

INFLUÊNCIA DO pH NA SORÇÃO DE IMAZAQUIN EM UM LATOSSOLO VERMELHO ACRIFÉRRICO⁽¹⁾

W. S. D. ROCHA⁽²⁾, L. R. F. ALLEONI⁽³⁾, J. B. REGITANO⁽⁴⁾,
J. C. CASAGRANDE⁽⁵⁾ & V. L. TORNISIELLO⁽⁶⁾

RESUMO

O herbicida imazaquin é uma molécula orgânica com grupos funcionais ionizáveis, sendo sua sorção dependente do pH e da carga elétrica líquida do solo. Neste trabalho, foi estudada a sorção do imazaquin nas camadas superficiais e subsuperficiais de um Latossolo Vermelho Acriférrico típico textura muito argilosa, considerando quatro diferentes valores de pH. Com uso de moléculas radiomarcadas com carbono-14, determinou-se a quantidade sorvida pela diferença entre a quantidade aplicada e a remanescente em solução. Os resultados foram ajustados à equação de Freundlich, para determinação do coeficiente de sorção (K_f). De maneira geral, o herbicida apresentou baixa sorção no solo. Nas amostras coletadas nas duas profundidades, a sorção diminuiu com a elevação do pH. Para um mesmo valor de pH, a sorção foi maior no horizonte subsuperficial do que no superficial, sendo a carga líquida positiva resultante do baixo teor de matéria orgânica e dos elevados conteúdos de óxidos de ferro e de alumínio. Quando a carga elétrica líquida do solo foi positiva, não foi possível prever a sorção de imazaquin, considerando apenas a especiação da molécula e a sua partição na fração orgânica do solo.

Termos de indexação: herbicida, imazaquin, pH, sorção, ácido.

⁽¹⁾ Parte da Tese de Mestrado do primeiro autor, apresentada à Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" - ESALQ, Piracicaba (SP). Recebido para publicação em novembro de 1999 e aprovado em maio de 2000.

⁽²⁾ Engenheiro-Agrônomo, Doutorando em Solos e Nutrição de Plantas - ESALQ/USP, Caixa Postal 9, CEP 13418-900 Piracicaba (SP). Bolsista do CNPq. E-mail: wdrocha@carpa.ciagri.usp.br

⁽³⁾ Professor do Departamento de Solos e Nutrição de Plantas - ESALQ/USP. Bolsista do CNPq. E-mail: lrfalleo@carpa.ciagri.usp.br

⁽⁴⁾ Pesquisadora da Seção de Ecotoxicologia do Centro de Energia Nuclear na Agricultura - CENA/USP, Caixa Postal 96, CEP 13400-970 Piracicaba (SP). E-mail: regitano@cena.usp.br

⁽⁵⁾ Professor do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de São Carlos - UFSCar, Caixa Postal 153, CEP 13600-970 Araras (SP). Bolsista do CNPq. E-mail: bighouse@power.ufscar.br

⁽⁶⁾ Pesquisador da Seção de Ecotoxicologia do Centro de Energia Nuclear na Agricultura - CENA/USP. E-mail: vltornis@cena.usp.br

SUMMARY: *INFLUENCE OF pH IN IMAZAQUIN SORPTION ON AN ANIONIC ACRUDOX*

Imazaquin herbicide is an organic molecule presenting ionizable functional groups, with its sorption depending on soil pH and electrical charges. In this research, sorption of imazaquin was evaluated on an Anionic Acrudox at different soil depths and pH values. Radiolabelled (¹⁴C) molecules were employed to study imazaquin sorption, which was estimated by the difference between applied concentration and that remaining in solution. The sorption data were fitted to Freundlich equation to determine the sorption coefficient values (K_p), which were, overall, low in the studied soil. At both soil depths, sorption decreased as pH increased. However, at a similar pH value, sorption was higher on the subsurface than on the surface sample, probably due to the positive charges resulting from the low organic matter and high Al and Fe oxide contents. When the soil surface charges were positive it was not possible to predict imazaquin sorption only from molecule speciation and its hydrophobic partition into soil organic fractions.

Index terms: herbicide, imazaquin, pH, sorption, acric.

