cual indicaría que el modelo utilizado se ajusta a los valores obtenidos en el experimento. Se observó diferencias entre los encalados 0 , 1.9 y 3.7 t ha^{-1} , luego el encalado de 7.4 t ha^{-1} no presentó diferencias con el encalado de 3.7 t ha^{-1} . Esto se explicaría debido a que el suelo alcanzo un nivel de pH en el cual ya no existen variaciones significativas en a carga electrostática del suelo (6.66 en agua). La diferencia de adsorción presentada entre los tratamientos que alcanzaron el pH más alto y el control (cuarzo) se explicaría por otro tipo de adsorciones específicas presentada por el suelo Fresia.

CUADRO 11 Coeficientes de regresión del modelo de curvas de respuesta utilizados para triasulfuron bajo distintas dosis de encalado en el suelo Fresia.

Coeficientes	Dosis Ca(OH) ₂ t ha ⁻¹				
	0	1.9	3.7	7.4	Cuarzo
m(IC ₅₀)	9.53	9.01	8.41	8.12	5.69
a	26.65	23.75	19.42	11.30	18.23
c	100	100	100	100	108
b	-0.57	-1.06	-0.42	-0.50	-0.19
Coeficiente de determinación(r ²)	0.97	0.99	0.96	1.00	0.99

La Figura 8 muestra las curvas de respuesta bajo distintas condiciones de encalado en el suelo Fresia. La curva del control (cuarzo) es a nivel del IC₅₀ el valor más bajo, seguido de los tratamientos de mayor a menor encalado. Esto se explicaría porque al aumentar el encalado el suelo alcanza niveles de pH mayores (6.66 y 7.22) (Cuadro 9) disminuyendo la capacidad de adsorción sobre las moléculas de triasulfuron.

En el suelo Fresia las diferencias entre los IC₅₀ del control cuarzo y el tratamiento con mayor encalado es mayor que en el suelo Malihue, esto podría explicarse por el nivel de fósforo inicial de los suelos el cual es mayor en el suelo Fresia, lo que tiende a disminuir los sitios activos de adsorción por acción de los iones fosfato presentes en el suelo.

Crecimiento radical (%)

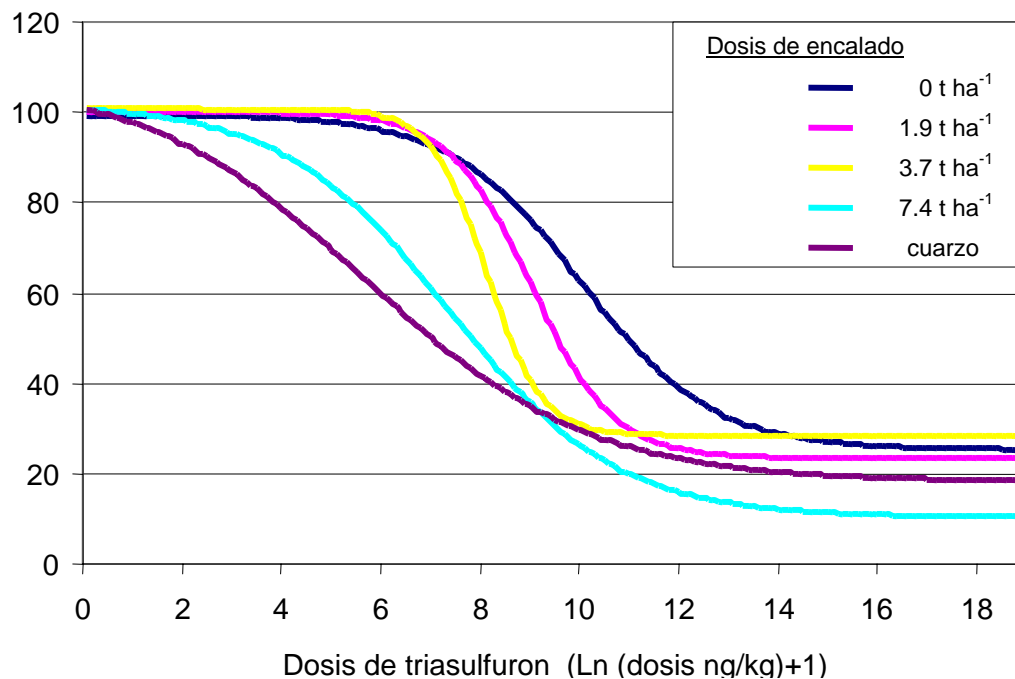


FIGURA 8 Disminución relativa (%) del largo de raíz de arveja en presencia de dosis crecientes de triasulfuron en el suelo Fresia.

