

IZABELA APARECIDA DA SILVA MENDES

**ADSORÇÃO INDIVIDUAL DE Cd, Cr, Cu E Pb EM SOLOS DA BACIA
SEDIMENTAR AMAZÔNICA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2016

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

M538a
2016

Mendes, Izabela Aparecida da Silva, 1990-
Adsorção individual de Cd, Cr, Cu e Pb em solos da bacia
sedimentar amazônica / Izabela Aparecida da Silva Mendes. –
Viçosa, MG, 2016.
ix, 70f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Maurício Paulo Ferreira Fontes.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.
Referências bibliográficas: f.65-70.

1. Solos - Análise. 2. Solos - Adsorção. 3. Solos - Teor de
metais pesados. 4. Física do solo. 5. Química do solo. 6. Solos
florestais. 7. Metais pesados. I. Universidade Federal de Viçosa.
Departamento de Solos. Programa de Pós-graduação em Solos e
Nutrição de Plantas. II. Título.

CDD 22. ed. 631.4

IZABELA APARECIDA DA SILVA MENDES

**ADSORÇÃO INDIVIDUAL DE Cd, Cr, Cu E Pb EM SOLOS DA BACIA
SEDIMENTAR AMAZÔNICA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

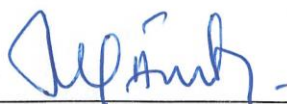
APROVADA: 08 de julho de 2016.



Igor Rodrigues de Assis
(Coorientador)



João Carlos Ker
(Coorientador)


Anderson Almeida Pacheco

Maurício Paulo Ferreira Fontes
(Orientador)

*Aos Grandes Amores da minha vida...
Meus pais, exemplo de vida, carinho, renuncia e
dedicação.
Meus irmãos, Paula e Guilherme por todo
companheirismo.
Amo vocês!*

Dedico

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Viçosa, em especial, ao Programa de Pós Graduação em Solos e Nutrição de Plantas pela oportunidade concedida para realização do mestrado.

Ao meu orientador, Maurício Paulo Ferreira Fontes pela paciência e orientação, pela confiança a mim depositada, por sua tranquilidade e educação que fizeram deste período um pouco menos árduo.

Ao professor Igor Rodrigues de Assis, por ter se disposto a me ajudar no desenvolvimento deste trabalho.

Ao professor João Carlos Ker, pelas horas de conversa e auxílio durante este período.

A todos os professores do Departamento de Solos que ajudaram muito na minha jornada durante o curso, e que de alguma forma contribuíram para construção deste trabalho.

A todos os funcionários que sempre se dispuseram a colaborar. A Luciana da Secretária da Pós Graduação, aos laboratoristas, em especial José Francisco (Chico), meu agradecimento por toda colaboração, favores prestados e companhia.

À minha mãe Solange, que sempre colocou os meus sonhos na frente dos seus e, sempre me ensinou que na vida precisamos ser fortes para enfrentar todos os obstáculos. Ao meu pai Paulo, por sempre largar tudo que está fazendo e estar pronto para me levar para Ouro Preto ou Viçosa, até mesmo quando tudo isso ainda era um sonho. Vocês dois, por sempre me apoiarem mesmo quando tudo parecia tão incerto.

À minha avó Maria, que sofreu tanto quanto eu com a distância, sempre me acolheu em sua casa com tanto amor, e que ao ver meu desespero, minhas angustias sempre se lembrava da neta nas orações.

À minha irmã, eterna estrela guia, Paula, que sempre me cativou com seu sorriso, isso sempre foi o suficiente. Sei que você esta feliz por mim, onde quer que você esteja, por mais esta etapa na minha vida. Eu sempre vou te amar!

Ao meu único e amoroso irmão Guilherme, que hoje apesar da distância sempre consegue me consolar e lembrar que sou capaz. Obrigada por cada abraço, cada carinho, cada briga, por todas as vezes que formatou meu computador e teve todo cuidado para sempre salvar todos os arquivos, isso só mostra que cada vez mais meu amor por você é enorme e o quanto você é importante na minha vida.

Ao Rossiny Amaral Souza, que compreendeu minha ausência muito mais do que eu e conseguiu estar presente mesmo que a distância. Obrigada por todo companheirismo e principalmente, pelo amor, amizade e carinho despendido todos estes anos.

À toda minha família por todo amor, força, amizade e carinho todos esses anos, isso foi essencial para mais esta conquista.

À Elizêne Veloso Ribeiro, pela amizade desencadeada ao longo dos anos, pelos conselhos e por sempre incentivar meu desenvolvimento no meio acadêmico.

A todos meus amigos de Ouro Preto, Karla e sua filha Fernanda, Talita, Jéssica, Raiane, Paolla, Tamires, Eude, William, por toda conversa e momentos de distração que foram essenciais em todos os momentos de incerteza.

Aos colegas da mineralogia, Rafaella, Leo Jackson e Anderson, pela companhia, por todos os auxílios, amizade e favores prestados. Vocês foram essenciais durante toda minha trajetória no curso.

Às queridas Mariana e Valéria, amigas que Viçosa me deu, por escutarem minhas lamúrias, às vezes chorarem comigo, mas sempre com palavras de encorajamento.

A Vanessa Schiavon, amiga e companheira de quarto, por tudo, no auxílio no laboratório, nas conversas antes de dormir, e a sua República “Tipo Fiona” pela acolhida na reta final.

Aos amigos que cultivei em Viçosa e estiveram ao meu lado ao longo desta caminhada, Josimar, Martin, Lauana, Maiara, Roberto, Letícia, Darlan, Aristides, Leiliane, pelas boas conversas e momentos de descontração.

À Deus, por ter permitido que eu vivesse momentos únicos na minha vida acadêmica.

A todos que por um descuido meu não foram citados, mas que, de alguma forma, contribuíram para que eu alcançasse esse objetivo.

Muito Obrigada!

SUMÁRIO

RESUMO	vi
ABSTRACT	viii
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	3
2.1 Objetivo Geral	3
2.2 Objetivos Específicos	3
3. REVISÃO DE LITERATURA	4
3.1 Metais pesados no ambiente	4
3.2 Metais pesados e sua relação com propriedades químicas físicas e mineralógicas do solo	5
3.3 Adsorção de metais	6
3.3.1 Adsorção específica	7
3.3.2 Adsorção não-específica	8
3.3.3 Adsorção ou complexação com o material orgânico do solo	8
3.4 Modelos de Adsorção	9
3.4.1 Isoterma de Langmuir	10
3.4.2 Isoterma de Freundlich	11
3.5 Solos da Amazônia	12
3.5.1 Relevo, Clima e Vegetação	14
3.5.2 Solos	15
4. MATERIAL E MÉTODOS	18
4.1 Seleção e caracterização química, física e mineralógica das amostras de solos estudados	18
4.2 Ensaios de Adsorção Individual	23
4.3 Análises Estatísticas	24
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
5.1 Isotermas de adsorção de Langmuir e Freundlich	30
5.2 Relações entre os coeficientes das isotermas de Langmuir e Freundlich com as características dos solos	54
6. CONCLUSÕES	64
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65

RESUMO

MENDES, Izabela Aparecida da Silva, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, Julho 2016. **Adsorção individual de Cd, Cr, Cu e Pb em solos da bacia sedimentar Amazônica.** Orientador: Maurício Paulo Ferreira Fontes. Coorientadores: João Carlos Ker e Igor Rodrigues de Assis.