INTRODUÇÃO

A contaminação de solos e águas pelo uso de pesticidas pode comprometer os ecossistemas ambientais e a saúde do homem. Para prevenir estes problemas, é preciso conhecer a dinâmica dos pesticidas no ambiente após sua aplicação, que é bastante influenciada pelo mecanismo de sorção (retenção) às partículas do solo. Para compreender os mecanismos de sorção de um pesticida ao solo, é fundamental conhecer a composição da matriz do solo (Koskinen & Harper, 1990), além das características físico-químicas da molécula.

Imazaquin (ácido 2-[4,5-dihidro-4-metil-4-(1-metiletil)-5-oxo-1H-imidazol-2-il]-3-quinolina-carboxílico) é um herbicida de uso intensivo no Brasil, com amplo espectro de controle de plantas daninhas associadas à cultura da soja (Goetz et al., 1986; Basham et al., 1987). A molécula contém dois grupos funcionais ionizáveis: um grupo carboxílico (ácido, $pK_a = 3,8$) e um grupo quinolina (básico, $pK_a = 2,0$) (Stougaard et al., 1990). Dada sua natureza anfótera, fatores relacionados com o solo, como teor de carbono orgânico (C.O.), pH, força iônica e potencial elétrico, devem ser considerados para estimar a sorção do imazaquin. Para solos com carga permanente negativa, tem-se observado que a sorção de imazaquin é diretamente proporcional ao teor de C.O. (correspondente ao número de sítios hidrofóbicos) e inversamente proporcional ao pH do solo (especificação da molécula).

Regitano et al. (1997) propuseram o seguinte modelo para quantificar a sorção de imazaquin nestes solos: $K_{oc} = K_{oc,n} \phi_n + K_{oc,a} (1 - \phi_n)$, sendo resultante da soma dos coeficientes de sorção normalizada em relação aos teores de C.O. (K_{oc}) para as espécies neutras ($K_{oc,n}$) e aniônicas ($K_{oc,a}$), na qual

ϕ_n representa a proporção de espécies neutras. Os autores verificaram que alguns solos com maior quantidade de óxidos, hidróxidos e C.O. apresentaram desvios em relação ao modelo, demonstrando que a sorção do imazaquin estava sendo influenciada por interações não-hidrofóbicas com a matéria orgânica ou superfícies minerais.

Na faixa de pH mais comum dos solos tropicais agricultáveis (5,0 a 6,5), o imazaquin comporta-se predominantemente como ânion orgânico. Como a maioria dos solos tem carga elétrica líquida negativa, ocorre baixa sorção do imazaquin aos seus colóides em virtude das forças eletrostáticas repulsivas (Renner et al., 1988; Pires et al., 1997). Com decréscimo do pH do solo, o imazaquin converte-se para a forma neutra e, nessa condição, as interações hidrofóbicas com a matéria orgânica do solo acentuam-se (Best & Weber, 1974; Colbert et al., 1975).

A maioria dos trabalhos relativos à sorção de pesticidas citados na literatura refere-se à camada superficial (0-0,2 m) de solos de regiões com clima temperado, os quais normalmente apresentam altos teores de matéria orgânica e carga elétrica negativa permanente na superfície de seus colóides, ou a solos de regiões tropicais também com carga líquida negativa.

Alguns Latossolos, entretanto, têm comportamento físico-químico diferenciado, pois a carga elétrica de seus colóides é variável, ou seja, eles podem exibir balanço de cargas negativo ou positivo, dependendo das condições do meio. Como exemplo, estão os ácidos, que representam o extremo na escala de intemperismo e podem apresentar carga líquida positiva no horizonte B (Alleoni & Camargo, 1995), graças aos elevados teores de óxidos de ferro e de alumínio e aos baixos teores de matéria orgânica, gerando valores de ponto de efeito salino nulo

(PESN) superiores aos de pH em água. Neste horizonte, a retenção de ânions (inorgânicos e orgânicos) pode ser superior à de cátions (Alleoni & Camargo, 1994), podendo diminuir o risco de contaminação de águas superficiais e, ou, subterrâneas. Os solos ácidos têm capacidade efetiva de troca de cátions (Ca + Mg + K + Na + Al) menor do que 15 mmol_c kg⁻¹ de argila e pH medido em KCl 1,0 mol L⁻¹ superior ou igual a 5,0, ou ΔpH (pH_{KCl} - pH_{H₂O}) positivo ou nulo (EMBRAPA, 1999).

