

SORCIÓN, DEGRADACIÓN Y LIXIVIACIÓN DE IMAZAPYR EN UN SUELO VOLCÁNICO DE MÉXICO

• Elías Raymundo-Raymundo •
Colegio de Postgraduados, México

• Blanca Lucía Prado-Pano •
Universidad Nacional Autónoma de México

• Iouri Nikolskii-Gavrilov • José Hipólito Rodolfo Mendoza-Hernández •
Colegio de Postgraduados, México

Resumen

La lixiviación de plaguicidas a través del perfil del suelo puede provocar la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas, además de reducir la productividad agrícola. Los objetivos de este trabajo fueron evaluar los procesos de sorción, lixiviación y degradación de imazapyr a través del perfil de un suelo alofánico. Se realizaron experimentos de adsorción en Batch y experimentos de desplazamiento en columnas no disturbadas de suelo (8.5 cm de diámetro y 15 cm de longitud). Sobre cada columna se aplicó un pulso de $H_2^{18}O$ e imazapyr, los cuales fueron desplazados a través del suelo utilizando diez volúmenes de poro de una solución reconstituyente del suelo. El comportamiento del herbicida en las columnas de suelo se simuló con el modelo CXTFIT 2.1. Se ajustaron soluciones analíticas de la ecuación convección-dispersión a los datos experimentales utilizando modelos en equilibrio y no equilibrio. El movimiento del agua demostró condiciones de homogeneidad y heterogeneidad física en las columnas de suelo. Más del 99% de imazapyr aplicado a las columnas se recuperó en los lixiviados al final de los experimentos. La dispersividad varió de 0.7 a 1.6 cm. Se estimó el coeficiente de distribución K_d en alrededor $2.40 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$ en ambas profundidades del perfil de suelo estudiadas. La vida media de imazapyr se calculó ≥ 39 meses. Se concluyó que en este perfil de suelo, el imazapyr es poco adsorbido y tiene alta persistencia. Esto contribuye a una alta movilidad de imazapyr, lo que implica un alto riesgo de contaminación de las aguas subterráneas.

Palabras clave: imazapyr, suelo alofánico, lixiviación, degradación.

Introducción

Alrededor de 55 mil toneladas de plaguicidas (insecticidas, herbicidas, fungicidas u otros) se usan anualmente en la agricultura mexicana (Instituto Nacional de Ecología, 2000), lo cual se incrementa año con año en la medida en que se tecnifica e intensifica la agricultura (introducción de riego, por ejemplo).

El uso de imazapyr en los Estados Unidos es permitido en ambientes terrestres (vías de ferrocarril, autopistas y bosques) y acuáticos

(lagos, canales, esteros, ríos y sistemas de drenaje); en áreas no cultivadas y en cultivos de maíz (Hurley y Shanaman, 2007); en Malasia se aplica en huertos de hule, palmas aceiteras y plantaciones de cacao; además se usa en el control de pastos anuales y maleza de hoja ancha en terrenos no cultivados (Ismail y Ahmad, 1994). Existen reportes del uso de imazapyr en árboles caducifolios, vid y plantaciones forestales de pino (Jenkins *et al.*, 2000); en cereales, caña de azúcar y caucho (Kaichouh *et al.*, 2004); en legumbres de grano, girasol

y cereales (Ulbrich *et al.*, 2005). En México, el imazapyr es un herbicida de reciente introducción en el mercado (CICOPLAFEST, 2007).

La peligrosidad de estos plaguicidas para el ambiente y la salud de las personas ha llevado a establecer niveles máximos permisibles en agua potable (Norma Oficial Mexicana, 2007). La concentración máxima permisible en agua potable de los plaguicidas señalados varía de 10^{-6} a 10^{-8} g l⁻¹. En México, varios estudios han reportado la presencia de plaguicidas en aguas superficiales y su acumulación en suelos y plantas (Arévila *et al.*, 1997; García-Carrillo, 1997; García de Llasera y Bernal-González, 2001; Carvalho *et al.*, 2002; Hernández-Romero *et al.*, 2004; Amaya-Chávez *et al.*, 2006; Madrigal *et al.*, 2007; Pérez *et al.*, 2009). Los estudios en aguas subterráneas son más limitados, no obstante que la presencia de este tipo de compuestos ya ha sido reportada en otras partes del mundo (Goodrich *et al.*, 1991; Bush *et al.*, 1995), o su movilidad y potencial riesgo de lixiviación (Cohen *et al.*, 1984; Wehtje *et al.*, 1987; Firmino *et al.*, 2008).

La contaminación de las aguas subterráneas por plaguicidas depende de las medidas de manejo de los mismos, de las características físicas del suelo (notablemente la textura y la humedad), así como de las interacciones y transformaciones del agroquímico en el perfil del suelo y en estratos más profundos. Los procesos de adsorción y degradación se oponen a la lixiviación de un plaguicida una vez que éste ha sido aplicado al suelo. El análisis de estos tres procesos en el suelo permite entonces evaluar el riesgo de contaminación del agua y del suelo por un plaguicida.

El imazapyr, ácido (RS)-2-(4-isopropil-4-metil-5-oxo-2-imidazolin-2-il) nicotínico, un herbicida de la familia imidazolinone, es un herbicida móvil y persistente (Vizantinopoulos y Lolos, 1994); Jarvis *et al.*, 2006). Este herbicida es de amplio espectro y se utiliza para eliminar pastos perennes y anuales,

malezas de hoja ancha, y especies acuáticas emergentes y riparias. Las tasas de aplicación varían de 0.015 kg i.a. (ingrediente activo) ha⁻¹, sobre áreas de cultivo, a 1.68 kg i.a. ha⁻¹, sobre ambientes acuáticos y en áreas sin cultivar (EPA, 2005).

Debido a la presencia de grupos funcionales tanto ácidos (carboxílico) como básicos (pyridine), el imazapyr exhibe un comportamiento en el suelo dependiente del pH. El imazapyr presenta tres valores de pKa: 1.9, 3.6 y 11.4. Dependiendo del pH del ambiente en el cual se encuentre, puede estar en forma neutra, en forma deprotonada del carboxilo o de la imidazolinona nitrogenada, o en forma protonada (Firmino *et al.*, 2008). El compuesto tiene una solubilidad en agua que varía de 9.74-11.27 g l⁻¹, y un tiempo de vida media en el suelo de 30-150 días.

Por lo común se llevan a cabo experimentos de desplazamiento para estudiar el movimiento de los contaminantes dentro del suelo. Particularmente, columnas no disturbadas de suelo se utilizan en el laboratorio para mantener las condiciones de estructura y heterogeneidad del suelo, y entonces estudiar el movimiento del contaminante bajo condiciones controladas (White *et al.*, 1998).

Por otra parte, suelos alofánicos como andosol, originados de ceniza volcánica, son particularmente relevantes debido a la presencia de materiales amorfos, alto contenido de materia orgánica, baja densidad aparente, alta capacidad de retener agua, y una carga dependiente del pH (Prado *et al.*, 2007). Suelos tipo andosol ocupan el 2% de la superficie de México, y 23% de la superficie en el Estado de México, cubriendo una superficie importante de la cuenca Cutzamala, que provee de agua potable a la ciudad de México. En este trabajo, el objetivo ha sido caracterizar la sorción, degradación y lixiviación de imazapyr en el perfil de un suelo volcánico. Para ello se utilizaron experimentos en Batch y experimentos de desplazamiento del compuesto en columnas inalteradas de suelo bajo régimen permanente de flujo a no saturación.