O solo, a depender de suas características físicas, químicas e mineralógicas, pode apresentar uma elevada capacidade de reter íons e moléculas e pode assim funcionar como um excelente meio para adsorver metais pesados. No bioma Amazônia encontra-se a maior floresta tropical do mundo, e o solo é um dos responsáveis pela sustentação da vegetação nessa região. A interação solo-vegetação nesta região confere comportamento diferente de outros solos do Brasil. Entende-se que estudos de adsorção de metais pesados em solos do Amazonas contribuirão para a compreensão do comportamento destes elementos naqueles solos. Parte-se do pressuposto que solos mais oxídicos e de textura mais argilosa, ricos em minerais 1:1, apresentarão grande capacidade para adsorver metais pesados, enquanto que a adsorção destes metais será menor em solos ricos em minerais 2:1. Assim, o presente trabalho tem como objetivos: conduzir ensaios de adsorção individual para os metais pesados Cd, Cr, Cu e Pb em solos representativos da bacia sedimentar Amazônica com composições mineralógicas distintas; avaliar o comportamento individual dos metais pesados frente aos solos estudados; avaliar qual dos modelos de isotermas de Langmuir e Freundlich melhor descreve a adsorção de metais pesados nos solos estudados; determinar a capacidade máxima de adsorção (CMA) dos metais pesados nos solos e; identificar a relação entre os parâmetros das isotermas e os atributos dos solos. Os pontos de amostragem foram selecionados de acordo com a representatividade e distribuição dos solos na bacia sedimentar Amazônica, sendo as amostras coletadas em áreas não antropizadas. As classes de solo Latossolo Amarelo; Argissolo Amarelo; Neossolo Quartzarênico Hidromórfico; Neossolo Quartzarênico Órtico; Neossolo Flúvico; Gleissolo; Terra Preta de Índio; Plintossolo e Espodossolo. Os ensaios de adsorção foram baseados no princípio de que quantidades conhecidas de solo e de soluto em solução são colocadas em contato sob agitação até que o sistema alcance o equilíbrio. A concentração dos metais em solução, após o equilíbrio, foi realizada por Espectrofotometro de Absorção Atômica. Os dados foram ajustados aos modelos de regressão não linear de Langmuir e Freundlich, de

forma a obter os parâmetros, CMA, EL, K_f e n , relacionados aos fenômenos de adsorção. No estudo de correlação linear foram relacionados os parâmetros de adsorção obtidos e alguns atributos do solo, para verificar quais dentre esses atributos melhor se relacionam com o fenômeno de adsorção para os solos estudados. O grau de ajuste obtido pelas equações de Langmuir e Freundlich foi semelhante, para os elementos e para os solos, com valores de R^2 , em torno de 0,96. A isoterma do tipo L foi predominante para todos os metais e solos analisados, no entanto foram obtidas isotermas do tipo H para adsorção de Cd e Pb na amostra Terra Preta de Índio (A1). Todos os metais apresentaram correlação negativa entre a CMA e a fração areia do solo, para o grupo I. Cd, Cr, Cu e Pb também apresentaram correlação positiva entre EL, CMA e K_f com CTC_{ef} , P, Fe_d e Fe_o . A diversidade de características físicas, químicas e mineralógicas encontrada nos solos da bacia sedimentar Amazônica resultou na diferenciação quanto à capacidade máxima de adsorção de Cd, Cr, Cu e Pb. Os atributos do solo atuam favorecendo ou não a maior ou menor adsorção de metais, e isto controla a disponibilidade dos metais no meio. Assim, é imprescindível conhecer a dinâmica dos metais no solo, de forma a prever os riscos ambientais, com uso agrário ou industrial.

ABSTRACT

MENDES, Izabela Aparecida da Silva, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2016. **Individual adsorption of Cd, Cr, Cu and Pb in soils of the Amazon sedimentary basin.** Adviser: Maurício Paulo Ferreira Fontes. Co-advisors: João Carlos Ker and Igor Rodrigues de Assis.

The soil, depending on their physical, chemical and mineralogical, can have a high ability to retain ions and molecules and can function as an excellent means to adsorb heavy metals. In the Amazon is the largest rainforest in the world, and the soil is the one responsible for sustaining vegetation in this region. The soil-vegetation interaction in this region provides different behavior of other Brazil soils. It is understood that adsorption studies of heavy metals in the Amazon soils contribute to the understanding of the behavior of these elements in those soils. Upon the assumption that more oxidic soils and more clayey minerals rich in 1:1 present a great capacity to adsorb heavy metals, while the adsorption of these metals will be lower in soils rich in 2: 1 minerals. This study aims to: conduct individual adsorption tests for heavy metals Cd, Cr, Cu e Pb for representative soils of sedimentary Amazon Basin with different mineralogical composition; evaluate the individual behavior of heavy metals front of soils; evaluate which of the isotherms of Langmuir and Freundlich best describes the adsorption of heavy metals in soils; determine the maximum adsorption capacity (MAC) of heavy metals in soil and; identify the relationship between the parameters of the isotherms and the attributes of the soil. The samples were selected according to their representation and distribution in the Amazon Basin Sediment collected in areas that did not exposed from the human action. The adsorption experiments were based on the principle that known amounts of soil and solution are brought into contact under agitation for a period of time until the system reaches equilibrium. The concentration of metals in solution after the balance was carried out by atomic absorption spectrophotometer. In the linear correlation study were related parameters obtained from the equation of Langmuir and Freundlich and some soil attributes to verify which of these attributes best describe the adsorption phenomenon for soils. The degree of fit obtained by Langmuir and Freundlich equation was similar, with R^2 values of around 0.96. The isotherm L-type was predominant for all metals and analyzed soils, but were also observed isotherms type H for adsorption of Cd and Pb in the sample Terra Preta de Índio (A1). All metals showed negative correlation between the MAC and the sand

fraction of the soil, for the group I. Cd, Cr, Cu and Pb also showed a positive correlation between EL, MAC and Kf with CEC_{ef} , P, Fe_d and Fe_o . The diversity of physical, chemical and mineralogical characteristics of the soils found in the Amazon sedimentary basin showed the differentiation as to the maximum capacity adsorption of Cd, Cr, Cu and Pb in the study. Soil attributes act or not favoring a higher or lower metals adsorption, and this controls availability of the metal in the middle. Thus, it is essential to know the dynamics of metals in the soil, in order to predict environmental risks, with agricultural or industrial use.

1. INTRODUÇÃO

Alguns metais pesados podem ser essenciais à vida, especialmente como micronutrientes, para plantas e animais superiores. No entanto, outros elementos, mesmo em pequenas concentrações, não são requeridos pelas plantas ou pelos seres vivos e podem apresentar toxicidade. Estes potencialmente tóxicos têm ganhado espaço no meio acadêmico em função dos riscos que eles podem apresentar para o meio ambiente e, conseqüentemente, para a saúde humana.

Neste trabalho, o termo metal pesado é utilizado pelo seu significado frente aos problemas ambientais e a atuação destes elementos como poluentes e contaminantes na superfície terrestre. Ainda, por apresentarem características de toxicidade aos organismos vivos e serem potencialmente nocivos ao meio ambiente.

A preocupação com os metais pesados é maior quando o seu acúmulo nos solos os torna disponíveis para serem absorvidos pelas plantas. Outro ponto é quando a sua quantidade excede a máxima capacidade de retenção pelo solo. Desta forma, estes elementos podem ser lixiviados com facilidade, serem disponibilizados no meio e assim estarem propensos para aporte em corpos de água.

O solo pode apresentar elevada capacidade de reter íons e moléculas e pode assim funcionar como meio para adsorver metais pesados. A capacidade de adsorção dos solos varia com suas características físico-químicas e as características do metal considerado. Desta forma, os atributos do solo como constituição mineralógica, pH, matéria orgânica e capacidade de troca catiônica podem ser relacionados com a adsorção dos metais pesados.

A importância da compreensão desses atributos para a adsorção de metais pesados no solo fez com que surgisse a necessidade de se observar quais deles influenciam de forma significativa a adsorção de alguns metais pesados no solo. Dentre estes atributos, a mineralogia do solo exerce grande influência na adsorção dos metais pesados e mostra grande variedade de sítios de adsorção, especialmente da fração argila, apresentando grande importância para adsorção dos metais pesados no solo.

Neste sentido, pesquisadores podem prever, detectar e atuar na tomada de decisão com relação a melhor forma de utilização do solo em uma região. Assim, eles atuam evitando ou minimizando problemas que podem ser prejudiciais para o

meio ambiente e, conseqüentemente, podem ameaçar à qualidade de vida dos seres humanos.

A Amazônia sempre foi alvo de estudos em diversas áreas de pesquisa. Ela se caracteriza por uma imensa gama de variações climáticas, geomorfológicas e pedológicas que contribuem para que exista também uma exuberância de flora e fauna, assim como uma biodiversidade própria não encontrada em nenhum outro ecossistema na Terra.