Quanto maior o nível de detalhamento dos levantamentos, maior a probabilidade de se encontrarem solos classificados como ácidos. Conseqüentemente, torna-se necessário conhecer melhor o comportamento de corretivos, fertilizantes e defensivos agrícolas nesse tipo de solo. Neste trabalho, estudou-se o efeito do pH do solo na sorção do herbicida imazaquin em um Latossolo Vermelho Acriférico típico textura muito argilosa, coletado em superfície e em profundidade. Avaliou-se, também, o modelo de Regitano et al. (1997) quanto à sua capacidade de estimar a sorção do referido herbicida nesse tipo de solo.

MATERIAL E MÉTODOS

Foram utilizadas amostras de um Latossolo Vermelho Acriférico típico textura muito argilosa, localizado no município de Ribeirão Preto, coletadas na camada superficial (0 a 0,2 m) e na de maior expressão do horizonte B (1,0 a 1,4 m).

Os métodos para as análises químicas, físicas e mineralógicas, realizadas no Departamento de Solos e Nutrição de Plantas da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", encontram-se em Camargo et al. (1986). O C.O. foi obtido após oxidação da matéria orgânica do solo com solução de dicromato de potássio em presença de ácido sulfúrico e titulação do excesso de dicromato com sulfato ferroso amoniacal. Os teores de óxidos (SiO₂, Fe₂O₃ e Al₂O₃) foram obtidos após ataque com ácido sulfúrico, e com eles foram calculados os índices de intemperismo: $K_i = (SiO_2/Al_2O_3) \times 1,7$ e $K_r = \{(SiO_2/60) / [(Al_2O_3/102) + (Fe_2O_3/160)]\}$. A quantidade de ferro (Fe_d) e alumínio (Al_d) foi extraída com ditionito-citrato-bicarbonato de sódio (pH 7,3), tendo sido o ferro reduzido pelo ditionito de sódio e complexado pelo citrato de sódio, permanecendo em solução. A análise granulométrica foi feita pelo método do densímetro. A gibbsita e a caulinita foram quantificadas por meio da Análise Térmica Diferencial (ATD) na fração argila deferrificada e isenta de matéria orgânica.

Com base no método descrito por Barrow (1983, 1984), as amostras de solo (4 kg) foram incubadas com CaCO₃ p.a. e HCl 1 mol L⁻¹ para obter quatro valores de pH na faixa de 3,0 a 8,0. As amostras de

superfície foram incubadas com 3 doses de CaCO₃ (4, 8 e 32 g) e 1 dose de HCl (320 mL), e as amostras de profundidade foram incubadas com 2 doses de CaCO₃ (4 e 8 g) e 2 doses de HCl (160 e 320 mL), além das testemunhas (sem CaCO₃ e sem HCl). A umidade do solo foi mantida constante durante toda incubação (30% em relação à massa de TFSA), até atingir pH constante (atingido após 90 dias). Posteriormente, as amostras foram secas ao ar, peneiradas (2 mm) e armazenadas em sacos plásticos. Nessas amostras, foi obtido o pH em CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹. O ponto de efeito salino nulo (PESN) foi obtido pelo método da titulação com H⁺ e OH⁻, em três diferentes concentrações de KCl (0,1; 0,01 e 0,001 mol L⁻¹), correspondendo o PESN ao ponto de interseção das curvas de titulação. Na seqüência, foi calculado o potencial elétrico superficial (Ψ₀) por meio da equação Ψ₀ = 59,1 (PESN - pH).