4.2.2 Efecto del encalado sobre el IC₅₀ de metsulfuron – metil y triasulfuron en el suelo Fresia.

A continuación se observan en el cuadro 12 los IC₅₀ alcanzados bajo distintas condiciones de encalado del suelo. En este suelo el efecto no fue muy distinto al descrito anteriormente en el suelo Malihue. Al aumentar la dosis de Ca(OH)₂, se provocó el mismo daño radical con dosis menores de herbicida. Esto sucedería debido fundamentalmente al pH alto (6.66 y 7.22) que se alcanza con encalados mayores (Cuadro 9). Esto derivaría en un aumento de la repulsión aniónica de las moléculas de herbicida cargadas negativamente. En el (Cuadro 12) se observa que se obtuvieron diferencias entre los IC₅₀ para la mayoría de los tratamientos, excepto entre el encalado de 3.7 y 7.4 t ha⁻¹ Ca(OH)₂. A pesar que los pH en ambos tratamientos fueron muy distintos alcanzando a 6.66 y 7.22 respectivamente, no se manifestó una diferencia significativa. Como se explicó anteriormente este

fenómeno puede estar dado por la saturación de las cargas electrostáticas del suelo y las diferencias de adsorción entre el control y las dosis de encalado mayores podrían deberse a otro tipo de adsorciones específicas. Al expresar los datos como g ha^{-1} , en 10 cm de profundidad y una densidad aparente para el suelo rojo arcilloso de 0.7 g cm^{-3} se logró apreciar mejor la poca diferencia que existiría en la dosis de herbicida que se debería aplicar en una hectárea con encalados mayores.

CUADRO 12 Valores de IC_{50} de metsulfuron – metil y triasulfuron con diferentes dosis de encalado en el suelo Fresia.

Herbicida (unidad)	Dosis de $\text{Ca(OH)}_2 \text{ t ha}^{-1}$				
	0	1.9	3.7	7.4	Cuarzo
metsulfuron-metil IC_{50}					
(Ln (ng/kg +1))	10.17a*	9.30b	8.64c	8.52c	7.31d
(ng/kg s.s.)	25.977	10.880	5.667	5.006	1.491
(g ha^{-1})	18	8	4	4	1
triasulfuron IC_{50}					
(Ln (ng/kg+1))	9.53a	9.01b	8.40c	8.12c	5.69d
(ng/kg s.s.)	13.783	8.204	4.480	3.368	296
(g ha^{-1})	10	6	3	2	0.2

* = Letras diferentes en la fila indican diferencias significativas (P 0.05) por el test de tukey

En la Figura 9 se puede ver gráficamente la disminución del IC_{50} a medida que aumenta la dosis de Ca(OH)_2 . El aumento de la dosis de encalado produjo una disminución en el IC_{50} de ambos herbicidas, lo cual indica que el pH alcanzado por el suelo varía la carga de los coloides.

Se alcanzaron diferencias en todos los tratamientos, excepto entre las dosis de 3.7 y 7.4 t ha⁻¹ Ca(OH)₂ en ambos herbicidas en el suelo Fresia (Cuadro 12). Esto se explica porque sobre un cierto nivel de pH ya no es claro el efecto electrostático dominado por la carga variable y la diferencia con la disponibilidad total representada por el cuarzo se debe a otro tipo de adsorciones.

IC₅₀ (ng kg⁻¹ s.s.)

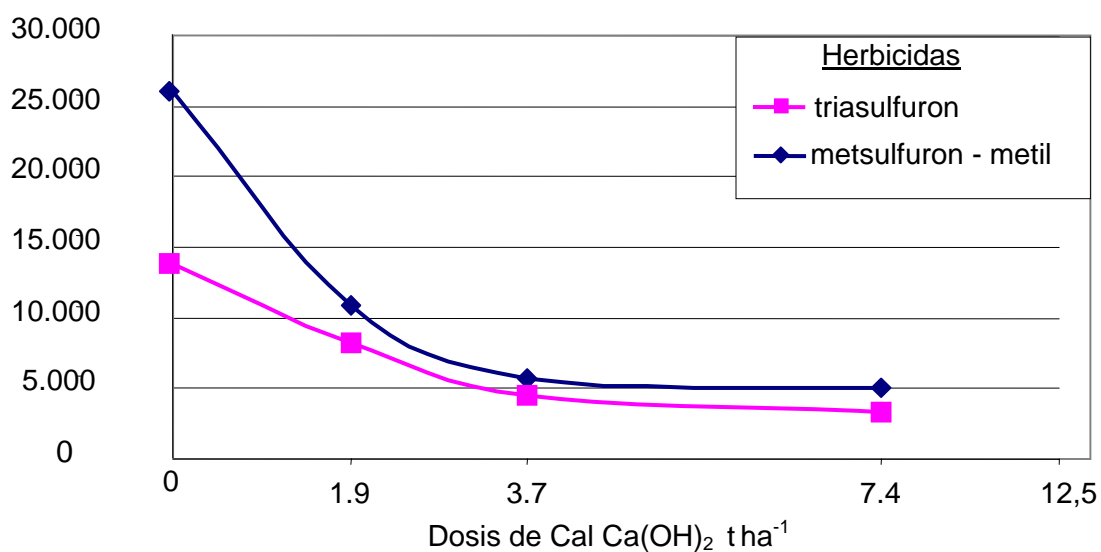


FIGURA 9 Efecto de la Dosis de Ca(OH)₂ sobre el IC₅₀ de metsulfuron – metil y triasulfuron en el suelo Fresia.