O bioma Amazônia abriga a maior floresta tropical do mundo e, o solo é co-responsável pela sustentação da vegetação reinante nessa região, por onde atua o ciclo biogeoquímico. Os crescentes estudos na região da Amazônia, abrangendo as características físicas, químicas e mineralógicas dos solos, auxiliam cada vez mais no melhor conhecimento e compreensão dos solos da região.

Existem diversos estudos na região referentes à fauna e flora. Os estudos sobre solos enfatizam principalmente o campo relacionado à fertilidade desses solos. Poucos são os estudos sobre metais pesados neste ambiente, principalmente sobre a capacidade destes solos suportarem uma descarga de metais. Assim, entende-se que o estudo da adsorção de metais pesados em solos da Amazônia irá contribuir para o conhecimento sobre o uso do solo, visto que além destes solos apresentarem predominância de baixa fertilidade natural, existem algumas classes, que apesar de sustentarem uma vegetação exuberante, representam ambientes frágeis.

Outro ponto que também deve ser levado em consideração é a atual pressão pelo uso do solo na Amazônia. O chamado arco de desmatamento na Amazônia destaca esta pressão pela utilização do solo, e mostra a expansão da fronteira agrícola em direção a floresta. Como os solos da região apresentam predominância de fertilidade natural baixa, será necessário um incremento com a utilização de fertilizantes.

A utilização de fertilizantes fosfatados pode conter metais pesados associados, em função da rocha de origem. Assim, este estudo pode contribuir com dados e diretrizes na tomada de decisão de como gerenciar o uso do solo, e assim evitar ou minimizar possíveis futuros riscos de contaminação dos solos desta região.

A hipótese levantada neste trabalho é que os solos mais oxídicos e de textura mais argilosa, ricos em minerais 1:1 apresentarão grande capacidade para adsorver os metais cádmio, chumbo, cobre e cromo, enquanto que a adsorção destes metais será menor em solos ricos em minerais 2:1.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Verificar como a composição física, química e mineralógica influenciam na adsorção de Cd, Cr, Cu e Pb para nove solos representativos da Bacia sedimentar Amazônica com composição mineralógica distinta.

2.2 Objetivos Específicos

Avaliar o comportamento individual dos metais pesados frente aos solos estudados.

Avaliar qual dos modelos de isotermas de Langmuir e Freundlich melhor descreve a adsorção de metais pesados em solos da Amazônia.

Determinar a capacidade máxima de adsorção dos metais pesados Cd, Cr, Cu e Pb nos solos estudados.

Identificar a relação entre os parâmetros determinados, a partir das isotermas de Langmuir e Freundlich, e os atributos químicos, físicos e mineralógicos dos solos selecionados.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Metais pesados no ambiente

O termo metais pesados (*heavy metals*) apesar de incluir um grupo muito heterogêneo de elementos é largamente utilizado, pois classifica um grande grupo de elementos químicos com densidade atômica maior que 5 g cm^{-3} (Alloway, 2012), ou que possuem número atômico maior que 20 (Marques et al., 2002).

Apesar de o termo metal pesado expressar conotação de toxicidade alguns metais são caracterizados como biogênicos, ou seja, sua presença é fundamental para permitir o funcionamento normal de algumas rotas metabólicas (Aguilar et al., 2002). Elementos como zinco (Zn), molibidênio (Mo), ferro (Fe), cobre (Cu), cádmio (Cd), arsênio (As), níquel (Ni), manganês (Mn), selênio (Se), mercúrio (Hg), chumbo (Pb) e cobalto (Co) são potencialmente tóxicos às plantas e animais superiores. Sendo que o Hg, As, Pb e Cd são altamente tóxicos aos animais superiores, mesmo quando presentes em baixas concentrações, e causam muitos problemas relacionados à saúde e ao meio ambiente (Alleoni et al., 2005; Camargo et al., 2001; Oliver, 1997; WHO, 1996).

Com relação à origem estes metais podem ser divididos em litogênicos e antropogênicos. Para o primeiro a ocorrência é proveniente de fontes geológicas, através de resíduos de rochas ou liberados pela atuação do intemperismo. A sua distribuição na superfície terrestre ocorre de forma irregular e em quantidades diversificadas. Suas concentrações podem variar e dependem principalmente das características litológicas da região. Para o segundo, a sua distribuição está relacionada às atividades antrópicas (Alleoni et al., 2005; Camargo et al., 2001; Kabata-Pendias, 1993).

Os estudos e pesquisas sobre os metais pesados sempre estiveram associados à contaminação dos ambientes e aos problemas relacionados à saúde humana. O aumento destes elementos no ambiente se dá principalmente por fontes antrópicas. Alguns exemplos destas fontes de contaminação são: aplicação de defensivos agrícolas e fertilizantes, atividades de mineração e beneficiamento de metais, queima de combustíveis fósseis, lodos de esgotos urbanos e/ou industriais, resíduos de indústrias de beneficiamento químico e águas residuárias.

A entrada desses elementos na cadeia alimentar e a redução da produtividade agrícola devido aos efeitos fitotóxicos, também são fatores preocupantes com relação ao acúmulo dos metais pesados nos solos. A preocupação com esses elementos se agrava quando seu acúmulo no solo os torna disponíveis para serem absorvidos pelas plantas e quando a sua quantidade excede a máxima capacidade de retenção pelo solo, favorecendo assim a facilidade de serem lixiviados e propensos para aporte em corpos de água (Stigliani, 1988).

A presença e a disponibilidade destes elementos é comandada pela composição do solo, pela reação do solo, pelas suas condições de óxido-redução e pela cinética das reações, que dependem de atributos do solo e de suas tendências para formar coprecipitados com outros minerais e precipitados insolúveis, bem como formar complexos com a matéria orgânica e adsorver minerais (Camargo et al., 2001).

O conhecimento das reações e da cinética envolvidas nesses processos é de vital importância no controle das concentrações de metais pesados e de sua mobilidade nos solos. Esse conhecimento ainda permite estabelecer modelos preditivos da toxicidade dos metais para as plantas, sua entrada na cadeia trófica humana e seu potencial de contaminação de solos, aquíferos, rios, lagos e mares. Neste sentido, o conhecimento das características e propriedades do solo se torna um importante fator que pode interferir no comportamento dos metais no solo.

3.2 Metais pesados e sua relação com propriedades químicas físicas e mineralógicas do solo

O solo pode apresentar uma elevada capacidade de reter íons e moléculas em função de suas características físicas, químicas e mineralógicas. Ele pode funcionar como um excelente meio para adsorver metais pesados. A composição da solução do solo pode influenciar na retenção desses elementos no solo (Naidu et al., 1998). Entretanto, esta capacidade de adsorção dos solos varia com suas propriedades físico-químicas, como a composição mineralógica, o teor de matéria orgânica, o pH, além das características físico-químicas do metal considerado (Dube et al., 2001).

Na fração argila dos solos, a caulinita e os óxidos de ferro e alumínio ocorrem em concentrações relevantes e são constituintes importantes dos solos tropicais (Fontes & Weed, 1991, 1996). Estes minerais e a matéria orgânica constituem a fase

sólida dos solos e, em conjunto com os atributos como pH e capacidade de troca catiônica, apresentam grande variedade de sítios de adsorção.

A caulinita, mineral do tipo 1:1, é o produto da intemperização dos minerais primários sob condições ácidas. Ela representa um estágio avançado de intemperismo quando comparada com outros minerais silicatados. A caulinita é, provavelmente, o mineral argiloso silicatado mais encontrado em solos do mundo inteiro, pois ela pode ser produto da intemperização de uma variedade bastante grande de minerais. Para os solos em estudo, a caulinita é um importante mineral encontrado em todos os solos e em praticamente todas as frações destes solos.

A caulinita tem sido estudada como um mineral adsorvente na remoção de metais pesados no solo. Embora ela seja menos reativa, sua elevada dependência do pH melhora ou inibe a adsorção de metais de acordo com o pH do meio. A adsorção geralmente ocorre nos locais de borda do mineral (Bhattacharyya & Gupta, 2008).