Materiales y métodos

Suelos y muestreo

El sitio de estudio se monitoreó en relación con la erosión, escorrentía superficial y transporte de nutrientes (Viramontes *et al.*, 2003; Prado, 2006). El sitio se localiza en la cuenca de valle de Bravo, en el Estado de México. El suelo ha sido clasificado como *Typic Hapludand* (Prado *et al.*, 2007). En el sitio se extrajeron seis monolitos de suelo de 8.5 cm de diámetro y 15 cm de longitud. Tres monolitos se extrajeron a la profundidad de 20-35 cm y otros tres a la profundidad de 80-95 cm. Los monolitos se colocaron dentro de tubos de acrílico de 9 cm de diámetro. El espacio sobrante entre el tubo y el monolito de suelo se rellenó con parafina químicamente pura (J.T. Baker), fusionada a 70 °C, para evitar flujos laterales. Este arreglo del monolito, en adelante denominado columna de suelo (tubo, parafina, monolito de suelo), fue trasladado al laboratorio y almacenado a 4 °C hasta su uso. Del mismo sitio, y de cada profundidad, se colectaron muestras de suelo disturbado para realizar los experimentos de adsorción en Batch. A estas muestras de suelo se determinó textura mediante el método de la pipeta, contenido de carbono orgánico por combustión seca (TOC-5050A Shimadzu), pH en agua usando una relación 1:2.5 peso/volumen y capacidad de intercambio catiónico mediante el método del acetato de amonio a pH 7.

Herbicida

Se utilizó imazapyr con 99.5% de pureza (Chem Service, West Chester, EUA). Previo a aplicarse en el suelo, se elaboró una solución estándar concentrada de imazapyr (1 500 mg l⁻¹) disolviendo 0.015 g de imazapyr en 10 ml de una solución agua:metanol, proporción 1:1 (v/v), misma que se colocó en un frasco de vidrio oscuro y se almacenó a -4 °C. Esta solución se utilizó para elaborar soluciones estándares diluidas de imazapyr en una

solución reconstituida del suelo. La solución reconstituida fue elaborada mezclando KCl 0.0003 M, CaCl₂ 0.001 M, MgCl₂ 0.0004 M y NaCl 0.0004 M, para mantener las condiciones de fuerza iónica y pH del suelo en los experimentos.

Experimentos de adsorción en Batch

La relación suelo:solución 1:2.5 (p/v) y el tiempo de equilibrio de 24 ± 0.5 h fueron obtenidos siguiendo la metodología de Roy *et al.* (1991). El suelo se utilizó a humedad de campo para no afectar las características de adsorción (Prado *et al.*, 2007). Muestras triplicadas equivalentes a 5 g de suelo en base seca se mezclaron con el volumen necesario de la solución reconstituida del suelo. A esta mezcla se adicionó un ml de solución estándar de imazapyr diluida a concentraciones de 0.2, 0.9, 1.8 y 2.7 mg l⁻¹, equivalentes a 0.5 a 6.8 mg imazapyr kg⁻¹ suelo seco. La dosis utilizada corresponde a un valor intermedio entre la dosis recomendada por la EPA (2005) para uso agrícola y no agrícola. Las muestras fueron equilibradas en un agitador tipo rotatorio durante 24 horas a 60 rpm y 20 °C. Enseguida las muestras fueron centrifugadas a 1 500 rpm durante 20 min y el sobrenadante se recuperó para su análisis de pH y concentración de imazapyr.

Se asumió que la diferencia entre la concentración de imazapyr aplicada y la concentración en el sobrenadante después de 24 h de agitación correspondió a la concentración de imazapyr adsorbido. Con esos datos se elaboraron las isotermas de adsorción. Se utilizó el modelo empírico de Freundlich para describir la adsorción de imazapyr:

$$c_2 = K_f c_1^N \quad (1)$$

Donde c_2 es la concentración de imazapyr adsorbido por el suelo (µg g⁻¹), c_1 es la concentración en la solución (en equilibrio) (mg ml⁻¹), K_f es el coeficiente empírico de Freundlich y N es un coeficiente de potencia que indica la dependencia no lineal de la tasa de

adsorción sobre la concentración del soluto. Cuando el parámetro N tiene el valor de la unidad, el modelo es lineal y K_f corresponde al coeficiente de distribución (K_d).

Experimentos de desplazamiento

Previo a los experimentos se obtuvieron muestras de suelo de cada extremo de la columna para determinar el contenido de imazapyr y de humedad. La columna de suelo fue colocada sobre una base cóncava, cuyo arreglo permitía la colección y extracción del lixiviado. En la parte superior de la columna se colocó un simulador de lluvia compuesto de un reservorio de 500 ml y nueve agujas de goteo (0.5 mm de diámetro/aguja). En un primer tiempo, alrededor de tres volúmenes de poro de la solución reconstituida del suelo fueron lixiviados a través de la columna hasta alcanzar una tasa de flujo uniforme y el equilibrio en la composición de la solución del suelo. Para ello se utilizó una bomba

peristáltica tanto a la entrada como a la salida de la columna, a modo de establecer el flujo uniforme en condición de no saturación. La velocidad de flujo estuvo en el rango de 0.44 a 0.48 cm³ min⁻¹, lo cual produjo velocidades de agua de poro de 0.011 a 0.013 cm min⁻¹. El siguiente paso fue aplicar un pulso de 0.025 volúmenes de poro, con una concentración de 10 000 mg l⁻¹ de H₂¹⁸O (como trazador del agua) y de 50.3 a 59.3 mg l⁻¹ de imazapyr, equivalente a 2 mg imazapyr kg⁻¹ suelo seco, en promedio. Este pulso fue lixiviado a través de la columna, utilizando de 10 a 12 volúmenes de poro de la misma solución reconstituida. Los parámetros experimentales se presentan en el cuadro 1.

Se colectaron muestras de lixiviado a cada 0.1 volúmenes de poro y analizadas para H₂¹⁸O (en espectrómetro isotópico de masas) e imazapyr (por cromatografía líquida de alta resolución, HPLC). Se elaboraron las curvas de elusión, graficando la concentración relativa de H₂¹⁸O o de imazapyr en el lixiviado contra los volúmenes de poro lixiviados. Al final de los

Cuadro 1. Parámetros experimentales para las columnas de suelo en los experimentos de desplazamiento.

Profundidad y columna	Soluto	c_0 (mg l ⁻¹)	ρ (g cm ⁻³)	θ (cm ³ cm ⁻³)	v (cm min ⁻¹)	Pulso (V_{pulso}/V_p)	Duración experimental (Número de V_p lixiviados)
20-35 cm							
C1	H218O	10 000	0.625	0.652	0.013	0.019	12.3
	Imazapyr	58.485					
C2	H218O	10 000	0.625	0.655	0.013	0.020	12.0
	Imazapyr	56.680					
C3	H218O	10 000	0.624	0.655	0.012	0.020	12.1
	Imazapyr	50.341					
80-95 cm							
C4	H218O	10 000	0.562	0.722	0.011	0.017	10.5
	Imazapyr	59.286					
C5	H218O	10000	0.603	0.723	0.011	0.018	11.4
	Imazapyr	55.731					
C6	H218O	10 000	0.643	0.723	0.011	0.018	12.2
	Imazapyr	52.176					

Nota: c_0 = concentración de entrada en el pulso; ρ = densidad aparente del suelo; θ = contenido de agua del suelo; v = velocidad de agua en los poros; V_p = volumen de agua en los poros; (V_{pulso}/V_p) = volumen del pulso relativo al volumen de agua en los poros.

experimentos de desplazamiento, el suelo de la columna fue seccionada en tres partes, y a cada sección se determinó contenido de agua y de imazapyr.

Extracción y cuantificación de imazapyr

La extracción de imazapyr en el suelo se hizo siguiendo el procedimiento descrito en Soto *et al.* (2010). Hecha la extracción con agua grado HPLC, el sobrenadante final fue puesto a evaporar a sequedad a 60 °C en una estufa de laboratorio. El residuo entonces fue disuelto en agua: metanol 1:1 (volumen/volumen), filtrado en un acrodisco con poros de 0.2 µm de diámetro, colocado en viales de 2 ml de capacidad, y almacenado a -4 °C hasta su lectura en HPLC. La recuperación de imazapyr lograda con esta técnica fue superior al 99%.