4.2.3 Efecto del pH sobre la adsorción de metsulfuron – metil y

triasulfuron en el suelo Fresia. La adsorción de metsulfuron – metil a pH 5.55 fue máxima alcanzando un total 24.486 ng kg⁻¹ s.s., luego decrece bruscamente hasta llegar a una adsorción de 4.176 ng kg⁻¹ s.s. a pH 6.66. Posteriormente no se presentaron diferencias entre los tratamientos a pesar que aún existe una pequeña fracción que se adsorbe. En cuanto a triasulfuron existen las mismas diferencias hasta pH 6.66. Luego no se presentaron

diferencias. Sin embargo, la disminución de la adsorción no es tan brusca en comparación con metsulfuron – metil.

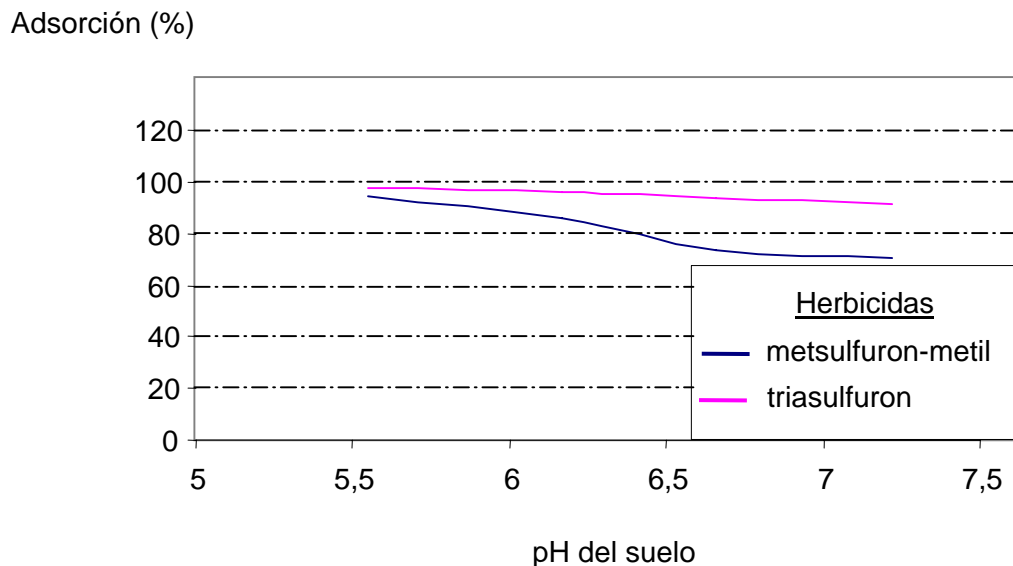


FIGURA 10 Variación de la adsorción de metsulfuron –metil y triasulfuron bajo distintas condiciones de pH, en el suelo Fresia

En ambos herbicidas se produce una estabilización de la adsorción a pH sobre 6,66. Esto se explica debido a la saturación de la carga variable del suelo a este nivel.

4.2.4 Variación de la disponibilidad relativa (%) de metsulfuron – metil y triasulfuron por efecto del encalado, en el suelo Fresia. La figura 11 muestra como con un encalado de 1.9 t ha^{-1} de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ puede mejorar la disponibilidad de metsulfuron – metil desde un 6% hasta un 14%, hasta un 26% con un encalado de 3.7 t ha^{-1} y hasta un 30% con un encalado de 7.4 t ha^{-1} de $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Los pH alcanzados con encalados de 3.7 y 7.4 t ha^{-1} de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ son muy altos para un suelo rojo arcilloso (Cuadro 9), lo cual provocaría una gran repulsión aniónica logrando que a pH sobre 7.22, mas del 30% del herbicida este disponible.

En el caso del triasulfuron, la disponibilidad de herbicida aumento 4 veces desde el tratamiento sin encalado hasta el tratamiento con 7.4 t ha^{-1} de Ca(OH)_2 . Esto indicaría que el suelo Fresia presenta una gran respuesta al encalado en términos de disponibilidad de triasulfuron. La alta carga variable tanto de las arcillas como de la materia orgánica del suelo Fresia, provocaría un aumento de la disponibilidad de herbicida al aumentar el pH con dosis crecientes de enmiendas calcáreas, esto es importante ya que un encalado ayudaría a mejorar la eficiencia de ambos herbicidas. También es importante mencionar que las altas precipitaciones de la zona agroecológica bajo estudio supone una posible lixiviación de moléculas de herbicidas a horizontes de suelo más profundos o a regimenes de agua subterránea.