Em decorrência da sua estrutura, as partículas de caulinita não são facilmente quebradas, e as suas camadas não são facilmente separáveis. Assim, grande parte da atividade de adsorção ocorre ao longo das bordas e superfícies da estrutura deste mineral (Trevino & Coles, 2003).

Neste contexto, compreender o comportamento das cargas superficiais e seu relacionamento com a química e mineralogia dos solos é de fundamental para o entendimento e melhor capacidade de compreensão de diversos fenômenos como, por exemplo, a adsorção de metais pesados (Fontes, 2013; Fontes et al., 2001; Gomes et al., 2001). A adsorção de metais pesados em solos tropicais é bastante intensa, pois os óxidos de ferro e alumínio manifestam fortes interações com os metais pesados (Naidu et al., 1998).

O pH é uma variável muito analisada frente aos estudos da adsorção de metais pesados pois ela influencia a mobilidade e adsorção dos metais (Elliot; Huang, 1979). A matéria orgânica é outro importante componente que vem sendo observado junto aos estudos dos metais pesados no solo (Jordão et al., 2010; Lee et al., 1998).

3.3 Adsorção de metais

As reações responsáveis pela mobilidade entre os metais pesados e as partículas do solo são adsorção, dissolução, precipitação, oxi-redução, dessorção e

complexação (Sparks, 1999). A disponibilidade e a solubilidade dos metais no solo são controladas pela adsorção. Apesar de todas essas reações ocorrerem no solo de forma concomitante, a adsorção é um dos processos químicos mais importantes no solo (Chang et al., 2002; Ford et al., 2001).

A adsorção é o processo por meio do qual uma substância ou um elemento reage no limite comum de duas interfaces próximas, ou seja, é o acúmulo de um determinado elemento ou substância na interface entre a superfície sólida e a solução adjacente. A interface sólida é denominada adsorvente e a matéria que se acumula na sua superfície é denominada adsorvato, assim: adsorvente é a superfície sólida na qual o adsorvato se acumula e, adsorvativo é o íon ou molécula em solução que potencialmente pode ser adsorvido (Sposito, 2008).

Os minerais secundários apresentam afinidades distintas de grande importância para a adsorção de metais pesados, que podem ser adsorvidos tanto de forma específica quanto de forma não específica. A grande preocupação de pesquisadores é o comportamento e a biodisponibilidade de metais no solo com a adsorção de metais da fase líquida para a fase sólida. Diferentes mecanismos estão envolvidos na adsorção de metais, dentre eles destacam-se a adsorção específica, a adsorção não-específica (troca iônica) e a complexação com o material orgânico do solo (Camargo et al., 2001).

3.3.1 Adsorção específica

A adsorção específica caracteriza um dos mecanismos mais importantes que controla a atividade iônica na solução do solo ou nos corpos de água. É o fenômeno que, em geral, íons adsorvidos por meio de ligações covalentes ou iônicas são fortemente retidos. Este tipo de ligação é muito dependente do pH, pouco reversível e pouco afetada pela concentração iônica da solução envolvente (Camargo et al., 2001).

A adsorção específica se deve a elevada afinidade entre a superfície adsorvente e os cátions livres em solução, é o resultado da complexação dos íons pelas superfícies dos colóides (Vinhai-Freitas et al., 2010). De maneira geral, íons adsorvidos (adsorvato) perdem a sua camada de hidratação formando complexo de esfera interna com a superfície de óxidos de alumínio, ferro, manganês, e mesmo com arestas quebradas de argilominerais, que apresentam um tipo similar de sítio de

adsorção. Em outras palavras, uma OH^- ou uma molécula de H_2O com valência insatisfeita, ligada a um íon metálico da rede cristalina (Camargo et al., 2001).

3.3.2 Adsorção não-específica

A adsorção não-específica ou troca iônica é o fenômeno em que a interação entre os íons e as superfícies das partículas do solo são de natureza eletrostática. A adsorção não específica ocorre como resultado da ação de forças eletrostáticas entre cátions metálicos presentes na solução do solo e a superfície carregada com cargas negativas dos colóides, ou seja, os íons interagem eletrostaticamente com a superfície dos colóides (Vinhal-Freitas, 2010).

A capacidade de troca catiônica é caracterizada como a quantidade de cátions que pode ser reversivelmente adsorvida de forma trocável no solo. Este fenômeno apresenta algumas características que merecem destaque: i) é reversível; ii) é estequiométrico; iii) é controlado pela difusão iônica; e iv) na maioria dos casos há uma seletividade ou preferência de um íon pelo outro, que está relacionada com o raio iônico hidratado e com a energia de hidratação dos cátions de mesma valência. Um íon com raio iônico pequeno chega mais perto da superfície e, desta forma, a atração coulômbica é maior, enquanto que um íon com raio iônico hidratado grande é retido com menor intensidade. Íons com maior valência têm maior força de deslocamento, exceção feita ao H^+ (Camargo et al., 2001).

3.3.3 Adsorção ou complexação com o material orgânico do solo

O carbono orgânico dissolvido exerce papel muito importante na solução do solo e se destaca em processos químicos que ocorrem no ecossistema, aumentando a disponibilidade de metais para as plantas ou diminuindo a sua toxicidade. A ligação entre metal e matéria orgânica pode ser visto como troca iônica entre H^+ de grupos funcionais e íons metálicos. Ainda que, o alto grau de seletividade mostrado pelas substâncias húmicas por certos metais sugere que eles coordenam diretamente com grupos funcionais (carboxila, hidroxila fenólica e alcoólica, quinona, carbonil cetônico, amino e sulfidríla), formando complexos de esfera interna (Camargo et al., 2001).

3.4 Modelos de Adsorção

A extrema complexidade do solo faz com que não seja possível uma completa simulação do sistema soluto-água-solo. No entanto, é inegável o progresso na construção de modelos matemáticos que permitem aprimorar o conhecimento sobre o comportamento de solutos no solo (Soares & Casagrande, 2009).

A aplicação de um modelo é a representação simplificada, em menor escala, da situação real. Um modelo ideal é eficaz quando descreve precisamente as observações; quando pode ser aplicável a uma grande variedade de condições sem modificações; o modelo é dito realístico quando comprova as teorias mais bem aceitas. Modelos empíricos têm sido amplamente utilizados na Ciência do Solo e estudos ambientais relacionados com o metal e a adsorção de ânions (Fontes & Alleoni, 2006).

O equilíbrio entre a fase sólida e a fase líquida é estabelecido quando as concentrações destas fases permanecem constantes. (Mattos, 2014). A descrição desta condição de equilíbrio é realizada por meio de gráficos denominados isotermas de adsorção, que representam de forma gráfica a relação entre a concentração de soluto adsorvido pela fase sólida e a concentração remanescente na solução do solo (Alleoni et al., 2009; Fontes, 2013; Sposito, 2008; Soares & Casagrande, 2009).

A utilização de isotermas de adsorção é uma das formas de se estudar o fenômeno da adsorção dos metais pesados no solo. As isotermas possibilitam um melhor conhecimento da natureza dos processos de adsorção e permitem expressar de forma matemática alguma propriedade do solo, como por exemplo, a capacidade de adsorção que um solo pode apresentar e a interação entre a adsorção do metal e as características do solo.

Giles et al. (1974) propuseram quatro categorias de isotermas de adsorção (Figura 1), classificadas em critérios qualitativos com base nas suas inclinações iniciais e curvaturas, sendo frequentemente encontradas em estudos de solos (Alleoni et al., 2009; Soares & Casagrande, 2009). O formato das curvas e, principalmente, a sua inclinação inicial dão uma percepção sobre a tendência da reação (Soares & Casagrande, 2009).

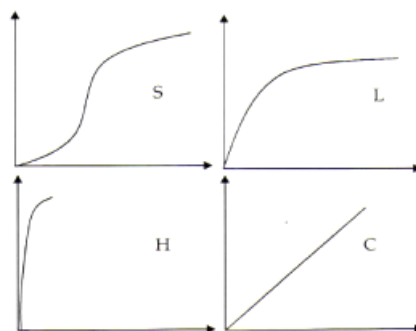


Figura 1. Principais categorias de isotermas de adsorção (S - sigmoidal; L - Langmuir; H - high; C- constante). Fonte: Soares & Casagrande, 2009; Alleoni et al., 2009.