La cuantificación de imazapyr se hizo por HPLC. Se utilizó un módulo de separación Waters® 2695, equipado con un detector de absorción UV-Visible Waters® 4789 ajustado a 240 nm, una columna Symmetry® C₁₈ (3.9 mm x 150 mm, 5 µm de tamaño de partícula). Las condiciones cromatográficas de medición fueron: sistema de bombeo isocrático de seis minutos con flujo de 1 ml min⁻¹, volumen de inyección 30 µl, fase móvil de ácido fórmico 1% en agua/metanol (70:30, v/v), temperatura de columna 37 °C; el tiempo de retención del Imazapyr® fue de 4.5 minutos.

Modelo de transporte

Para describir el transporte vertical del agua y del imazapyr en las columnas de los suelos estudiados se han determinado los parámetros de la ecuación de convección-dispersión (ECD) utilizando el programa CXTFIT 2.1 (Simunek *et al.*, 1999). El modelo se usó de modo inverso, en el cual, mediante el método de mínimos cuadrados, CXTFIT ajusta una solución analítica de la ECD a los datos experimentales. El programa CXTFIT permite incorporar los procesos de no equilibrio a la ECD, ya sea por razones relacionadas con los procesos

de adsorción (modelo de dos sitios) o de heterogeneidad física del suelo (modelo de dos regiones) (Toride *et al.*, 1999).

Primero, el modelo se ajustó a los datos experimentales del agua (H₂¹⁸O) y se determinó el coeficiente de dispersión D (cm² min⁻¹) y la fracción de agua móvil, esta última en caso de que las condiciones de no equilibrio físico prevalecieran sobre el movimiento del agua en la columna. Tales parámetros y los valores del coeficiente de distribución K_d de imazapyr en el suelo (obtenidos de los experimentos en Batch) se utilizaron en el ajuste de la solución analítica para los datos experimentales de imazapyr.

Los parámetros de transporte de agua y de imazapyr fueron obtenidos utilizando las siguientes ecuaciones:

$$\lambda = D/v \quad (2)$$

Donde λ es la dispersividad (cm) y $v = q/\theta$ es la velocidad de agua en los poros (cm min⁻¹), q es la velocidad de flujo de Darcy (cm² min⁻¹) y θ es el contenido volumétrico de agua del suelo (cm³ cm⁻³):

$$f = \theta_m/\theta \quad (3)$$

Donde f es la fracción de agua móvil y θ_m es el contenido volumétrico de agua móvil (cm³ cm⁻³):

$$K_d = \theta(R-1)/\rho \quad (4)$$

Donde K_d es el coeficiente de distribución del soluto entre la fase líquida y la fase sólida (cm³ g⁻¹), y se asume que se da linealmente; R es el factor adimensional de retardo, y ρ es la densidad aparente del suelo (g cm⁻³).

Balance de masa de imazapyr

El balance de masa se estimó con la siguiente ecuación:

$$M_A = M_L + M_R + M_D \quad (5)$$

Donde M_A es la masa de imazapyr aplicada en el pulso, M_L es la masa total lixiviada, M_R es la masa retenida en el suelo de la columna al final del experimento y M_D es la masa degradada. M_D se obtuvo por diferencia en la ecuación (5), al ser la variable desconocida.

La masa lixiviada se estimó de las curvas de elusión de imazapyr con el método de momentos. Se aplicó el esquema de integración conocido como regla trapezoidal para obtener el área bajo la curva que representa la fracción de masa lixiviada (M_0):

$$M_0 = \sum_{i=2}^n \frac{1}{2} (C_i + C_{i-1})(T_i - T_{i-1}) \quad (6)$$

Donde C_i es la concentración del soluto en el agua del suelo (c) medido en un tiempo (t), expresada como fracción de la concentración del soluto aplicado en el pulso a la superficie del suelo (c_0) y T_i es el tiempo adimensional que relaciona la velocidad media del agua en los poros del suelo (v), y el tiempo absoluto (t) al que se midió la concentración c en la solución del suelo respecto a la longitud L del perfil de suelo recorrido por el soluto.

M_L se obtuvo con la siguiente ecuación:

$$M_L = M_0 * M_A \quad (7)$$

Tasa de degradación y vida media

Se asumió una tasa constante de degradación de primer orden (χ), válida para pequeñas concentraciones del soluto y cuando la

degradación ocurre solamente por actividad de microorganismos (Das y Kluitenberg, 1996); se estimó con la ecuación:

$$\chi = -\ln\left(\frac{M_A - M_D}{M_A}\right)/t \quad (8)$$

Donde t es el tiempo total de duración de los experimentos.

El tiempo de vida media ($t_{0.5}$) de imazapyr se calculó con la siguiente ecuación:

$$t_{0.5} = \ln(2)/\chi \quad (9)$$

Resultados y discusión

Características físico-químicas de los suelos

El contenido de carbono orgánico, el tipo de arcillas y su composición, así como el pH del suelo afectan el proceso de adsorción. Los dos estratos del suelo estudiado son homogéneos respecto a estas características (cuadro 2). El suelo presenta textura limosa, con un contenido de arcillas no mayor de 11%, el pH es ligeramente ácido y el contenido de carbono orgánico de 5.7% en promedio. Prado et al. (2007) reportaron contenido de arcilla tipo alofano de 22.5 y 27.7%, presentes en el contenido de arcilla total para los estratos superior e inferior, respectivamente. El contenido de hierro extraído al oxalato varía de 1.2 a 1.3% entre 15 y 100 cm de profundidad del perfil de suelo. Para estos mismos estratos,

Cuadro 2. Características físico-químicas de los dos estratos de suelo estudiados.

Profundidad (cm)	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	ρ (g cm ⁻³)	CO (%)	pH	CIC (cmol _c kg ⁻¹)
20-35	24	65	11	0.63	6	6.2	20.6
80-95	23	67	10	0.59	5.4	6.4	23.2

Nota: ρ = densidad aparente del suelo; CO = carbono orgánico; CIC = capacidad de intercambio catiónico.

Prado (2006) reportó valores de conductividad hidráulica a saturación de 0.5 a 1.7 m d⁻¹ y de 0.2 a 0.9 m d⁻¹, lo cual indica la alta permeabilidad en el perfil de este suelo.

Adsorción de imazapyr

Las isothermas de adsorción se presentan en la figura 1. La forma de las isothermas indica que a baja concentración ocurre una baja adsorción, la cual aumenta al incrementarse la concentración. Aplicando el modelo lineal se obtuvieron valores de K_d de 2.43 cm³ g⁻¹ para el estrato superior y 2.37 cm³ g⁻¹ para el estrato inferior, con ajustes (r^2) de 0.75 y 0.79, respectivamente. También se usó el modelo de Freundlich. Se observó un ajuste ligeramente mejor ($r^2 = 0.76$ y 0.83) que el modelo lineal; los valores

de K_f obtenidos fueron de 1.83 y 1.84 para las profundidades de 20 y 80 cm, respectivamente. Los valores del coeficiente de potencia (N) del modelo de Freundlich (ecuación (1)) fue de 1.04 para ambas profundidades estudiadas. Con base en lo anterior, es posible decir que en el rango de concentraciones evaluadas, 0.2, 0.9, 1.8 y 2.7 mg l⁻¹, equivalentes a 0.5 a 6.8 mg imazapyr kg⁻¹ suelo seco, la adsorción de imazapyr ocurrió de forma lineal en ambos estratos del andosol estudiado. El estudio de la adsorción de imazapyr en este suelo también se hizo a concentraciones mayores de las señaladas, observándose que a concentraciones superiores de 3 mg l⁻¹, la adsorción deja de ser lineal.

Comparando los valores de K_d con los reportados por Baskaran *et al.* (1996) para otros plaguicidas en ocho suelos alofánicos, los valores de K_d obtenidos en este estudio para el imazapyr son inferiores. Estos autores establecieron que la materia orgánica del suelo (MO) es el adsorbente más importante de pesticidas no-iónicos. En el caso de plaguicidas iónicos, en adición a la MO, los óxidos de Fe y Al también contribuyen a la adsorción; los autores encontraron alta adsorción de plaguicidas no-iónicos (Terbufos, $K_d = 20.7$, Forato, $K_d = 18.1$) y baja adsorción de pesticidas iónicos (2, 4-D, $K_d = 4.88$, Atrazina, $K_d = 3.74$ metsulfurón-metil, $K_d = 0.54$). Por otro lado, McDowell *et al.* (1997) evaluaron la degradación de imazapyr en un *Udic Ustochrept*; los autores demostraron que a similares valores de pH, Fe y Al, el K_d está directamente relacionado con el contenido de carbono orgánico.