O estudo de sorção foi feito no centro de Energia Nuclear na Agricultura da USP, em Piracicaba (SP). Para obtenção das isotermas de sorção, foi empregada molécula radiomarcada de imazaquin (¹⁴C) com atividade específica = 0,80 MBq mg⁻¹ e pureza = 98%. Aliquotas de 5 mL de cinco soluções de imazaquin (2, 4, 8, 16 e 32 μmol L⁻¹, em CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹) foram adicionadas a 2,00 g de amostras de terra fina seca ao ar, em triplicata, devidamente acondicionadas em tubos de centrífuga (50 mL). As amostras foram agitadas em sala climatizada a 25 ± 2°C, por 24 h, a 200 agitações min⁻¹. Após este período, os tubos com as amostras foram centrifugados a 10.000 rpm, por 15 min, e alíquotas de 1 mL dos sobrenadantes foram retiradas e adicionadas a 10 mL de solução cintiladora, para determinar a concentração de imazaquin em equilíbrio na solução (C_e), por meio de contagem em cintilador líquido (CL). A concentração de imazaquin retido foi calculada pela diferença entre a concentração inicial (C_i) e a concentração em solução (C_e) após atingir equilíbrio. Posteriormente, os sobrenadantes foram descartados e os tubos pesados para determinar a quantidade de imazaquin remanescente na solução.

Para determinar a percentagem de imazaquin extraída das diferentes amostras de solo, alíquotas de 10 mL de solução de CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹ foram adicionadas aos tubos, que foram agitados e centrifugados, conforme realizado no teste de sorção. Posteriormente, alíquotas de 1 mL dos sobrenadantes foram retiradas e adicionadas a 10 mL de solução cintiladora para determinar a concentração de imazaquin em solução. O mesmo procedimento foi repetido mais uma vez. Finalizando, as amostras de solos remanescentes no fundo dos tubos foram secas ao ar, homogeneizadas, pesadas e submetidas à combustão para determinar a quantidade de imazaquin retida no solo.

Os resultados de sorção foram ajustados à equação linearizada de Freundlich $\log S = \log K_f + N \log C_e$, na qual S = quantidade de imazaquin sorvida,

K_f = constante de sorção de Freundlich, C_e = concentração de imazaquin na solução e N = declividade da isoterma. Para efetuar comparações entre as amostras e o modelo de Regitano et al. (1997), o coeficiente de partição (K_d) foi calculado, assumindo $N = 1$ e normalizado para o teor de C.O. do solo, obtendo-se, assim, o valor de K_{oc} ($K_{oc} = K_d/C.O.$).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados das análises físicas e químicas do solo, em superfície e em profundidade, encontram-se no quadro 1. Trata-se de um solo altamente intemperizado, classificado como gibbsítico sesquioxídico, $K_i \leq 0,75$ e $K_r < 0,75$, de acordo com Resende & Santana (1988), com elevados teores de argila e óxidos de alumínio e de ferro. Em média, 50% do total de óxidos de ferro encontra-se na forma mais cristalina. Sabe-se que o óxido de ferro é o principal responsável pela geração de cargas positivas neste tipo de solo com carga variável (Yu, 1997).

Na camada superficial (0-0,2 m), o valor do ponto de efeito salino nulo (PESN) baixo deveu-se à presença da matéria orgânica (PESN = 2, Uehara, 1988) que, provavelmente, estaria revestindo a superfície dos óxidos (PESN entre 7,5 e 9,0, Bell & Gillman, 1978), bloqueando, assim, os sítios de carga positiva. Em profundidade, o PESN foi mais alto em decorrência do baixo teor de matéria orgânica e do maior conteúdo de gibbsita e óxidos de ferro. O potencial elétrico do solo foi positivo sempre que o pH do solo mostrou-se menor que o PESN, fenômeno este observado, em profundidade, para os valores de pH 3,5 e 5,1, e, em superfície, para o pH 3,4 (Quadro 2).

Os valores dos coeficientes de sorção de Freundlich (K_f) e do coeficiente de partição (K_d) estão apresentados no quadro 2. De forma geral, a sorção do imazaquin foi baixa, independentemente da profundidade de

amostragem e do valor de pH do solo. À exceção das amostras subsuperficiais, com valores de pH 3,5 e 5,1, e da superficial, com pH 3,4, na qual os valores do potencial elétrico do solo foram positivos, isso seria esperado, uma vez que mais de 80% das moléculas de imazaquin apresentaram-se na forma aniônica (ϕ_a , Quadro 2) e, portanto, foram repelidas pelas cargas negativas do solo.