Disponibilidad relativa (%)

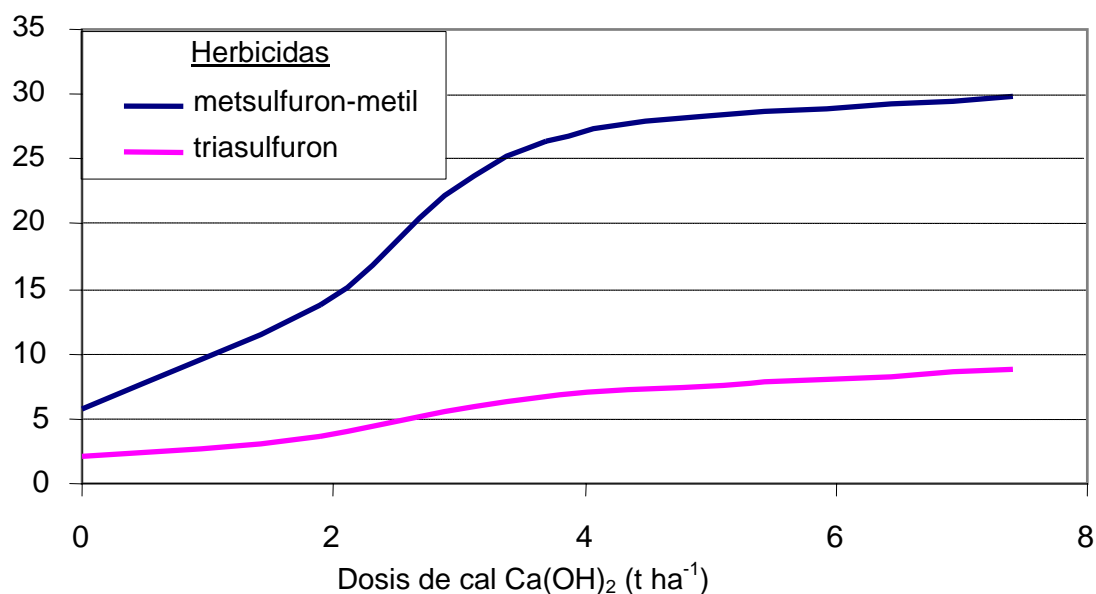


FIGURA 11 Variación de la disponibilidad de metsulfuron – metil y triasulfuron bajo distinta dosis de encalado

Es importante señalar que aun a dosis muy altas de encalado, con pH 7.22, no se logro alcanzar la mitad de la disponibilidad relativa en ambos

herbicidas. Esto reafirma la posibilidad de que existan adsorciones específicas o competencia adsorptivas con otros iones tales como los fosfatos. (URRUTIA, 2001).

A pesar de que en ambos suelos (Fresia y Malihue) la disponibilidad de los herbicidas no alcanzo el 50%, la posibilidad de que ocurran problemas en rotaciones de cultivo o lixiviaciones a capas mas profundas de suelo y regimenes de agua subterránea, es muy probable. Al encalar suelos que han sido tratados con estos herbicidas, aumentaría la desorción hacia la solución del suelo de moléculas de herbicidas, provocando riesgos de toxicidad en cultivos posteriores. Si bien es cierto en este experimento se utilizo hidróxido de calcio es importante señalar que el carbonato de calcio también provocaría un efecto en la disponibilidad de ambos herbicidas ya que provocan el mismo efecto en el suelo.

4.2.5 Efecto del encalado con Ca(OH)_2 sobre el K_d de metsulfuron – metil y triasulfuron. Los K_d del metsulfuron – metil y triasulfuron presentaron una disminución en la medida que aumenta la dosis de encalado (Cuadro 13), esta disminución del K_d se refiere al aumento de la concentración en solución de las moléculas de herbicida con relación a la dosis presente en la solución del suelo debido al efecto de repulsión aniónica provocado por los coloides del suelo al aumentar el pH.

Los valores del K_d , en todos los tratamientos son menores para el caso de metsulfuron – metil. Esto indicaría que en el suelo Fresia el metsulfuron – metil se adsorbe menos que el triasulfuron, esto concuerda con URRUTIA (2001) quien demuestra que el metsulfuron – metil se adsorbe menos que el triasulfuron en el suelo Fresia. También WALKER et al. (1989), encontraron valores de K_d menores en metsulfuron – metil que triasulfuron. Esto se explica porque la constante de disociación (pK_a) del metsulfuron – metil es menor que

el triasulfuron, por lo tanto al mismo pH el metsulfuron – metil se encuentra mas ionizado y de esa manera es mayormente repelido por las cargas negativas del suelo.

CUADRO 13 Valores de Kd para metsulfuron – metil y triasulfuron por efecto de diferentes dosis de encalado con Ca(OH)₂ en el suelo Fresia.

Herbicidas	Dosis de Ca(OH) ₂ (t ha ⁻¹)			
	0	1.9	3.7	7.4
metsulfuron – metil	0.90	0.34	0.15	0.13
triasulfuron	2.91	1.71	0.90	0.66

5 CONCLUSIONES

La adsorción electrostática del metsulfuron – metil y el triasulfuron disminuye a medida que la dosis de encalado con $\text{Ca}(\text{OH})_2$ aumenta en ambos suelos estudiados.

La biodisponibilidad (%) de los herbicidas triasulfuron y metsulfuron - metil en el suelo Malihue (Trumao) aumenta a medida que la dosis de encalado es mayor.

La biodisponibilidad (%) de los herbicidas metsulfuron – metil y triasulfuron en el suelo Fresia aumenta hasta un encalado de 3.7 t ha^{-1} de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (pH 6.66), posterior a esto no existen diferencias.

Los K_d de ambos herbicidas aumentan a medida que la dosis de encalado aumento en los dos suelos en estudio.