Pusino *et al.* (1997) estudiaron la sorción de imazapyr en seis suelos, entre los cuales uno era andosol. Los autores observaron buen ajuste de isothermas de tipo Freundlich ($r^2 = 0.99$), con valores de K_f alrededor de 2 y un valor de N inferior a la unidad. Sin embargo, el rango de concentración estudiado fue del orden de 3 a 70 veces más alto que el evaluado en el presente estudio. Otro factor importante que explica las diferencias observadas con el andosol estudiado, se

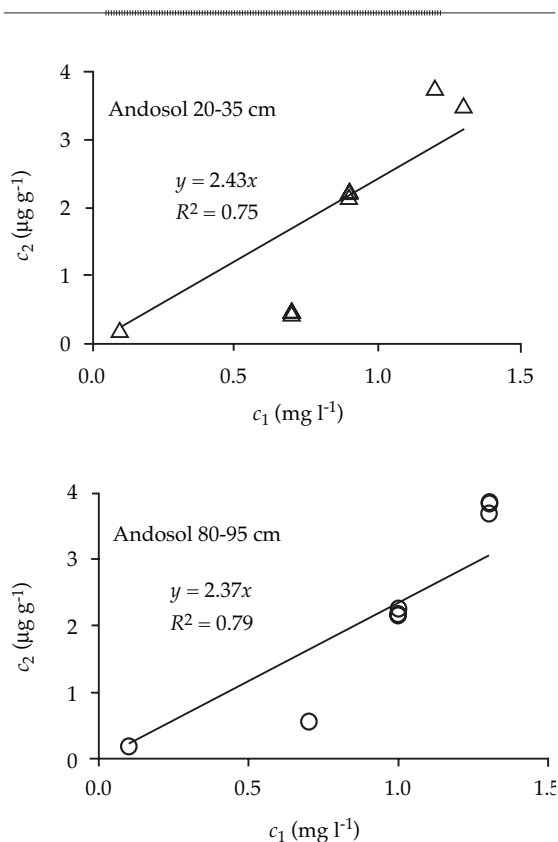


Figura 1. Isothermas experimentales (símbolos) y simuladas (líneas) de imazapyr en las dos profundidades del andosol.

refiere a las características de los suelos. El andosol estudiado por Pusino *et al.* (1997) presenta una textura, pH y contenido de Fe extraído al oxalato, similar al analizado en el presente trabajo; en contraste, contiene un 16% de materia orgánica, contra el 10% en promedio, que presenta el suelo estudiado en el presente trabajo.

Referente al componente del suelo responsable de la retención del imazapyr, Vizán-tinopoulos y Lolos (1994) mostraron que mayor adsorción de imazapyr ocurre en suelos con contenidos altos de arcillas y de materia orgánica. A su vez, Wang y Liu (1999) encontraron que un aumento en la adsorción está inversamente correlacionado al pH. En el suelo estudiado se observa que la capacidad de sorción de imazapyr a las dos profundidades del andosol estudiado es similar, lo cual puede asociarse con las características del suelo responsables de la sorción de imazapyr: materia orgánica y óxidos de hierro. Dependiendo del pH del medio, la molécula de imazapyr puede existir en forma catiónica, aniónica o neutra. Al pH del medio (alrededor de seis), el imazapyr en solución se

encontraba en forma aniónica. Por otro lado, a este pH, el suelo presenta una carga neta negativa de alrededor -0.45 unidades de pH, obtenido mediante el valor del ΔpH medido en el perfil de suelo estudiado (Prado *et al.*, 2007). Según Stevenson (1972), el pKa de la MO es alrededor de 5, mientras que el punto de carga cero de los óxidos de hierro amorfos ocurre alrededor de 8.5 (Sposito, 1989), por lo tanto, aparentemente son los óxidos de hierro los únicos que proveen de superficies con carga positiva para retener el imazapyr. El contenido de Fe extraído al oxalato en el suelo estudiado es de 1.2 y 1.3% a 20 y 80 cm de profundidad, respectivamente, lo cual puede explicar la capacidad de sorción de imazapyr, similar a la observada en las dos profundidades evaluadas.

Elusión de H_2^{18}O y dispersividad

Las curvas de elusión del H_2^{18}O obtenidas en los experimentos de transporte se presentan en la figura 2. El centro de gravedad de las curvas de elusión, de dos columnas de cada estrato (C1 y C2 para el estrato 20-35 cm, y C4 y C5

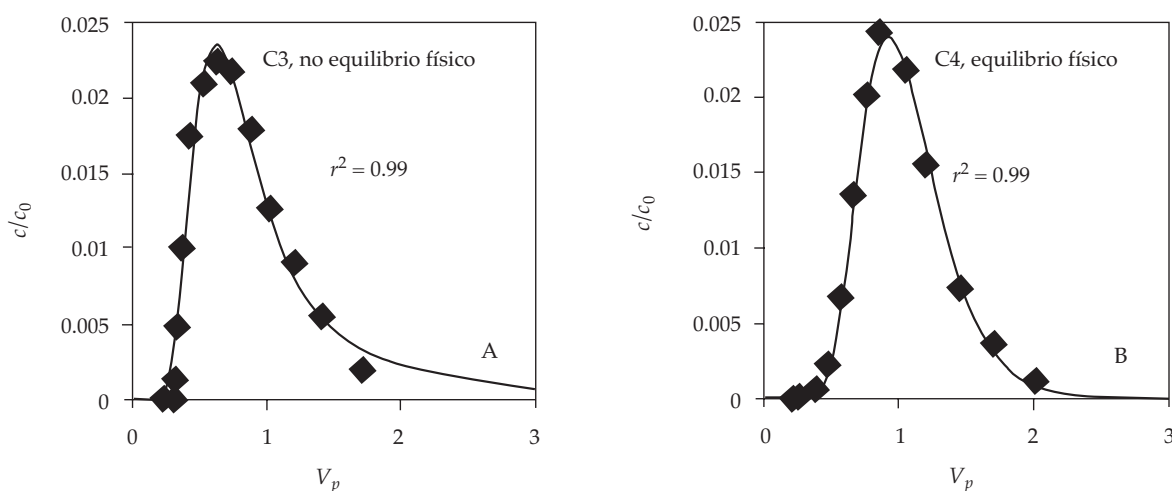


Figura 2. Curvas de elusión experimentales (símbolos) y simuladas (líneas), representativas del movimiento en condiciones de equilibrio y no equilibrio físico del trazador H_2^{18}O ; 2a) columna C3 del estrato 20-35 cm de profundidad y C6 del estrato 80-95 cm; 2b) columna C1 y C2 del estrato 20-35 cm, y C4 y C5 del estrato 80-95 cm.

para el estrato 80-95 cm), se situó alrededor de un volumen de poro (figura 2b). En realidad, si al hacer la curva de elusión el tiempo 0 de la gráfica es el instante en que se aplicó el pulso, el centro de gravedad de la curva de elusión debería estar alrededor de $1 + 0.5T_0$. El centro de gravedad de la curva de elusión en las columnas C3 y C6 (una de cada estrato, se situó antes de un volumen de poros) es asimétrica y mostró un ligero coleo (figura 2a).

El haber observado curvas de elusión tanto simétricas como no simétricas en las columnas de una misma profundidad indica que el movimiento del agua en ese estrato puede ocurrir tanto en equilibrio físico como en no equilibrio físico. En el caso de las columnas superficiales, el resultado es similar al reportado por Prado (2006), quien reportó el movimiento del trazador del agua en equilibrio y no equilibrio físico en columnas intactas del horizonte superficial del mismo suelo.