A figura 1 apresenta os valores da concentração de equilíbrio (C_e) versus a quantidade sorvida (S) de imazaquin nos diferentes valores de pH, ajustados pela equação linearizada de Freundlich. A quantidade de moléculas sorvidas aumentou à medida que aumentou a concentração de imazaquin em solução, constatação esta também feita por Hang et al. (1996). Ao longo do intervalo de concentração estudado, este aumento foi praticamente linear (N variou de 0,86 a 0,98, Quadro 2). Resultados semelhantes foram obtidos em outras pesquisas (Loux et al., 1989; Regitano et al., 1997).

Quanto maior o valor de pH do solo, menor foi a sorção do imazaquin ao solo (Figura 1 e Quadro 2). Considerando o caráter de ácido fraco do imazaquin, houve aumento na percentagem de espécies aniônicas do herbicida (ϕ_a) no solo com o aumento do pH (Quadro 2), resultante da diferença entre o valor de pK_a (3,8) do grupo carboxílico ácido e o pH do solo (Loux et al., 1989; Regitano et al., 1997). Isso aumentou a repulsão entre as moléculas de imazaquin e os sítios de carga negativa dos colóides do solo. Simultaneamente, a elevação do pH aumentou a polaridade e, com isso, a solubilidade da molécula (Reddy & Locke, 1996), diminuindo seu caráter hidrofóbico e sua capacidade de sorção. Quando o pH do solo baixou a valores próximos ou abaixo do pK_a da molécula, a percentagem de espécies aniônicas (ϕ_a) diminuiu (Quadro 2), aumentando significativamente a percentagem de espécies neutras em solução e, conseqüentemente, a sorção de imazaquin aos colóides (Ladlie et al., 1976; Kells et al., 1980; Nicholls & Evans, 1991). Nas duas amostras (superfície e profundidade), praticamente não houve diferenças entre os valores dos coeficientes

Quadro 1. Atributos físicos e químicos do Latossolo Vermelho Acriférrico

Camada	PESN	C.O.	Argila	Fe _s	Fe _d	Al _s	Al _d	Gibbsita	Caulinita	Ki	Kr
m			g kg ⁻¹ de solo					g kg ⁻¹ de argila ⁽¹⁾			
0-0,2	3,6	20	600	321	131	248	26	375	172	0,77	0,42
1,0-1,4	5,7	5	640	338	158	257	21	431	216	0,75	0,41

⁽¹⁾ argila deferrificada; PESN = ponto de efeito salino nulo; C.O. = carbono orgânico; Fe_s = óxido de ferro obtido após ataque sulfúrico (Fe₂O₃); Fe_d = ferro extraído com ditionito-citrato-bicarbonato de sódio; Al_s = óxido de alumínio obtido após ataque sulfúrico (Al₂O₃); Al_d = alumínio extraído com ditionito-citrato-bicarbonato de sódio; Ki = [SiO₂/Al₂O₃] 1,7] e Kr = {(SiO₂/60)/(Al₂O₃/102) + (Fe₂O₃/160)}.

Quadro 2. Parâmetros da sorção e extração de imazaquin em um Latossolo Vermelho Acriférico e alguns atributos do solo, considerando diferentes valores de pH do solo

pH	Ψ_0	ϕ_a	K_d	K_{oc}	K_f	N	R^2	Imazaquin extraído %
	mV	%	L kg ⁻¹	$\mu\text{mol}^{1-N} \text{ L}^N \text{ kg}^{-1}$				
3,4	+9	28,47	3,23 a ⁽¹⁾	161,5	4,65	0,86	0,999	66,34 ± 3,61
4,4	-49	79,92	1,27 b	63,5	1,72	0,89	0,998	81,91 ± 1,93
5,9	-137	99,21	0,41 c	20,5	0,53	0,91	0,991	86,62 ± 2,25
7,6	-238	99,98	0,20 d	10,0	0,26	0,88	0,925	88,93 ± 3,31
3,5	+128	33,39	4,44 a ⁽¹⁾	880,0	5,91	0,87	1,000	53,14 ± 4,97
5,1	+30	95,23	1,83 b	366,0	2,17	0,94	0,999	80,91 ± 3,29
6,9	-74	99,92	0,30 c	60,0	0,31	0,97	0,955	86,48 ± 2,72
7,7	-119	99,99	0,20 c	40,0	0,19	0,98	0,961	85,52 ± 3,00

⁽¹⁾ Médias com mesma letra não diferem estatisticamente a 5% pelo teste de Tukey dentro de cada profundidade. Ψ_0 = potencial elétrico superficial = $59,1 \times (\text{PESN}-\text{pH})$; ϕ_a = espécies aniônicas de imazaquin = $(1 - \phi_n) \times 100$, em que ϕ_n = espécies neutras de imazaquin = $(1 + 10^{\text{pH} - \text{pK}_a})^{-1}$; K_{oc} = constante de partição normalizada em relação ao teor de C.O.; K_f = coeficiente de sorção de Freundlich; K_d = coeficiente de partição (para N = 1) e N = declividade da isoterma.