A isoterma do tipo-S, sigmoidal, é caracterizada pela pequena inclinação inicial que aumenta com a concentração do soluto de interesse na solução ou reflete a ocorrência de competição pelos sítios de adsorção.

A isoterma do Tipo-L é a mais comum encontrada nos estudos de química do solo, é o modelo representado pela equação de Langmuir. Este formato é resultado da alta afinidade relativa da fase sólida do solo pelo soluto a baixas concentrações. Neste caso, atinge-se um platô, que caracteriza a adsorção máxima do íon ou da molécula na superfície do adsorvente.

A isoterma do Tipo-H indica fenômenos de adsorção de alta afinidade entre as superfícies adsorventes e o adsorvato, relacionados com os sítios de adsorção com alta energia. O último modelo de isoterma é a do Tipo-C, que mostra uma relação linear entre a quantidade adsorvida e em solução, este tipo de isoterma expõe que é constante a relação entre a quantidade adsorvida do soluto e a quantidade remanescente na solução após o equilíbrio (Alleoni et al., 2009; Fontes & Alleoni, 2006; Soares & Casagrande, 2009).

As isotermas podem ser escritas por meio de modelos ou de equações e, as mais aplicadas nos estudos de retenção de metais pesados em solos são as de Langmuir e de Freundlich.

3.4.1 Isoterma de Langmuir

A Isoterma de Langmuir foi desenvolvida pelo pesquisador Irving Langmuir e foi originalmente derivada para a adsorção de gases por superfícies sólidas homogêneas. Dos chamados modelos empíricos de adsorção, o modelo de Langmuir é o único que teve sua equação derivada teoricamente (Fontes & Alleoni, 2006).

Entretanto, pela facilidade de sua aplicação e pelo fato de sua versão original ter sido desenvolvida com base nas teorias de equilíbrio e de cinética química, esta isoterma é muito utilizada na Ciência do Solo (Soares & Casagrande, 2009). A equação de Langmuir é aplicada em estudos de adsorção pela forma (Equação 1):

$$[]_{ads} = K * b * C_{eq} / (1 + KC_{eq}) \quad (Eq. 1)$$

Em que $[]_{ads}$ é a concentração adsorvida ($mg\ g^{-1}$); K é o coeficiente de Langmuir, relacionado com a afinidade do adsorvente pelo adsorvato ($(mg\ L^{-1})^{-1}$); b é a capacidade máxima de adsorção ($mg\ g^{-1}$) e; C_{eq} é concentração do metal/substância de interesse na solução após o equilíbrio ($mg\ L^{-1}$). Esta equação fornece os coeficientes que quantificam a capacidade máxima de adsorção (CMA) e a energia de ligação (EL), que podem ser utilizados para comparar solos com diferentes capacidades de adsorção.

3.4.2 Isoterma de Freundlich

Para descrever os resultados de adsorção, Freundlich utilizou a equação de uma parábola. Esta é uma equação que relaciona a massa do elemento adsorvido em relação à massa da fase sólida adsorvente, e a concentração de equilíbrio do adsorvato em solução. De acordo com este modelo a energia de adsorção decresce logaritmicamente à medida que a superfície vai sendo coberta pelo adsorvato. (Alleoni et al., 2009; Fontes & Alleoni, 2006). Uma desvantagem desta equação é que ela não fornece a capacidade máxima de adsorção do solo. A equação de Freundlich é aplicada em estudos de adsorção pela forma (Equação 2):

$$[]_{ads} = K_f * C_{eq}^n \quad (Eq. 2)$$

Em que $[]_{ads}$ é a quantidade de soluto retida pelo solo ($mg\ g^{-1}$); K_f é o coeficiente de Freundlich, indica a capacidade do solo em reter um soluto ($(mg\ L^{-1})^{-1}$); C_{eq} é a concentração do soluto na solução ($mg\ L^{-1}$) e; n é um parâmetro adimensional de valor entre 0 e 1 e indica a afinidade do solo pelo soluto. O parâmetro n pode ser interpretado também como uma medida da heterogeneidade dos sítios de adsorção (Sposito, 2008). À medida que n aproxima-se de zero, a

heterogeneidade da superfície aumenta e, quando n tende à unidade, a superfície adsorvente tende a se tornar homogênea (Soares & Casagrande, 2009).

3.5 Solos da Amazônia

O Bioma Amazônia localiza-se ao norte da América do Sul e abrange parte do território de nove países, sendo eles: Brasil, Venezuela, Colômbia, Peru, Bolívia, Equador, Suriname, Guiana e Guiana Francesa. A Amazônia brasileira, conhecida também como Amazônia Legal¹, é notadamente a de maior expressão territorial, cerca de 60 %, (Bastos et al., 1986; Rodrigues, 1996) de toda a Amazônia Continental, apresentando fronteiras com sete países a exceção do Equador.

No território nacional a Amazônia abrange nove estados, sendo eles: Acre, Amapá, Amazonas, Mato Grosso, Pará, Rondônia, Roraima, Tocantins e Maranhão. De acordo com o Censo, realizado em 2010, cerca de vinte e quatro milhões de pessoas vivem nessa região, representando uma baixa densidade demográfica, em torno de 1,0 a 2,5 habitantes/km² (Falesi, 1986; IBGE, 2011; IBGE, 2013).

A Amazônia representa o mais extenso dos biomas brasileiros. Este bioma abriga a maior floresta tropical do mundo e corresponde a 1/3 das florestas tropicais úmidas do planeta, detendo assim uma elevada biodiversidade, o maior banco genético e 1/5 da disponibilidade mundial de água potável (IBGE, 2011). Esta biodiversidade tem valor significativo tanto em termos de utilidade tradicional como em termos de valor de existência (Fearnside, 2006).

O aspecto exuberante e bastante diversificado da vegetação que recobre a Amazônia, à primeira vista dá a impressão de que a fertilidade natural dos solos é elevada. Entretanto, é em sua totalidade, função do clima e da ciclagem de nutrientes, onde a relação solo-floresta é responsável pela manutenção deste bioma. (Falesi et al., 1980; Rodrigues, 1996).

A pressão pelo uso do solo na Amazônia como, por exemplo, a expansão agropecuária, a exploração mineral, a expansão de rodovias, a exploração ilegal de

¹ A legislação brasileira considera o Bioma Amazônia como pertencente à Amazônia Legal. A Lei nº 1.806/1953 criou a Superintendência do Plano de Valorização Econômica da Amazônia - SPVEA e definiu que a Amazônia brasileira seria chamada de Amazônia Legal e, esta Lei tinha como um dos objetivos combater o subdesenvolvimento econômico desta região do país, para que benefícios fiscais pudessem ser destinados ao desenvolvimento da região norte, além de parte do nordeste e do centro-oeste. A SPVEA hoje é substituída pela Superintendência do Desenvolvimento da Amazônia - SUDAM.

madeira, apresentam impactos diretos no meio ambiente. Todas estas atividades contribuem para o desmatamento do bioma Amazônia.

O desmatamento leva à perda de serviços ambientais, que têm um valor maior que os usos pouco sustentáveis que substituem a floresta. Estes serviços ambientais são muitos e três deles são importantes para a manutenção das áreas de grandes florestas, sendo eles: a biodiversidade, a ciclagem de água e o armazenamento de carbono (Fearnside, 2006).

Alterações nos ecossistemas amazônicos podem provocar impactos no processo de evapotranspiração da floresta, afetando o transporte de umidade na região. Desta forma, isto indica que práticas que alteram a cobertura vegetal dessa área podem acarretar na diminuição da evapotranspiração e, conseqüentemente no ciclo hidrológico, não somente desta região, mas em outras partes do país (Correia et al., 2007).