Este autor señala que el resultado obedece al trabajo de laboreo en el sitio, el cual destruye los agregados, al mezclar y homogeneizar

los primeros centímetros del perfil del suelo. La aparición de no equilibrio físico en el movimiento del agua en este estrato puede ser el resultado del crecimiento de raíces, lombrices e insectos, como ha sido revisado por Jarvis (2007).

Los valores de dispersividad calculados estuvieron en el rango de 0.73 a 1.24 cm (cuadro 3), dentro del rango de la dispersividad reportada por Magesan *et al.* (2003) para otros suelos alofánicos y por Prado (2006) para el mismo suelo.

El modelo en no equilibrio físico considera que el suelo está constituido de dos fracciones líquidas: una fracción móvil y una fracción inmóvil, entre las cuales el intercambio del soluto ocurre por difusión (van Genuchten y Wierenga, 1976). La presencia de agua inmóvil en la columna C3 del estrato superior fue de 28% y en la columna C6 del estrato inferior fue de 11% (cuadro 3). Menor fracción de agua inmóvil explica una curva de elusión poco asimétrica y con un ligero coleo (figura no mostrada aquí).

Cuadro 3. Parámetros de transporte de imazapyr en dos estratos de un suelo volcánico mexicano.

Columna	Modelo	θ_m/θ (-)	λ cm	K_d $\text{cm}^3 \text{g}^{-1}$	f (-)	α min^{-1}	χ min^{-1}	$t_{0.5}$ meses	r^2
20-35 cm									
1	NEQ	1.0	1.11	2.43	0.607	$2.57 * 10^{-5}$	$4.145 * 10^{-7}$	38.7	0.94
2	NEQ	1.0	1.61	2.43	0.272	$10.41 * 10^{-5}$	$1.623 * 10^{-7}$	99.0	0.93
3	NEF	0.72	1.17	2.43	0.353	$7.597 * 10^{-5}$	$5.633 * 10^{-13}$	†	0.97
80-95 cm									
1	NEQ	1.0	0.69	2.37	0.233	$17.68 * 10^{-5}$	0.0	ND	0.94
2	NEQ	1.0	1.62	2.37	0.236	$9.64 * 10^{-5}$	0.0	ND	0.97
3	NEF	0.89	1.13	2.37	0.207	$8.20 * 10^{-5}$	0.0	ND	0.97

Nota: NEQ = modelo de no equilibrio químico; NEF = modelo de no equilibrio físico; θ_m/θ = fracción de agua móvil; λ = dispersividad; K_d = coeficiente de distribución; f = fracción de sitios de intercambio en equilibrio instantáneo en el modelo de no equilibrio químico (dos sitios) y la fracción de sitios de adsorción en equilibrio en la región de agua móvil en el modelo de no equilibrio físico (dos regiones); α = tasa a la cual el soluto para de una situación de no equilibrio a una situación de equilibrio; χ = constante de degradación; $t_{0.5}$ = tiempo de vida media; r^2 = coeficiente de determinación; † = tiempo muy largo; ND = dato no determinado para el tiempo que duró el experimento.

Curvas de elusión y lixiviación de imazapyr

La figura 3 muestra las curvas de elusión de imazapyr en ambos suelos. Comparando esta figura con la figura 2, en los dos estratos del perfil estudiado, las curvas de elusión de imazapyr se situaron a la derecha de las curvas de elusión del agua. Las figuras 3c y 3d muestran una curva experimental más delgada y más alta en el subsuelo. Se observa un ligero coleo en todas las curvas de elusión de imazapyr, ligeramente acentuado en el estrato superior, indicando procesos de sorción dependientes del tiempo. Esto se corroboró

en los resultados de la modelación, en donde se observó un buen ajuste del modelo de no equilibrio químico a los datos experimentales en todas las columnas.

En ambos estratos, aproximadamente el 97% del imazapyr lixivió después de cinco volúmenes de poro. Después de drenar 10 volúmenes de poro, 99% de imazapyr lixivió en el estrato superior, en tanto que en el estrato inferior lixivió el total de imazapyr, mostrando que el proceso de adsorción de imazapyr en ambos estratos estudiados fue completamente reversible. Un proceso de adsorción completamente reversible se asocia con una sorción

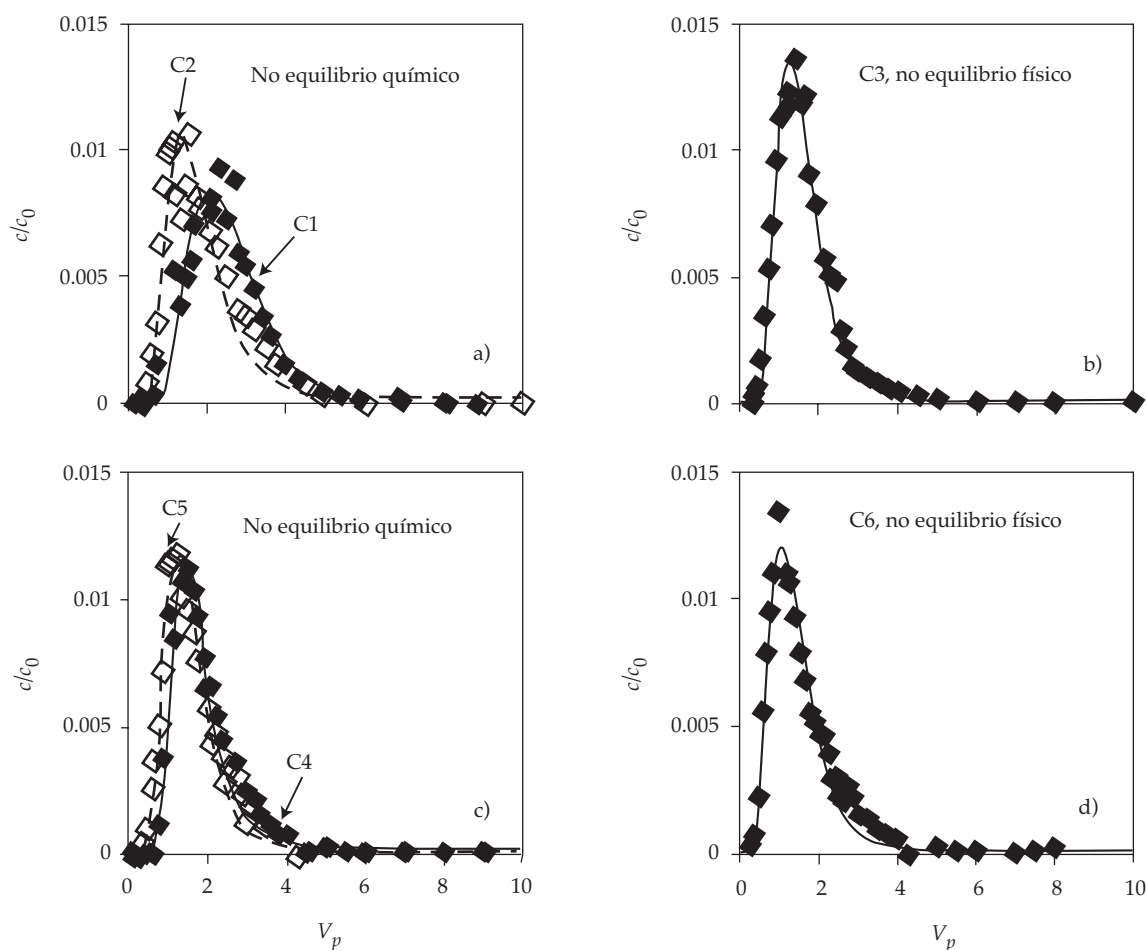


Figura 3. Curvas de elusión experimentales (símbolos) y simuladas (líneas) de imazapyr en tres columnas no disturbadas de dos estratos de un suelo volcánico mexicano; a y b corresponden a columnas del estrato 20-35 cm de profundidad, y c y d corresponden a columnas del estrato 80-95 cm de profundidad.

de tipo electrostática en sitios de sorción de baja energía, con lo cual se puede afirmar que el imazapyr no fue retenido fuertemente en los dos estratos de suelo estudiado.