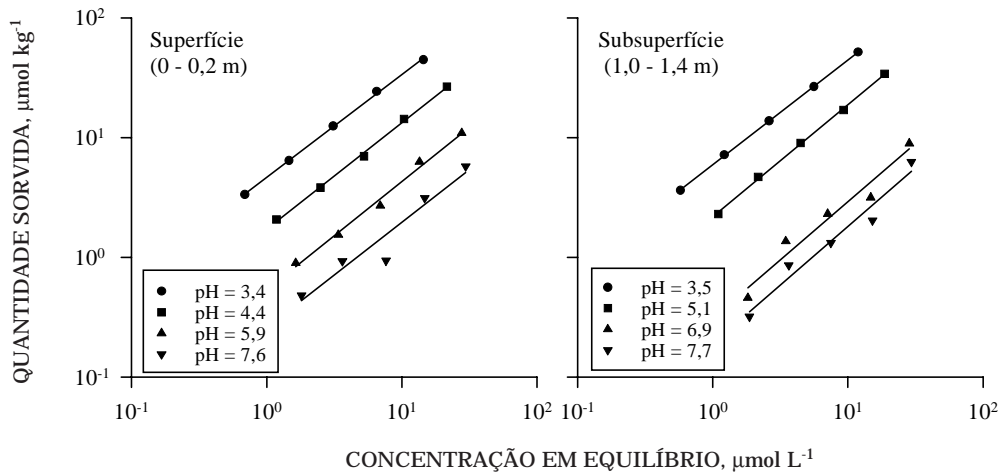


Figura 1. Influência do pH do solo na sorção de imazaquin (ajustada à equação de Freundlich, na forma linear) em amostras de um Latossolo Vermelho Acriférico.

de partição (K_d) quando o pH do solo foi duas unidades superior ao valor de pK_a da molécula (isto é, $\text{pH} \geq 5,8$) (Quadro 2). Nestes casos, mais de 99% das moléculas de imazaquin estavam na forma aniônica (Lee et al., 1990; Regitano et al., 1997).

A discussão anterior considerou apenas o efeito do pH do solo na dissociação (especiação) da molécula de imazaquin, ignorando seu efeito nas cargas variáveis do solo em estudo. No entanto, o valor de pH do solo também influenciou diretamente o potencial elétrico de solos com cargas variáveis. A não-conformidade das curvas ao modelo de Regitano et al. (1997) (Figura 2), que estima a sorção do imazaquin somente pela especiação de sua molécula (aniônica ou neutra) e sua partição na fração orgânica do solo, evidenciou que outros atributos do solo

estariam influenciando a capacidade sortiva dos colóides em profundidade.

Na camada de pH entre 3,8 e 5,7, a carga líquida positiva do solo foi o principal fator responsável pelo aumento da sorção, pois a maioria das moléculas de imazaquin encontrava-se na forma aniônica, o que favoreceu as atrações eletrostáticas. Para valores de pH abaixo de 3,8, os colóides do solo continuariam carregados positivamente, mas a maioria das moléculas de imazaquin estaria na forma neutra, minimizando as influências das interações eletrostáticas. Portanto, o contínuo aumento na sorção a valores baixos de pH ($\text{pH} \leq 3,8$) poderia ser explicado pela troca de ligantes, uma vez que a densidade de elétrons da ligação entre Fe-O ou Al-O diminuiu e os átomos de oxigênio poderiam ser trocados na forma

de OH⁻ ou OH₂ com o grupo funcional carboxílico da molécula (Evanko & Dzombak, 1998).