Os reservatórios de água da região Centrosul se enchem durante o pico da estação chuvosa que ocorre nos períodos de dezembro a janeiro e, neste mesmo período tem contribuição máxima da Amazônia. Neste sentido, é de fundamental importância a manutenção da floresta Amazônica, cuja proteção influencia diversos processos naturais, relacionados com o clima, os recursos hídricos, a proteção dos solos, a biodiversidade, entre outros, visto que algumas cidades do Brasil já estão no limite de abastecimento e qualquer redução significativa no transporte de vapor de água da Amazônia teria sérias conseqüências sociais (Fearnside, 2006; IBGE, 2011).

Imagens de satélite permitem uma observação mais detalhada do quadro de produção de espaços antrópicos sobre a natureza da região (Ab'Sáber, 2007). De acordo com o Boletim apresentado pela Imazon - Instituto do Homem e Meio Ambiente da Amazônia, nos meses de fevereiro e março de 2016 foram detectados pelo SAD – Sistema de Alertas de Desmatamento na Amazônia Legal - 213 km² de desmatamento, que se concentrou no estado do Mato Grosso (81 %) e com menor ocorrência em Rondônia (9 %), Amazonas (7 %), Roraima (2 %) e Pará (1 %). Este desmatamento representa um aumento de 113 % comparado com o mesmo período em 2015 que apresentou desmatamento de 100 km². Se considerarmos o desmatamento acumulado no período de agosto de 2014 a março de 2015 e, agosto de 2015 a março de 2016 observa-se uma redução de 20 % do desmatamento (Fonseca et al., 2016).

A região que apresenta maiores índices de desmatamento é a mesma em que a fronteira agrícola avança em direção a floresta. Essa porção de terra é conhecida como Arco de desmatamento da Amazônia. Uma vez que os solos desta região apresentam fertilidade natural baixa, será necessário um incremento com a utilização de fertilizantes.

A constante utilização de fertilizantes fosfatados pode possibilitar a entrada de metais pesados na cadeia alimentar. As concentrações dos metais são variáveis em função da rocha fosfática da qual os fertilizantes foram obtidos. Adubações fosfatadas sucessivas podem acarretar no acúmulo de metais como Cd, Cr, Cu, Pb, Ni e Zn (Bizarro et al., 2008; Campos et al., 2005; Freitas et al., 2009). Estudos voltados para a adsorção de metais pesados no solo, podem contribuir com diretrizes a respeito da tomada de decisão da melhor forma de gerenciar o uso do solo, garantindo assim que não haja contaminação dos mesmos.

A queda observada no desmatamento da Amazônia ainda é vista com preocupação levando em consideração que a predominância dos solos neste bioma é de fertilidade natural baixa, e existem algumas classes que apesar de sustentarem uma vegetação exuberante representam ambientes frágeis. Desta forma, o desmatamento desordenado deste bioma pode acarretar na degradação e consequente contaminação deste ambiente. Fearnside (2006) afirma que o controle do desmatamento é essencial para evitar os impactos da perda da floresta e que o elemento fundamental para reduzir a velocidade do desmatamento, e um dia pará-lo, é a vontade política para fazer isto.

3.5.1 Relevo, Clima e Vegetação

O relevo da região Amazônica apresenta uma complexidade estrutural e morfológica que esta ligada à sua dimensão territorial. Por ser formado sobre terrenos de idades geológicas distintas, desde as mais antigas até as mais recentes, o relevo é de modo geral bem variado, ocorrendo desde as planícies de inundação, também conhecidas como várzeas, até as serras e superfície de Arrasamento do Escudo das Guianas. O relevo apresenta elevações pouco acentuadas, com altitudes em torno de 150 m, contudo apresenta elevações consideráveis em determinados pontos da região como, por exemplo, no Pico da Neblina (altitude aprox. de 3.000

m); o Monte Roraima (altitude aprox. de 2.700 m) e a Serra do Cachimbo (altitude aprox. de 600 m) (Bastos et al., 1986; Falesi, 1986; IBGE, 2011).

Um papel importante para esta diversidade ambiental são as variações climáticas da região. A Amazônia apresenta características climáticas próprias, em que dois fatos podem ser destacados, pois definem as características de regime estacional reinante na região: a precipitação anual variando de 1.000 a 3.600 mm, caracterizando duas épocas de chuvas bem definidas: uma mais chuvosa tendo início entre dezembro e janeiro, podendo ter duração de cinco a seis meses e a menos chuvosa atingindo os demais meses do ano. Desta forma, a região da Amazônia apresenta clima quente e úmido e de acordo com a classificação de Köppen pode ser dividido em três áreas climáticas distintas, sendo elas: Afi - clima tropical chuvoso em estação seca; Ami - clima tropical chuvoso com pequeno período seco e; Awi - clima tropical chuvoso com nítida estação seca (Ab'Sáber, 2007; Rodrigues, 1996) .

A vegetação que recobre a Amazônia é muito diversificada. As regiões fitoecológicas existentes na Amazônia brasileira são: Floresta Ombrófila Densa; Floresta Ombrófila Aberta; Floresta Estacional Decidual; Floresta Estacional Semidecidual; Savana; Savana-Estépica; Campinaranas; Cerrado.

Também ocorrem áreas com contatos entre tipos de vegetação, que são áreas de tensão ecológica resultante do contato de duas ou mais regiões fitoecológicas, onde estas podem se justaporem ou se interpenetrarem, formando os contatos identificados, respectivamente, como os encraves e ecótonos. Por fim, temos os refúgios vegetacionais que ocorrem principalmente em altitudes elevadas com vegetação floristicamente diferenciada do contexto geral da flora da região (IBGE, 2011; RADAM, 1978; Rodrigues, 1996).

3.5.2 Solos

Os primeiros registros sobre as características dos solos da Amazônia foram descritos por Marbut e Manifold em 1926. Desde então muitos trabalhos foram desenvolvidos, destacando o trabalho de Sombroek, em 1966, em que são descritos pela primeira vez as Terras Pretas de Índio, solos antropogênicos e os Plintossolos (Teixeira et al., 2010).

Em um curto espaço de tempo, com o advento do Projeto RADAM, utilizando imagens de radar na escala de 1: 250.000 e outros equipamentos de

sensores remotos foi possível a interpretação destas imagens. E juntamente com trabalhos de coleta e análises de solos, se deu a confecção dos primeiros mapas de solos da região Amazônica (Rodrigues, 1996).

De maneira geral, os solos da Amazônia podem ser divididos em solos de várzea e solos de terra firme. Os solos de várzea margeiam os rios inseridos neste bioma, e em determinadas partes do ano, estão sujeitos a inundações. Os solos de terra firme se encontram nas porções mais elevadas da paisagem e não sofrem influência das cheias dos rios.

A região da Amazônia encontra-se sob duas zonas estruturais distintas: a Bacia Sedimentar Paleozóica do Amazonas e o Cráton Amazônico. Devido a sua enorme extensão continental, o Cráton Amazônico apresenta grande diversidade pedológica e geomorfológica. Os solos dominantes no Cráton Amazônico são: Argissolos (51 %), Latossolos (27,4 %), Neossolos Litólicos (8,5 %) e Espodossolos e Neossolos Quartzarênicos (juntos somam 7,5 % da área total mapeada). O clima úmido predominante na região desestabiliza a formação de hematita desfavorecendo a formação de Latossolos Vermelhos. A desestabilização no clima superúmido atual revela a podzolização do manto Latossólico preexistente e evidencia o predomínio de Argissolos sobre Latossolos (Schaefer, 2013).

Na Bacia Sedimentar do Amazonas os Argissolos distróficos ocupam 34,4 % do total da área. Em seguida têm-se os Latossolos distróficos (30,3 %), Plintossolos (13,2 %), Gleissolos na maioria eutróficos (7,1 %). Os Espodossolos ocupam menos de 3 % da área total e, a presença de 6,8 % de Luvisolos cuja presença generalizada ocorre na Bacia do Acre, que sofreu influência de sedimentos de origem Andina e prolongada condição semi-árida (Schaefer, 2013).