Parámetros de transporte

En la modelación de las curvas de elusión de imazapyr solamente se ajustaron dos parámetros (f y α). El coeficiente de dispersión D (obtenido del análisis de las curvas de elusión del trazador del agua), el parámetro Retardo R (obtenido de los experimentos en Batch asumiendo adsorción lineal (ecuación (4)) y la tasa de degradación χ , se fijaron durante el ajuste de las soluciones analíticas de la ECD en CXTFIT. Los parámetros de transporte obtenidos se presentan en el cuadro 3. El uso de los valores de K_d obtenidos del Batch ($2.43 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$ en el estrato superior y $2.37 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$ en el estrato inferior) produjo una adecuada descripción de todas las curvas experimentales de imazapyr (r^2 de 0.93 a 0.97), indicando que los experimentos de adsorción en Batch reflejaron bien los procesos de adsorción que ocurrieron en los experimentos de flujo. Para evaluar esto, en el modelo se consideró también R como parámetro de ajuste y se calculó el valor correspondiente de K_d . Este procedimiento condujo a una mejor descripción de las curvas experimentales (r^2 de 0.95 a 0.99) vía una reducción en los valores de K_d , variando de 0.8 a $1.5 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$ en las columnas del estrato superior, y de 1.0 a $1.7 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$ en las columnas del estrato inferior. Estos resultados reflejan el hecho de que la capacidad de adsorción del suelo se ve reducida bajo condiciones de flujo, en las cuales el tiempo de contacto y el número de sitios de sorción del suelo visitados por el soluto son menores respecto a la forma y el tiempo de poner en contacto el soluto con el suelo en experimentos tipo Batch.

Referente al parámetro f , que indica la fracción de sitios de adsorción en equilibrio instantáneo en el modelo de no equilibrio químico, con excepción de la columna C1, en

las columnas C2, C4 y C5, entre 24 y 30% de los sitios de adsorción fue fácilmente accesible al imazapyr. Estudiando el movimiento de 2,4-D en columnas empacadas del mismo suelo, Müller y Duwig (2007) encontraron valores dos veces más altos. Estos autores explicaron que el valor de f está determinado por las características de difusión del soluto a los sitios de sorción en los vacíos internos de la materia orgánica o bien a los sitios de adsorción localizados sobre las superficies sorbentes. Esta diferencia puede explicarse porque el tamaño de la molécula de imazapyr es más grande que la molécula de 2,4-D, lo cual impidió que el imazapyr visitara más sitios.

Para las columnas C3 y C6, donde el imazapyr se movió en condiciones de no equilibrio físico, f representa la fracción de sitios de adsorción presentes en la región de agua móvil. En las columnas donde imazapyr se movió en no equilibrio físico, f estuvo en el rango de 20 a 32% indicando que más del 70% de los sitios de adsorción estuvo presente en la región de agua inmóvil.

Respecto a α , parámetro que refleja la velocidad a la que el imazapyr pasó de una situación de no equilibrio a una situación de equilibrio, se obtuvieron valores en el mismo orden de magnitud para las columnas de ambos estratos.

La magnitud de los valores indica que la difusión dentro de la materia orgánica sorbente (caso de columnas en no equilibrio químico) o la difusión dentro de agregados (caso de la columna en no equilibrio físico) fue el proceso dominante y que determinó el retardo de imazapyr.

Los resultados anteriores indican que la variabilidad en los parámetros K_d , f y α , entre columnas de un mismo estrato están determinadas más por la variación espacial de estructuración del suelo que por sus características fisicoquímicas; en este caso son poco variables (ver cuadro 2). Montoya *et al.* (2006), sugirieron que relaciones entre K_d y α , o entre f y α , así como su variabilidad, son evidentes cuando se analizan suelos con

características fisicoquímicas marcadamente diferentes, principalmente en el tipo de materia orgánica y la mineralogía.

En cuanto a la degradación, se obtuvieron tasas de degradación (χ) muy pequeñas para el estrato superior, vidas medias de 39 y 99 meses, y se observó no degradación en el estrato inferior. Los órdenes de magnitud obtenidos para este parámetro son acordes con lo reportado por Vizantinopoulos y Lolos (1994), y Jarvis *et al.* (2006), y son contradictorios a lo determinado por McDowell *et al.* (1997), El Azzouzi *et al.* (1998) y Wang *et al.* (2006), quienes determinaron $t_{0.5}$ de 0.9 a 5.2 meses. Aunque se sabe que la degradación de imazapyr depende de algunas propiedades del suelo (contenido de materia orgánica y pH) y de algunas condiciones experimentales (presencia de oxígeno, contenido de humedad y temperatura), la casi nula degradación de imazapyr en el perfil del suelo estudiado se explica principalmente por la baja actividad microbiana que ocurre en los andosoles debido a la alta retención del fosfato y a la alta estabilidad de la materia orgánica (Nanzzyo, 2002). Los suelos ándicos ofrecen condiciones poco favorables para el desarrollo de microorganismos: bajo contenido de fósforo disponible y un alto contenido de aluminio extractable (que es tóxico) (Longeri, 1973; Schaefer *et al.*, 1972; Urbina *et al.*, 1972).

Conclusiones

Tres aspectos son relevantes en este estudio:

1. La máxima capacidad de adsorción del suelo sobre imazapyr se expresa por un coeficiente de distribución K_d de $2.4 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$. Dicho valor disminuye en condiciones de flujo, $K_d < 1.7 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$, lo cual indica que el imazapyr es poco retenido en el suelo y entonces se lixivia rápidamente a través del perfil del suelo.
2. La tasa de degradación de imazapyr en este suelo fue baja y en consecuencia altamente persistente, con tiempo de vida media superior a 39 meses.

3. Procesos de no equilibrio tanto químico como físico estuvieron involucrados en el movimiento del imazapyr. Particularmente el no equilibrio físico es relevante, por el hecho de que evidencia la presencia de rutas preferenciales que contribuyen a un transporte más rápido de imazapyr hacia los estratos inferiores del suelo.

En síntesis, estos resultados muestran que, bajo determinadas condiciones de flujo, una baja adsorción y una alta persistencia conducen a una alta movilidad de imazapyr en el perfil del suelo, lo cual implica un alto riesgo de contaminación de las aguas subterráneas por el plaguicida.

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) de México, que a través del proyecto SEP-CONACYT-47293 suministró fondos y proporcionó una beca postdoctoral al doctor Elías Raymundo. Al doctor Enrique Mejía Sáenz, por proporcionar fondos a esta investigación y el espacio en el Laboratorio de Ciencias Ambientales del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Al doctor José Hipólito Rodolfo Mendoza Hernández, por complementar los fondos necesarios para esta investigación. Al doctor Jorge Etchevers, por el espacio en el Laboratorio de Fertilidad de Suelos, Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, y el uso del equipo de cromatografía líquida de alta resolución. Al maestro en ciencias Pedro Morales Puente, a Edith Cienfuegos Alvarado, a Francisco Javier Otero Trujano y a Rafael Puente Martínez, del Laboratorio de Geoquímica Isotópica (LUGIS) del Instituto de Geología de la Universidad Autónoma de México, por la realización de análisis de H_2^{18}O .

Recibido: 23/06/09

Aprobado: 21/12/10

Referencias

- AMAYA-CHÁVEZ, A., MARTÍNEZ-TABACHE, L., LÓPEZ-LÓPEZ, E., and GALAR-MARTÍNEZ, M. Methyl parathion toxicity to and removal efficiency by *Typha latifolia* in water and artificial sediments. *Chemosphere*. Vol. 63, 2006, pp. 1124-1129.