Na faixa de pH entre 3,5 e 5,8 (Figura 2), a maior quantidade de gibbsita e óxidos de ferro e a menor quantidade de C.O. foram, provavelmente, os responsáveis pela maior sorção em profundidade, sendo os valores ainda superiores aos do modelo.

Como seria de esperar, a percentagem de imazaquin extraída do solo aumentou com o pH, devido à menor força de ligação entre as moléculas do pesticida e os colóides do solo (Baughman & Shaw, 1996) (Quadro 2). No valor mais baixo de pH, a percentagem de imazaquin extraída foi menor em subsuperfície, em virtude, provavelmente, da maior quantidade de interações específicas com os óxidos, favorecidas pela menor quantidade de C.O. (Quadro 1).

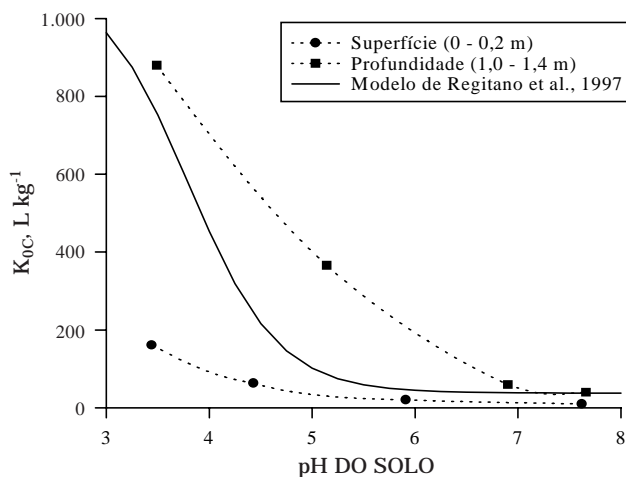


Figura 2. Sorção de imazaquin normalizada em relação ao teor de Carbono Orgânico (K_{oc}), considerando o pH de um Latossolo Vermelho Acriférico.

CONCLUSÕES

1. O herbicida imazaquin apresentou baixa sorção neste solo de carga variável.
2. À medida que diminuiu o pH do solo, aumentou a sorção do imazaquin.
3. Quando a carga elétrica líquida do solo foi positiva, não foi possível prever a sorção de imazaquin, considerando apenas a especiação da molécula e sua partição na fração orgânica do solo.

AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo financiamento da pesquisa (processo nº 98/9641-7).

LITERATURA CITADA

- ALLEONI, L.R.F. & CAMARGO, O.A. Potencial elétrico superficial e carga elétrica líquida de latossolos ácidos. R. Bras. Ci. Solo, 18:181-185, 1994.
- ALLEONI, L.R.F. & CAMARGO, O.A. Solos ácidos: atributos e manejo. B. Inf. SBCS, 20:9-17, 1995.
- BARROW, N.J. A mechanistic model for describing the sorption of phosphate by soils. J. Soil Sci., 34:733-750, 1983.
- BARROW, N.J. Modelling the effects of pH on phosphate sorption by soils. J. Soil Sci., 35:283-297, 1984.
- BASHAM, G.; LAVY, T.; OLIVER, L. & SCOTT, H.D. Imazaquin persistence and mobility in three Arkansas soils. Weed Sci., 35:576-582, 1987.
- BAUGHMAN, T.A. & SHAW, D.R. Effect of wetting/drying cycles on dissipation patterns of bioavailable imazaquin. Weed Sci., 44:380-382, 1996.
- BELL, L.C. & GILLMAN, G.P. Surface charge characteristics and soil solution composition of highly weathered soils. In: ANDREW, C.S. & KAMPRATH, E.J., eds. Mineral nutrition of legumes in tropical and subtropical soils, 1978. Melbourne, CSIRO, 1978. p.37-57.
- BEST, J.A. & WEBER, J.B. Disappearance of s-triazines as affected by soil pH using a balance-sheet approach. Weed Sci., 22:364-373, 1974.
- CAMARGO, O.A.; MONIZ, A.C.; JORGE, J.A. & VALADARES, J.M.S. Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agronômico de Campinas. Campinas, Instituto Agronômico de Campinas, 1986. 94p. (Boletim Técnico, 106)
- COLBERT, F.O.; VOLK, V.V. & APPLEBY, A.P. Sorption of atrazine, terbutrin, and GS-14254 on natural and lime-amended soils. Weed Sci., 23:390-394, 1975.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Sistema brasileiro de classificação de solos. Brasília, Produção de Informação, 1999. 412p.
- EVANKO, C.R. & DZOMBAK, D.A. Influence of structural features on sorption of NOM-analogue organic acids to goethite. Environ. Sci. Technol., 32:2846-2855, 1998.
- GOETZ, A.J.; WEHTJE, G.; WALKER, R.H. & HAJEK, B. Soil solution and mobility characterization of imazaquin. Weed Sci., 34:788-793, 1986.
- HANG, S.B.; FERREIRO, E.A. & DE-BUSSETTI, S.G. Movilidad y adsorción-desorción de picloram, dicamba e imazaquin. Inv. Agr. Produc. Protec. Veg., 11:345-361, 1996.
- KELLS, J.J.; RIECK, C.E.; BLEVINS, R.L. & MUIR, W.M. Atrazine dissipation as affected by surface pH and tillage. Weed Sci., 28:101-104, 1980.
- KOSKINEN, W.C. & HARPER, S.S. The retention process: mechanisms. In: CHENG, H.H., ed. Pesticides in the soil environment: process, impacts, and modeling. 2.ed. Madison, Soil Science Society of America, 1990. p.51-77.
- LADLIE, J.; MEGGITT, W.F. & PENNER, D. Effect of soil pH on microbial degradation, adsorption, and mobility of metribuzin. Weed Sci., 24:477-481, 1976.