6 RESUMEN

El estudio se realizó con el objetivo fundamental de medir la variación de la disponibilidad de dos herbicidas (metsulfuron – metil y triasulfuron) por efecto de diferentes dosis de encalado en dos suelos del sur de Chile (Serie Malihue y Fresia). El bioensayo correspondió a dos experimentos iguales uno para cada suelo con un diseño enteramente al azar con cinco repeticiones. El orden factorial utilizado correspondió a 2 tipos de herbicida por 4 dosis de encalado y 11 dosis de herbicida. Las dosis de encalado utilizadas fueron (0, 1.9, 3.7 y 7.4 t ha⁻¹ de Ca(OH)₂). En cada experimento se utilizó un testigo que correspondió a un sustrato inerte (cuarzo). En cada tratamiento se llenaron vasos con 150 g de suelo seco y se sembraron 5 semillas del indicador biológico que correspondió a arveja (*Pisum sativum* L. var. Calle-Calle). Se incubaron a 20°C y humedad constante (90% capacidad máxima de retención) durante 8 días. De esta manera se logran obtener curvas de respuestas del tamaño radical versus dosis de herbicida según el modelo de bioensayo descrito por STORK y ANNA, 1996. Con estas curvas se calculó la dosis que inhibe el 50% del crecimiento radical (IC₅₀) en cada tratamiento. De la diferencia de los IC₅₀ del testigo cuarzo y los diferentes tratamientos con encalado se logró obtener la cantidad de herbicida adsorbido por el suelo. La disponibilidad relativa (%) se obtuvo en relación al IC₅₀ del testigo cuarzo que correspondió al 100% del herbicida disponible. Los tratamientos presentaron diferencias lo cual indica que el encalado afecta la biodisponibilidad de los herbicidas. A medida que aumento la dosis de encalado se necesitaron dosis menores de herbicida para lograr el mismo daño en las raíces de arveja. Esta situación se repitió tanto para el suelo Fresia como el suelo Malihue.

SUMMARY

The main objective of this study was to measure the availability variation of two herbicides (metsulfuron – metil and triasulfuron), caused by two diferent liming dosis in two southern Chilean soils (Malihue and Fresia series). The biotest consist in two identical experiments, one for each soil series, with a randomised complete – block design with five repetitions each. Two kind of herbicides with four repetitions and eleven herbicide dosis was the factorial order used. The liming dosis used was (0, 1.9, 3.7, and 7.4 t ha⁻¹ of Ca(OH)₂). A control check of inert substrate (quartz) was tested for each experiment. Five cups was filled with 150 g of dry soil, where was seeded five seeds of the biological indicator selected (*Pisum sativum* L. var. Calle – Calle) in every treatment. Along eight days was incubated to 20° C and constant moisture (90% maximun retention capability). That is how radical size versus herbicide dosis responce curves were obtained following the biotest model proposed by STORK & ANNA, 1996. Using this curves the dosis that inhibit the 50% of root growing (IC₅₀) was calculated in each treatment. The variation between the IC₅₀'s of quartz control checks and the different liming treatments made possible to determinate the amount of herbicide soil occluded. The relative availability (%) was obtained with the IC₅₀ relation showed by the control check that meant the 100% of herbicide available. The treatments showed differences which indicate a liming influence over the herbicides bioavailability. As the liming dosis was increased lesser herbicide dosis were needed to reach identical damage in pea roots. This situation was repeated for Fresia soil like also the Malihue soil

7 BIBLIOGRAFIA

ALLOT, D. y O'NELLY, J. 1970. A parallel line assay method for the determination of herbicide soil residues. Record of Agricultural Research 18 : 21-28.

ASOCIACION DE FABRICANTES E IMPORTADORES DE PRODUCTOS FITOSANITARIOS AGRICOLAS (AFIPA). 1998. Manual Fitosanitario 1998 – 1999. Santiago, Chile. Gredos Ltda. 677p.

BOHN, H. 1993. Química de suelo. México. Limusa S.A. 370 p.

BLAIR, A. y MARTIN, T. 1988. A review of the activity, fate and mode of action of sulfonylurea herbicides. Pesticide Science 22: 195-219.

BRADY, N. y WEIL, R. 2000. Elements of the nature and properties of Soils. Mexico. Prentice-Hall Hispanoamericana. 559 p.

BROWN, H. 1990. Mode of action, crop selectivity, and soil relation of sulphonylurea herbicides. Pesticide Science 29: 263-281.

BUCKMAN, H. 1966. Naturaleza y Propiedades de los Suelos. México. Hispano americana. 590 p.

CALVET, R. 1980. Adsorption – Desorption phenomena. In: Hance, R.J. (ed). Interaction between herbicides and the soil. Academic Press. Londres, Inglaterra. pp. 1-30.