O processo pedogenético que os solos de várzea estão sujeitos são limitados em função do nível elevado do lençol freático e a inundação periódica. São solos jovens, predominantemente eutróficos, com elevada capacidade de troca de cátions e com elevados teores de cálcio e magnésio. A composição mineralógica destes solos é bastante variada como reflexo da diversidade e da natureza recente do material de origem, das condições periódicas de hidromorfismo e do reduzido grau de pedogênese. A elevada fertilidade destes solos está relacionada com a mineralogia e a presença de minerais silicatados 2:1 como vermiculita, montmorilonita e ilita (Guimarães et al., 2013; Lima, 2001; Rodrigues, 1996).

Em contraste, os solos de terra firme possuem boas condições de drenagem, o tempo de exposição e a atuação dos agentes bioclimáticos propiciam a formação de solos profundos e com avançado grau de intemperismo. São solos pobres e ácidos, de baixa fertilidade, com elevados teores de alumínio trocável e baixos valores de soma de bases e capacidade de troca de cátions. A baixa fertilidade desses solos está relacionada com a pobreza do material de origem e intensa lixiviação de bases, decorrentes das elevadas precipitações que ocorrem na região. Os principais minerais que compõem a fração argila destes solos são caulinita, gibssita, ilita, goethita e hematita (Campos et al., 2011; Lima, 2001; Lima et al., 2006; Marques et al., 2002). Entretanto, alguns minerais como vermiculita e esmectita ambos com hidroxí entre camadas, que não são comuns em ambientes de intenso intemperismo, são encontrados nos solos de terra firme (Lima et al. 2006; Marques et al., 2002; Xavier 2013).

Os solos do Amazonas apresentam de modo geral baixa fertilidade natural (Argissolos e Latossolos). Assim, faz-se necessário um cuidado maior na utilização deste recurso (Xavier, 2013), visto que existem algumas classes de solos que dão suporte para tipos de vegetação florestal relativamente exuberante, mas que por suas limitações apresentam ambientes frágeis como, por exemplo, os Neossolos Quartzarênicos, os Espodossolos e Plintossolos.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Seleção e caracterização química, física e mineralógica das amostras de solos estudados

Para realização deste trabalho foram selecionados nove solos de acordo com sua representatividade e distribuição na Bacia Sedimentar Amazônica. Os solos apresentam diferentes características mineralógicas, texturais e, portanto, diferentes capacidades para adsorção de metais pesados. As amostras de solo utilizadas se encontram no banco de solos do laboratório de Mineralogia da Universidade Federal de Viçosa. As amostras foram coletadas em áreas que não foram expostas à ação antrópica, levando em consideração as classes de solos da região em função de sua dominância na área de estudo (Tabela 1).

Tabela 1. Classificação dos solos

Solo	Símbolo ^{1/}	Símbolo ^{2/}
Latossolo Amarelo	LA	LA
Argissolo Amarelo	PA	PA
Neossolo Quartzarênico Hidromórfico	RQg	RQg
Gleissolo Háptico	GX	GX
Neossolo Flúvico	RY	RY
Argissolo Amarelo (Terra Preta de Índio)	PA	TPI
Plintossolo	F	F
Neossolo Quartzarênico Órtico	RQo	RQo
Espodossolo	E	E

^{1/}Simbologia de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2013); ^{2/}Simbologia utilizada neste trabalho.

Neste trabalho, para melhor discussão e contextualização, optou-se por utilizar a denominação Terra Preta de Índio para a amostra de solo que, segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, é classificada como Argissolo Amarelo. Tendo em vista que, embora as características desses solos os remetem à classe Argissolo, a literatura da região Amazônica têm se referido a eles como Terra Preta de Índio devido às atividades antropogênicas neles desenvolvidas no passado e que lhes conferiram características peculiares ainda sem uma classificação oficial.

As amostras de solos coletadas foram analisadas e caracterizadas química, física e mineralogicamente por Xavier (2013), e estão representadas nas Tabelas 2, 3, 4 e 5.

Tabela 2. Resultado das análises físicas das amostras de solos

Hor.	Prof.	Cor		Areia	Silte	Argila	ADA ¹	Classe Textural
	cm	seca	úmida	-----%-----			-dag kg ⁻¹ -	
Latossolo Amarelo								
A	0-10	2.5Y 5/2	2.5Y 3/3	17	12	71	14	Muito argilosa
Bw	~100	10YR 8/4	10YR 7/6	9	6	85	2	Muito argilosa
Argissolo Amarelo								
A	0-10	10YR 8/2	10YR 5/3	71	7	22	9	Franco-argilo-arenosa
Bt	~100	7.5 YR 8/3	7.5 YR 7/6	55	5	40	2	Argilo-arenosa
Neossolo Quartzarênico Hidromórfico								
A	0-10	10YR 6/1	10YR 4/2	80	6	14	4	Franco-arenosa
C	50+	10YR 7/1	10YR 5/2	78	5	17	8	Franco-arenosa
Gleissolo Háplico								
A	0-10	10YR 5/3	10YR 3/3	4	63	33	11	Franco-argilo-siltosa
Cg	80+	10YR 5/3	10YR 4/3	2	68	30	12	Franco-argilo-siltosa
Neossolo Flúvico								
A	0-10	10YR 4/3	10YR 3/3	42	41	17	5	Franco
C	100+	10YR 5/3	10YR 4/3	25	59	16	7	Franco-siltosa
Terra Preta de Índio								
A1	0-10	10YR 3/1	10YR 2/1	58	12	30	4	Franco-argilo-arenosa
A2	10-30	10YR 3/1	10YR 2/1	58	6	36	7	Argilo-arenosa
Bt	100+	10YR 6/6	10YR 5/6	26	5	69	2	Muito argilosa
Plintossolo								
A	0-10	10YR 4/3	10YR 3/3	49	11	40	9	Argilo-arenosa
C	120+	5YR 5/6	5YR 4/6	38	20	42	1	Argila
Neossolo Quartzarênico Órtico								
A	0-10	10YR 5/1	10YR 3/1	95	1	4	3	Areia
C	50+	10YR4/1	10YR 2/1	94	4	2	1	Areia
Espodossolo								
A	0-10	10YR 4/1	10YR 3/1	94	2	4	1	Areia
Bs	50-60	10YR 4/3	10YR 3/2	95	3	2	1	Areia

^{1/} ADA - Argila Dispersa em Água. Fonte: Adaptado de Xavier (2013).

Tabela 3. Resultados das análises químicas das amostras de solos

Hor.	Prof.	pH		Al ³⁺	H + Al	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	SB	CTC _{pH7,0}	CTC _{ef}	P	P-rem	MO
	cm	H ₂ O	KCl	-----cmol _c dm ⁻³ -----								mg dm ⁻³	mg L ⁻¹	dag kg ⁻¹
Latossolo Amarelo														
A	0-10	3,6	3,2	2,7	13,4	0,00	0,05	0,06	0,11	13,51	2,81	3,8	18,3	7,78
Bw	~100	4,5	4,0	0,9	3,2	0,00	0,02	0,00	0,02	3,22	0,92	0,6	14,4	1,13
Argissolo Amarelo														
A	0-10	4,2	3,8	0,9	4,5	0,02	0,03	0,03	0,08	4,58	0,98	3,8	31,0	1,76
Bt	~100	4,8	4,2	0,5	1,6	0,00	0,01	0,00	0,01	1,61	0,51	0,6	24,5	0,38
Neossolo Quartzarênico Hidromórfico														
A	0-10	4,2	3,5	1,0	6,4	0,00	0,07	0,04	0,11	6,51	1,11	2,2	36,0	2,01
C	50+	4,9	4,1	0,6	4,0	0,00	0,02	0,01	0,03	4,03	0,63	5,9	31,3	1,63
Gleissolo Háplico														
A	0-10	4,6	3,3	2,7	8,0	5,32	1,79	0,15	7,26	15,26	9,96	38,5	11,8	2,89
Cg	80+	6,1	4,1	0,0	2,9	10,14	4,15	0,11	14,40	17,30	14,40	30,3	25,1	0,88
Neossolo Flúvico														
A	0-10	5,5	4,2	0,1	3,2	8,25	1,1	0,12	9,47	12,67	9,57	101,7	27,3	1,51
C	100+	6,3	4,5	0,0	2,4	11,39	2,94	0,14	14,47	16,87	14,47	192,3	34,4	1,00
Terra Preta de Índio														
A1	0-10	5,5	4,8	0,0	7,1	7,41	0,86	0,11	8,38	15,48	8,38	101,7	36,3	6,28
A2	10-30	5,2	4,3	0,1	8,7	4,36	0,19	0,04	4,59	13,29	4,69	176,0	29,2	3,45
Bt	100+	5,0	4,3	0,1	3,7	0,93	0,09	0,00	1,02	4,72	1,12	163,3	29,5	0,38
Plintossolo														
A	0-10	4,4	3,7	1,7	7,9	0,05	0,07	0,08	0,20	8,10	1,90	1,9	17,9	3,45
C	120+	5,2	4,7	0,1	2,1	0,00	0,01	0,01	0,02	2,12	0,12	0,6	11,2	0,25
Neossolo Quartzarênico Órtico														
A	0-10	3,7	2,4	1,3	9,0	0,00	0,01	0,02	0,03	9,03	1,33	1,5	55,9	2,39
C	50+	4,6	3,0	0,4	2,7	0,00	0,01	0,00	0,01	2,71	0,41	1,2	28,4	0,13
Espodossolo														
A	0-10	3,9	2,4	1,4	9,7	0,00	0,02	0,01	0,03	9,73	1,43	1,7	53,6	2,51
Bs	50-60	5,6	4,4	0,1	1,4	0,00	0,01	0,00	0,01	1,41	0,11	1,7	48,9	0,0