- LEE, L.S.; RAO, P.S.C.; NKEDI-KIZZA, P. & DELFINO, J.J. Influence of solvent and sorbent characteristics on distribution of pentachlorophenol in octanol-water and soil-water systems. *Environ. Sci. Technol.*, 24:654-661, 1990.
- LOUX, M.M.; LIEBL, R.A. & SLIFE, F.W. Adsorption of imazaquin and imazethapyr on soils, sediments, and selected adsorbents. *Weed Sci.*, 37:712-718, 1989.
- NICHOLLS, P.H. & EVANS, A.A. Sorption of ionisable organic compounds by field soils. Part 1: Acids. *Pest. Sci.*, 33:319-330, 1991.
- PIRES, N.M.; SILVA, J.F.; SILVA, J.B.; FERREIRA, L.R. & CARDOSO, A.A. Adsorção e lixiviação de Trifluralin e Imazaquin em diferentes solos. *R. Ceres*, 44:300-314, 1997.
- REDDY, K.N. & LOCKE, M.A. Imazaquin spray retention, foliar washoff and runoff losses under simulated rainfall. *Pest. Sci.*, 48:179-187, 1996.
- REGITANO, J.B.; BISCHOFF, M.; LEE, L.S.; REICHERT, J.M. & TURCO, R.F. Retention of Imazaquin in soil. *Environ. Toxicol. Chem.*, 16:397-404, 1997.
- RENNER, K.A.; MEGGITT, W.F. & PENNER, D. Effect of soil pH on Imazaquin and Imazethapyr adsorption to soil and phytotoxicity to corn (*Zea mays*). *Weed Sci.*, 36:78-83, 1988.
- RESENDE, M. & SANTANA, D.P. Uso das relações K_i e K_r na estimativa da mineralogia para classificação dos Latossolos. In: REUNIÃO DE CLASSIFICAÇÃO, CORRELAÇÃO DE SOLOS E INTERPRETAÇÃO DE APTIDÃO AGRÍCOLA, 3., Rio de Janeiro, 1988. Anais. Rio de Janeiro, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 1988. p.225-232. (Documentos, EMBRAPA-SNLCS, 12)
- STOUGAARD, R.N.; SHEA, P.J. & MARTIN, A.R. Effect of soil type and pH on adsorption, mobility and efficacy of imazaquin and imazethapyr. *Weed Sci.*, 38:67-73, 1990.
- UEHARA, G. Acric properties and their significance to soil classification. In: INTERNATIONAL SOIL CLASSIFICATION WORKSHOP, 8., Rio de Janeiro, 1986. Proceedings. Rio de Janeiro, EMBRAPA/SNLCS, 1988. p.19-22.
- YU, T.R. Chemistry of variable charge soils. New York, Oxford University Press, 1997. 505p.