- FUENTES, R. 1992. Características de los principales grupos de herbicidas. In: IPSV / UACH. Curso de uso y manejo de plaguicidas. Instituto de Producción y Sanidad Vegetal. Universidad Austral de Chile. Valdivia. pp. 97-121.
- GRAYSON, B., WEBB, J., DEVESON, M. y BLACKMAN, P. 1990. The origins of selectivity and performance of a new preemergence bleaching herbicide, WL 110547. Part I: Factors affecting uptake. Pesticide Science 28: 123 – 41.
- GÜNTHER, P., RAHMAN, A. y PESTEMER, W. 1989. Quantitative bioassays for determining residues and availability to plants of sulphonylurea herbicides. Weed Research 29: 141 – 146.
- KOGAN, M. 1993. Manejo de malezas en plantaciones frutales. Facultad de Agronomía, Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago. Chile. Alfabeto Impresiones. 227 p.
- MERSIE, W. y FOY, C. 1986. Adsorption, desorption and movility of chlorsulfuron in soils. Journal of Agriculture and Food Chemistry 34: 89 – 92.
- NYFFELER, A., GERBER, H., HURLE, K., PESTEMER, W. y SCHMIDT, R. 1982. Collaborative studies of dose – response curves obtained with different bioassay methods for soil – applied herbicides. Weed Research 22, 251 – 6.
- OPPONG, F y SAGAR, G. 1992. The activity and mobility of Triasulfuron in soil as influenced by organic matter, duration, amount and frequency of rain. Weed Research 32: 157 – 165.

- SHIBART, B. 2000. Biodisponibilidad de metsulfuron – metil y triasulfuron en seis suelos de la zona sur de Chile. Tesis Lic. Agr. Valdivia. Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias 66 p.
- STORK, P. y HANNAH, M. 1996. A bioassay method for formulation testing and residue studies of sulfonylurea and sulfonanylide herbicides. *Weed Research* 36: 271 – 281.
- STREIBIG, J. y KUDSK, P. 1993. *Herbicide Bioassays*. Jens C., Streibig and Per Kudsk. (ed). Estados Unidos. 270 p.
- SUAREZ, 1990. Estimación de las necesidades de encalado. In: “IV Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo. Universidad de la Frontera. Facultad de Agroindustrias. Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo. pp: 153 – 160.
- TAN, K. 1998. *Principles of soil chemistry*. Dekker, M. (ed). Inc. New York. Estados Unidos. 521p.
- URRUTIA, S. 2001. Efecto del contenido de fosfato sobre la biodisponibilidad de metsulfuron – metil y triasulfuron en dos tipos de suelo. Tesis Lic. Agr. Valdivia. Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias. 52 p.
- WALKER, A., COTTERILL, E. y WELCH, S. 1989. Adsorption and degradation of chlorsulfuron and metsulfuron – metil in soils from different depths. *Weed Research* 29: 281 – 383.

WALKER, A. y WELCH, S. 1989. The relative movement and persistence in soils of chlorsulfuron, metsulfuron- metil and triasulfuron. *Weed Research* 29: 375 – 383.

WEBER, J., MAHNKEN, G. y SWAIN, L. 1999. Evaporative effects on mobility of ^{14}C – labeled triasulfuron and chlorsulfuron in soils. *Soil Science* 164: 417 – 427.

WILDING, A, SMECK, M, y DRESS, L. 1977. Silica in soils: quartz, cristobalite, tridymite and opal. In mineral in soils environments. Soil Science Society of America, Madison Wisconsin, USA. pp 478 – 479.

ANEXOS

ANEXO 2 Reducción relativa (%) del tamaño de raíz de arveja, bajo dosis creciente de triasulfuron en el suelo Malihue.

Dosis Ln (ng i a/kg s. s. + 1)	Tratamientos																		
	0 t Ca(OH)2/ha						1,9 t Ca(OH)2/ha						3,7 t Ca(OH)2/ha						
	repeticiones					promedio	repeticiones					promedio	repeticiones					promec	
0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
9	88	88	78	72	77	81	65	64	67	67	63	65	58	59	56	51	53	55	55
10	48	46	46	44	38	45	59	60	39	43	43	49	42	44	53	57	43	48	48
11	29	28	29	30	32	30	26	30	28	30	25	28	20	25	22	23	19	22	22
12	25	23	23	23	29	25	29	39	16	25	18	26	25	25	28	27	18	25	25
13	25	26	25	28	30	27	27	31	29	30	24	28	21	26	28	22	19	23	23
14	25	24	27	21	21	23	26	28	20	22	18	23	22	25	24	20	20	22	22
16	29	25	29	25	27	27	20	23	23	28	19	23	21	20	25	21	17	21	21
17	22	22	24	19	20	21	18	23	17	20	16	19	14	15	21	13	19	16	16
18	24	22	24	21	24	23	18	21	18	20	18	19	16	15	24	18	19	18	18
19	21	20	23	18	21	20	23	23	18	19	15	20	12	11	14	15	11	13	13
	Coeficientes del modelo																		
(m)IC50	9,68	9,66	9,48	9,39	9,35	9,51	9,44	9,30	9,23	9,21	9,21	9,28	8,99	8,94	8,89	8,87	8,87	8,91	8,91
a	24,53	23,32	24,91	21,81	25,02	23,92	20,83	22,72	20,12	22,89	17,57	20,83	17,29	16,90	21,46	16,07	16,6	17,66	17,66
c	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
b	-1,03	-1,07	-0,81	-0,61	-0,94	-0,89	-0,40	-0,28	-0,63	-0,54	-0,50	-0,47	-0,44	-0,32	-0,36	-0,27	-0,44	-0,37	-0,37
Coef. det. (r2)	0,99	1,00	1,00	0,99	0,98	0,99	0,97	0,96	0,98	0,98	0,99	0,98	0,98	0,98	0,95	0,95	0,98	0,97	0,97