- ARÉVILA, A., RAMOS, J. y JIMÉNEZ, B. Evaluación de la contaminación dispersa por agroquímicos en México. *Ingeniería Ambiental*. Vol. 31, 1997, pp. 22-32.
- BASKARAN, S., BOLAN, N., RAHMAN, A., and TILLMAN, R. Pesticide Sorption by Allophanic and Non-allophanic Soils of New Zealand. *New Zealand Journal of Agricultural Research*. Vol. 39, 1996, pp. 297-310.
- BUSH, B.P., BERISFORD, Y.C., TAYLOR, J.W., NEARY, D.G., and MILLER, K.V. Operational monitoring of forest site preparation herbicides in the coastal plain: assessment of residues in perched water table. *Proceedings, 1995 Southern Weed Science Soc.* Seattle, Washington, USA, 1995, pp. 115-120.
- CARVALHO, F.P., GONZÁLEZ, F., VILLENEUVE, J.P., CATTINI, C., HERNÁNDEZ, M., MEE, L.D., and FOWLER, S.W. Distribution, fate and effects of pesticide residues in tropical coastal lagoons of Northwestern Mexico. *Environmental Technology*. Vol. 23, 2002, 1257-1270.
- CICOPLAFEST. Disponible para World Wide Web: <http://www.sagarpa.gob.mx/cicoplafest>, 17 de julio de 2007.
- COHEN, S.Z., CREEGER, S.M., CARSEL, R.F., and ENFIELD, C.G. Potential for pesticide contamination of groundwater resulting from agricultural uses. En: Kruger, R.F. and Seiber, J.N. *Treatment and disposal of pesticide wastes*. Washington: American Chemistry Society, 1984, pp. 297-325.
- DAS, B.S. and KLUITENBERG, G.J. Moment analysis to estimate degradation rate constants from leaching experiments. *Soil Science Society of American Journal*. Vol. 60, 1996, pp. 1724-1731.
- EL AZZOUZI, M., DAHCHOUR, A., BOUHAOUSS, A., and FERHAT, M. Study on the Behavior of Imazapyr in Two Moroccan Soils. *Weed Research*. Vol. 38, 1998, pp. 217-220.
- EPA. *Imazapyr Risk Assessments, Notice of Availability, and Risk Reduction Options*. EPA, USDA, Vol. 70, No. 244, 2005, pp. 75799-75801. Citado el 23 de abril de 2009. Disponible para World Wide Web: <http://www.epa.gov/fedrgstr/EPA-PEST/2005/December/Day-21/p7633.htm>.
- FIRMINO, L.E., TUFFI, S.L., FERREIRA, F.A., FERREIRA, L.R., and TIBURCIO, R.A. Sorção do imazapyr® em Solos como Diferentes Texturas. *Planta Daninha*. Vol. 26, 2008, pp. 395-402.
- GARCÍA-CARRILLO, M. *Evaluación de la contaminación del suelo por plaguicidas organoclorados (caso de estudio: Comarca Lagunera)*. Tesis para maestría. Montecillo, México: Colegio de Postgraduados, 1997, 100 pp.
- GARCÍA DE LLASERA, M.P. and BERNAL-GONZÁLEZ, M. Presence of carbamate pesticides in environmental waters from the northwest of Mexico: determination by liquid chromatography. *Water Resource*. Vol. 35, No. 8, 2001, 1933-1940.
- GOODRICH, J.A., LYKINS, B.W., and CLARK, R.M. Drinking Water from Agriculturally Contaminated Groundwater. *Journal of Environmental Quality*. Vol. 20, No. 8, 1991, pp. 707-717.
- HERNÁNDEZ-ROMERO, A., TOVILLA-HERNÁNDEZ, C., MALO, E., and BELLO-MENDOZA, R. Water Quality and Presence of Pesticides in a Tropical Coastal Wetland in Southern México. *Marine Pollution Bulletin*. Vol. 48, 2004, pp. 1130-1141.
- HURLEY, P. and SHANAMAN, L. *Risks of imazapyr Use to the Federally Listed California Red Legged Frog (Rana aurora draytonii)*. Washington, D.C.: Environmental Fate and Effects Division: Office of Pesticide Programs, 2007. Citado el 6 de diciembre de 2010. Disponible para World Wide Web: <http://www.epa.gov/espp/litstatus/effects/redleg-frog/index.html#imazapyr>.
- INSTITUTO NACIONAL DE ECOLOGÍA. *Características de peligrosidad ambiental de los plaguicidas*. Manual de trabajo. México, D. F.: Instituto Nacional de Ecología, 2000, 270 pp.
- ISMAIL, B.S. and AHMAD, A.R. Attenuation of the herbicidal activities of glufosinate-ammonium and Imazapyr® in two soils. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. Vol. 47, 1994, pp. 279-285.
- JARVIS, N. A review of Non-equilibrium Water Flow and Solute Transport in Soil Macropores: Principles, Controlling Factors and Consequences for Water Quality. *European Journal of Soil Science*. Vol. 58, 2007, pp. 523-546.
- JARVIS, N., ALMQVIST, S., STENSTRÖM, J., BÖRJESSON, E., JONSSON, E., and TORSTENSSON, L. Modelling the Leaching of Imazapyr in a Railway Embankment. *Pest Management Science*. Vol. 62, 2006, pp. 940-946.
- JENKINS, R.S., WEHTJE, G.R., MORGAN, J.M., and BOLLINGER, A.F. Temperature Effects on Retention of Atrazine and Imazapyr® in Soils. *Water, Air, and Soil Pollution*. Vol. 118, 2000, pp. 169-178.
- KAICHOUH, G., OTURAN, N., OTURAN, M., EL KACEMI, K., and EL HOURCH, A. Degradation of the Herbicide Imazapyr® by Fenton reactions. *Environmental Chemistry Letters*. Vol. 2, 2004, pp. 31-33.
- LONGERI, L. *Contribución al estudio microbiológico de algunos suelos chilenos*. Boletín Técnico-Suelos N° 48. Chillán, Chile: Universidad de Concepción, Escuela de Agronomía, Departamento de Suelos, 1973, 19 pp.
- MADRIGAL, I., BENOIT, P., BARRIUSO, E., RÉAL, B., DUTERTRE, A., MOQUET, M., TREJO, M., y ORTIZ, L. Degradación de plaguicidas en dispositivos amortiguadores: barreras de hierba y zonas arboladas: caso del isoproturón. *Agrociencia*. Vol. 41, núm. 2, 2007, pp. 205-217.
- MAGESAN, G.N., VOGELER, I., CLOTHIER, B.E., GREEN, S.R., and LEE, R. Solute Movement through an Allophanic Soil. *Journal Environmental Quality*. Vol. 32, 2003, pp. 2325-2333.
- MCDOWELL, R., CONDRON, L., MAIN, B., and DASTGHEIB, F. Dissipation of imazapyr, flumetsulam