Dosis Ln (ng i a/kg s. s. + 1)	Tratamientos												
	7,4 t Ca(OH)2/ha						Dosis	Cuarzo					
	repeticiones					promedio	Ln (ng i a/kg s. s. + 1)	repeticiones					promedio
0	100	100	100	100	100	100	0	100	100	100	100	100	100
9	46	55	46	50	53	50	9	46	44	42	39	43	43
10	34	37	34	43	33	36	10	37	36	38	33	40	37
11	19	34	25	37	30	29	11	29	30	35	26	25	29
12	25	29	20	33	32	28	12	26	27	20	23	32	25
13	24	30	25	28	34	28	13	29	27	29	23	26	27
14	21	25	19	17	27	22	14	16	23	20	24	23	21
16	22	22	25	21	18	22	15	18	24	21	20	24	21
17	19	18	15	17	27	19	16	13	18	15	16	22	17
18	15	27	16	16	20	19	18	14	16	19	13	16	16
19	12	14	13	16	18	15	19	9	18	12	18	15	14
	Coeficientes del modelo												
(m)IC50	8,19	8,14	8,05	7,94	7,25	7,91		6,89	6,06	6,11	5,63	3,73	5,68
a	18,31	20,32	17,59	13,93	20,68	18,17		7,78	15,94	12,28	15,04	12,13	12,63
c	100	101	100	105	104	102		112	112	115	112	138	118
b	-0,37	-0,23	-0,31	-0,16	-0,19	-0,25		-0,13	-0,14	-0,13	-0,15	-0,10	-0,13
Coef. det. (r2)	0,98	0,97	0,98	0,99	0,96	0,98		0,99	1,00	0,98	0,99	0,98	0,99

ANEXO 3 Reducción relativa (%) del tamaño de raíz de arveja, bajo dosis creciente de metsulfuron - metil en el suelo Fresia.

Dosis Ln (ng i a/kg s. s. + 1)	Tratamientos																		
	0 t Ca(OH)2/ha						1,9 t Ca(OH)2/ha						3,7 t Ca(OH)2/ha						
	repeticiones			promedio			repeticiones			promedio			repeticiones			promedio			
0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
9	100	92	100	83	77	91	81	69	89	66	72	75	56	54	63	52	57	57	57
10	86	88	72	24	92	72	44	77	71	37	37	53	37	36	60	10	47	47	47
11	64	64	56	15	34	47	37	42	57	37	34	42	37	37	50	13	40	40	40
12	45	68	48	13	29	41	32	46	46	21	30	35	30	29	43	10	31	31	31
13	36	72	52	13	32	41	31	31	57	23	27	34	31	23	38	13	26	26	26
14	45	64	56	12	28	41	37	58	54	26	30	41	35	26	40	11	32	32	32
16	45	68	54	13	23	41	32	58	54	29	27	40	34	24	38	8	29	29	29
17	55	60	52	13	28	42	34	50	54	27	27	38	30	28	35	10	25	25	25
18	55	60	56	11	26	42	34	54	54	24	28	39	33	26	43	9	24	24	24
19	36	60	51	10	26	37	29	45	51	31	30	37	29	29	28	9	22	22	22
Coeficientes del modelo																			
(m)IC50	10,60	10,11	9,89	9,43	10,79	10,17	9,37	9,15	9,71	9,07	9,18	9,29	8,63	8,41	8,67	8,98	8,52	8,52	8,52
a	45,04	64,50	53,00	12,41	27,43	40,48	33,03	48,26	52,86	26,49	28,87	37,90	32,04	26,22	34,98	10,33	24,71	25,00	25,00
c	100	96	101	100	90	97	100	99	100	100	100	100	100	100	101	100	101	101	101
b	-0,91	-4,22	-1,60	-1,42	-4,44	-2,52	-1,07	-0,51	-0,82	-0,70	-1,01	-0,82	-0,72	-0,41	-0,23	-3,82	-0,261	-1,00	-1,00
Coef. det. (r2)	0,93	0,91	0,98	1,00	0,96	0,96	0,99	0,73	0,97	0,97	0,99	0,93	0,99	0,99	0,96	1,00	0,99	0,99	0,99

Dosis Ln (ng i a/kg s. s. + 1)	Tratamientos												
	7,4 t Ca(OH)2/ha						Dosis Ln (ng i a/kg s. s. + 1)	Cuarzo					
	repeticiones			promedio				repeticiones			promedio		
0	100	100	100	100	100	100	0	100	100	100	100	100	100
9	43	41	46	42	42	43	9	36	49	40	36	38	40
10	20	17	32	20	21	22	10	31	41	37	31	32	34
11	19	16	34	12	12	19	11	18	36	34	21	23	26
12	17	16	31	12	12	17	12	19	30	30	21	23	25
13	16	16	28	12	12	17	13	15	31	32	18	19	23
14	15	14	20	10	10	14	14	17	31	22	17	17	21
16	13	11	29	10	10	15	15	15	30	28	15	15	21
17	14	12	34	10	11	16	16	18	30	30	19	20	23
18	11	11	28	10	10	14	18	19	30	29	18	18	23
19	11	10	34	9	9	15	19	18	26	34	17	17	22
Coeficientes del modelo													
(m)IC50	8,56	8,64	8,20	8,61	8,58	8,52		7,71	7,66	6,49	7,29	7,39	7,31
a	14,01	13,08	29,40	10,47	10,33	15,46		16,73	28,87	28,94	16,64	17,13	21,66
c	100	100	100	100	100	100		100	100	101	101	101	101
b	-0,68	-0,91	-0,66	-0,67	-0,62	-0,71		-0,38	-0,30	-0,28	-0,29	-0,28	-0,30
Coef. det. (r2)	0,99	0,99	0,97	1,00	1,00	0,99		0,99	1,00	0,98	1,00	1,00	0,99

ANEXO 4 Reducción relativa (%) del tamaño de raíz de arveja, bajo dosis creciente de triasulfuron en el suelo Fresia

Dosis Ln (ng i a/kg s. s. + 1)	Tratamientos																	
	0 t Ca(OH) ₂ /ha						1,9 t Ca(OH) ₂ /ha						3,7 t Ca(OH) ₂ /ha					
	repeticiones					promedio	repeticiones					promedio	repeticiones					promedio
0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
9	76	75	76	74	67	74	62	63	65	58	64	62	50	49	50	50	42	48
10	48	63	50	37	67	53	29	31	32	26	31	30	38	44	36	45	35	40
11	25	63	42	30	36	39	26	26	25	24	26	25	45	49	22	38	15	34
12	26	47	38	33	18	32	26	27	28	22	27	26	50	51	20	13	13	29
13	26	47	30	26	17	29	22	23	25	22	23	23	38	44	26	33	11	30
14	24	47	34	28	17	30	25	24	25	22	25	24	38	49	20	38	9	31
16	21	47	32	24	15	28	20	21	25	20	22	21	38	44	22	28	10	28
17	23	31	22	22	13	22	20	23	27	24	23	23	40	49	22	28	10	30
18	21	44	32	24	14	27	28	29	31	26	27	28	38	44	20	25	10	28
19	21	47	30	19	13	26	14	21	23	19	19	19	38	42	22	25	12	28
Coeficientes del modelo																		
(m)IC₅₀	9,51	9,40	9,42	9,28	10,05	9,53	9,01	9,02	9,04	8,94	9,05	9,01	8,58	8,21	8,44	8,41		
a	22,60	41,95	30,27	25,36	13,08	26,65	22,42	24,10	26,09	22,32	23,84	23,75	36,87	45,18	21,30	27,35	9,60	28,06
c	100	100	101	100	98	100	100	100	100	100	100	100	249	532	100	100	100	216
b	-0,72	-0,27	-0,49	-0,93	-0,42	-0,57	-0,99	-1,00	-1,13	-1,21	-1,00	-1,06	-0,10	-0,13	-0,53	-0,36	-0,36	-0,30
Coef. det. (r²)	0,99	0,93	0,98	0,98	0,97	0,97	0,98	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,96	0,97	0,99	0,91	0,99	0,96

Dosis Ln (ng i a/kg s. s. + 1)	Tratamientos												
	7,4 t Ca(OH) ₂ /ha						Dosis Ln (ng i a/kg s. s. + 1)	Cuarzo					
	repeticiones					promedio		repeticiones					promedio
0	100	100	100	100	100	100	0	100	100	100	100	100	100
9	35	39	37	33	35	36	9	32	35	37	35	35	35
10	26	31	18	16	20	22	10	31	30	37	39	33	34
11	11	21	15	14	17	16	11	24	24	21	19	20	21
12	12	13	16	14	17	14	12	21	23	27	24	19	23
13	11	13	14	12	13	13	13	22	23	25	21	28	24
14	9	12	15	13	15	13	14	20	25	22	21	19	21
16	8	10	13	10	14	11	15	21	22	23	26	16	21
17	10	11	10	9	14	11	16	18	20	23	19	19	20
18	10	10	11	10	11	11	18	17	17	18	15	20	18
19	11	10	12	10	10	11	19	20	23	17	17	12	18
Coeficientes del modelo													
(m)IC₅₀	8,05	7,96	8,42	8,23	7,96	8,12	5,30	6,38	5,03	5,90	5,88	5,70	
a	9,40	9,84	13,00	11,13	13,12	11,30	18,21	20,85	18,32	17,48	16,28	18,23	
c	100	100	100	100	100	100	108	102	114	107	107	108	
b	-0,40	-0,29	-0,73	-0,64	-0,47	-0,50	-0,19	-0,26	-0,15	-0,18	-0,19	-0,19	
Coef. det. (r²)	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	0,98	0,97	0,98	0,98	