- and thifensulfuron in soil. *Weed Research*. Vol. 37, 1997, pp. 381-389.
- MONTOYA, J.C., COSTA, J. L., LIEDL, R., BEDMAR, F., DANIEL, P. Effects of soil type and tillage practice on atrazine transport through intact soil cores. *Geoderma*. Vol. 137, 2006, pp. 161-173.
- NANZYU, M. Unique properties of volcanic ash soils. *Global Environmental Resource*. Vol. 6, pp. 2002, pp. 99-112.
- NORMA OFICIAL MEXICANA. *Agua para Uso y Consumo Humano. Límites Máximos Permisibles de la Calidad del Agua, Control y Vigilancia de los Sistemas de Abastecimiento*. PROY-NOM-SSA1-250-2007, 2007. Citado el 23 de abril de 2009. Disponible para World Wide Web: <http://www.cofemermir.gob.mx/uploadtests/13865.59.59.1.NOM%20CALIDAD%20DE%20AGUA.doc> 2/04/2008.
- PÉREZ, M.A., SEGURA, A., GARCÍA, R., COLINAS, T., PÉREZ, M., VÁZQUEZ, A. y NAVARRO, H. Residuos de plaguicidas organofosforados en cabezuela de brócoli (*Brassica oleracea*) determinado por cromatografía de gases. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. Vol. 25, núm. 2, 2009, pp. 103-110.
- PRADO, B. *Etude du mouvement de l'eau et du transfert réactif du nitrate dans les sols volcaniques du bassin versant élémentaire de la Loma, Mexique*. Doctoral dissertation. Grenoble, France: University Joseph Fourier, 2006, 231 pp.
- PRADO, B., DUWIG, C., HIDALGO, C., GÓMEZ, D., YEE, H., PRAT, C., ESTEVES, M., and ETCHEVERS, J. Characterization, Functioning, and Classification of Two Volcanic Soils Profiles under Different Land Uses in Central Mexico. *Geoderma*. Vol. 139, 2007, pp. 300-313.
- PUSINO, A., PETRETTO, S., and GESSA, C. Adsorption and desorption of imazapyr by soil. *J. Agric. Food Chem.*, Vol. 45, No. 3, 1997, pp. 1012-1016.
- ROY, W.R., KRAPAC, I.G., CHOU, S.F.J., and GRIFFIN, R.A. *Batch-type procedures for estimating soil adsorption of chemicals*. EPA/530-SW-87-006-F. Illinois: U.S. Environmental Protection Agency, 1991, 100 pp.
- SCHAEFER, R., URBINA, A., SAN MARTÍN, E. y KLENNER, N. Reconocimiento e investigación en los suelos. Estudio sobre actividad de las poblaciones microbianas en suelos de Chile. Informe Técnico. Roma: FAO, 1972, 45 pp.
- SIMUNEK, J., VAN GENUCHTEN, M.TH., SEJNA, M., TORIDE, N., and LEIJ, F.J. *Stanmod, version 2.2. Studio of Analytical Models for Solving the Convection-Dispersion Equation*. Departament of Environmental Sciences, University of California Riverside, and US Salinity Laboratory, USDA, ARS, 1999. Disponible para World Wide Web: www.hydrus2d.com.
- SOTO, M., PRADO, B., RAYMUNDO, E., HIDALGO, C. y ETCHEVERS, J. Extracción del suelo del herbicida imazapyr sin el uso de solventes orgánicos. Enviado a la *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 2010.
- SPOSITO, G. Soil particle surface. In *The Chemistry of Soils*. Sposito, G. (editor). New York: Oxford University Press, 1989, pp. 136-141.
- STEVENSON, F.J. Organic matter reactions involving herbicides in soil. *Journal of Environmental Quality*. Vol. 1, 1972, pp. 333-339.
- TORIDE, N., LEIJ, F.J., and VAN GENUCHTEN, M. Th. *The CXTFIT Code for Estimating Transport Parameters from Laboratory or Field Tracer Experiments*. Riverside, USA: USDA Publ., 1999, 119 pp.
- ULBRICH, A.V., SOUZA, J.R., and SHANER, D. Persistence and Carryover Effect of Imazapic and imazapyr in Brazilian Cropping Systems. *Weed Technology*. Vol. 19, 2005, pp. 986-991.
- URBINA, A., SAN MARTÍN, E. y SCHAEFER, R. La actividad metabólica de algunos grupos fisiológicos de microbios en suelos ñadis de Chile. II. Mineralización del carbono y nitrógeno orgánico en condiciones de campo. *Agricultura Técnica*. Vol. 31, 1972, pp. 1-9.
- VAN GENUCHTEN, M. and WIERENGA, P.J. Mass Transfer Studies in Sorbing Porous Media. I. Analytical Solutions. *Soil Science Society of America journal*. Vol. 40, No. 4, 1976, pp. 473-480.
- VIRAMONTES, D., DUWIG, C., ESTEVES, M., ROJAS, F., LAPETITE, J.M., MEDINA, R. y DE LEÓN, B. Instrumentación de una microcuenca experimental. *Anuario IMTA*. 2003. Disponible para World Wide Web: <http://www.imta.gob.mx/instituto/historial-proyectos/rd/2003/RD3-Instrumentacion.pdf>.
- VIZANTINOPOULOS, S. and LOLOS, P. Persistence and Leaching of the Herbicide Imazapyr in Soil. *Bulletin of Environmental Contamination Toxicology*. Vol. 52, 1994, pp. 404-410.
- WANG, Q. and LIU, W. Correlation of imazapyr adsorption and Desorption with Soil Properties. *Soil Science*. Vol. 164, No. 6, 1999, pp. 411-416.
- WANG, X., WANG, H., and FAN, D. Degradation and Metabolism of Imazapyr in Soils under aerobic and Anaerobic Conditions. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*. Vol. 86, No. 8, July, 2006, pp. 541-555.
- WEHTJE, G., DICKENS, R., WILCUT, J.W., HAJEK, B.F. Sorption and mobility of sulfometuron and imazapyr in five Alabama soils. *Weed Science*. Vol. 35, 1987, pp. 858-864.
- WHITE, R., HENG, L., and EDIS, R. Transfer function approaches to modeling solute transport in soils. En Selim HM, Ma L (editors). *Physical Nonequilibrium in Soils: Modelling and Application*. Chelsea, USA: Ann Arbor Press, 1998, pp. 311-347.

Abstract

RAYMUNDO-RAYMUNDO, E., PRADO-PANO, B.L., NIKOLSKII-GAVRILOV, I. & MENDOZA-HERNÁNDEZ, J.H.R. *Sorption, degradation and leaching of imazapyr in volcanic soil in Mexico. Water Technology and Sciences, formerly Hydraulic engineering in Mexico (in Spanish). Vol. II, No. 3, July-September, 2011, pp. 61-75.*

Pesticide leaching through a soil profile not only implies the risk of surface and ground water contamination but also the reduction of agricultural productivity. The objective of this work was to evaluate the sorption, leaching, and degradation processes present during the transport of imazapyr through the profile of allophanic soil. Batch adsorption experiments and displacement experiments on undisturbed soil columns (8.5 cm diameter and 15 cm length) were performed. On each column, a pulse of $H_2^{18}O$ and imazapyr was applied. The solutes were displaced through the column by using 10 pore volumes of a reconstituted soil solution. The herbicide behavior in the soil columns was simulated with the CXTFIT 2.1 code. Analytical solutions for the convection-dispersion equation were adjusted to experimental data by means of equilibrium and non-equilibrium models. Water movement showed both physical homogeneity and heterogeneity in the columns. About 99% of the applied imazapyr was recovered in leachates at the end of the experiments. The dispersivity ranged from 0.7 to 1.6 cm. The distribution coefficient K_d was estimated at around $2.40 \text{ cm}^3 \text{ g}^{-1}$ for both soil profile depths studied. The calculated imazapyr half-life was ≥ 39 months. It was concluded that for the soils studied, imazapyr was hardly adsorbed and persistent, which contributes to a high mobility of the pesticide through the soil and implies a high risk of ground water contamination.

Keywords: imazapyr, allophanic soil, leaching, degradation.

Dirección institucional de los autores

Dr. Elías Raymundo-Raymundo

Estudiante de Postdoctorado
Colegio de Postgraduados
Departamento de Hidrociencias
km 36.5 de la carretera México-Texcoco
56230 Estado de México, MÉXICO
Teléfono: +52 (595) 9520 200, extensión 1175
Fax: +52 (595) 9520 237
eliasr@colpos.mx

Dra. Blanca Lucía Prado-Pano

Investigador Asociado
Universidad Nacional Autónoma de México
Instituto de Geología
Departamento de Edafología
Ciudad Universitaria
México, D.F., MÉXICO
Teléfono: +52 (55) 5622 4286, extensión 159
Fax: +52 (55) 5804 5911
bprado@geologia.unam.mx

Dr. Iouri Nikolskii Gavrilov

Profesor investigador Titular
Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo
Departamento de Hidrociencias
Km 36.5 de la carretera México-Texcoco
56230 Estado de México, MÉXICO
Teléfono: +52 (595) 9520 200, extensión 1175
Fax: +52 (595) 9520 237
nikolski@colpos.mx

Dr. José Hipólito Rodolfo Mendoza-Hernández

Profesor investigador Titular
Colegio de Postgraduados, Campus Tabasco
Departamento de Hidrociencias
Carretera Carlos A. Molina s/n, carretera Cárdenas
Huimanguillo km 3
86500 Cárdenas, Tabasco, MÉXICO
Teléfonos: +52 (93) 7372 4099 y 7372 2386
rodolfo@colpos.mx