Fonte: Adaptado de Xavier (2013).

Tabela 4. Valores de alumínio e ferro extraídos por ditionito-citrato de sódio (Al_d e Fe_d) e oxalato de amônio (Al_o e Fe_o) na fração argila

Horizonte	Profundidade	Fe _d	Fe _o	Fe _o / Fe _d	Al _d	Al _o	Al _o / Al _d
	cm	-----dag kg ⁻¹ -----			-----dag kg ⁻¹ -----		
		Latossolo Amarelo					
A	0-10	1,81	0,21	0,12	0,32	0,32	0,98
Bw	~100	1,33	0,15	0,11	0,35	0,34	0,95
		Argissolo Amarelo					
A	0-10	1,66	0,07	0,04	0,35	0,31	0,88
Bt	~100	2,25	0,18	0,08	0,39	0,37	0,95
		Neossolo Quartzarênico Hidromórfico					
A	0-10	0,17	0,11	0,66	0,08	0,51	6,61
C	50+	0,10	0,07	0,75	0,04	0,53	12,78
		Gleissolo Háptico					
A	0-10	2,17	1,39	0,64	0,40	0,69	1,71
Cg	80+	4,41	0,44	0,10	0,33	0,36	1,08
		Neossolo Flúvico					
A	0-10	4,33	2,37	0,55	0,28	0,54	1,90
C	100+	3,47	2,01	0,58	0,91	0,47	0,52
		Terra Preta de Índio					
A1	0-10	6,68	0,47	0,07	0,88	0,39	0,45
A2	10-30	5,93	0,69	0,12	0,82	0,52	0,63
Bt	100+	6,08	0,45	0,07	0,87	0,40	0,46
		Plintossolo					
A	0-10	7,11	0,19	0,03	0,82	0,24	0,30
C	120+	9,30	0,15	0,02	0,75	0,33	0,43
		Neossolo Quartzarênico Órtico					
A	0-10	0,19	0,00	0,01	0,01	0,05	6,19
C	50+	0,11	0,01	0,06	0,00	0,04	10,36
		Espodossolo					
A	0-10	0,09	0,02	0,17	0,00	0,11	38,99
Bs	50-60	0,07	0,06	0,68	0,10	1,60	16,41

Fonte: Adaptado de Xavier (2013).

Tabela 5. Resultado da composição mineralógica das frações areia, silte e argila das amostras de solos

Horizonte	Profundidade (cm)	Areia	Silte	Argila ¹
Latossolo Amarelo				
A	0-10	Ct, Qz, An	Ct, Qz, Gt, An	Ct, Gt, An
Bw	~100	Ct, Qz, An	Ct, Qz, Gt, An	Ct, Gt, An
Argissolo Amarelo				
A	0-10	Qz	Ct, An, Gt, Qz	Ct, Gt, An, Qz
Bt	~100	Qz	Ct, An, Gt, Qz	Ct, Gt, An, Qz
Neossolo Quartzarênico Hidromórfico				
A	0-10	Ct, Qz	Cl, Il, Ct, Qz, An, Fd	Ct, Il, An
C	50+	Ct, Qz	Cl, Il, Ct, Qz, An, Fd	Ct, Il, An
Gleissolo Háptico				
A	0-10	Es, Il, Ct, Qz, Fd	Il, Ct, Qz, Fd	Es, Ct, Il, Qz, Fd
Cg	80+	Es, Il, Ct, Qz, Fd	Il, Ct, Qz, Fd	Es, Ct, Il, Qz, Fd
Neossolo Flúvico				
A	0-10	Es, Qz, Mc, Fd	Es, Il, Ct, Qz, Fd, Mc	Es, Cl, Il, Ct, Qz
C	100+	Es, Qz, Mc, Fd	Es, Il, Ct, Qz, Fd, Mc	Es, Cl, Il, Ct, Qz
Terra Preta de Índio				
A1	0-10	Qz	Ct, Qz, An, Fd	Es, Ct, Gt, Fd, Mc, An
A2	10-30	Qz	Ct, Qz, An, Fd	Es, Ct, Gt, Fd, Mc, An
Bt	100+		Ct, Qz, An, Fd	Es, Ct, Gt, Fd, Mc, An
Plintossolo				
A	0-10	Ct, Hm, Qz, Gt	Ct, Hm, Gt, An, Qz	Ct, An, Qz, Gt, Hm
C	120+	Ct, Hm, Qz, Gt	Ct, Hm, Gt, An, Qz	Ct, An, Qz, Gt, Hm
Neossolo Quartzarênico Órtico				
A	0-10	Qz, Ct	Qz, Ct	ND ²
C	50+	Qz, Ct	Qz, Ct	ND ²
Espodossolo				
A	0-10	Qz	Ct, Qz	Ct, Qz, An, Hm, Gt
Bs	50-60	Qz	Ct, Qz	Ct, Qz, An, Hm, Gt

1Argila natural e sem orientação; 2Não determinado; Ct - caulinita; Gt - goethita; Il - ilita; Qz - quartzo; An - anatásio; Mc - mica; Fd - feldspato; Hm - hematita; Es - esmectita; Cl - clorita. Fonte: Adaptado de Xavier (2013).

4.2 Ensaios de Adsorção Individual

Os ensaios de adsorção foram baseados no princípio de que quantidades conhecidas de solo e de solução são colocadas em contato sob agitação por um período de tempo até que o sistema alcance o equilíbrio (Casagrande & Soares, 2009).

Para o presente trabalho foram utilizados tubos de centrífuga do tipo falcon com capacidade de 50 mL e pesou-se 1,0 g de terra fina seca ao ar (TFSA), em triplicata. Em seguida, foram adicionados 20 mL de solução de NaNO_3 $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ (relação solo:solução $\rightarrow$ 1:20), com o pH previamente corrigido para 5,0 com HNO_3 ou NaOH $0,1 \text{ mol L}^{-1}$, contendo diferentes concentrações iniciais de nitrato de cádmio ($\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), nitrato de cromo ($\text{Cr}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$), nitrato de cobre ($\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) e nitrato de chumbo ($\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$) na forma isolada (sistema não-competitivo).

As concentrações utilizadas foram baseadas em concentrações e sais de metais utilizados em outros trabalhos (Gomes et al., 2001; Fontes & Gomes, 2003; Silveira & Alleoni, 2003; Pierangeli et al., 2007; Fontes & Santos, 2010) que abordaram a mesma temática, com o objetivo de permitir a comparação entre os resultados obtidos com outros já existentes (Tabela 6).

Tabela 6. Doses de Cd, Cr, Cu e Pb utilizadas nas isotermas de adsorção e sua equivalência em mg L^{-1}

Cd	Cr	Cu	Pb
----- mg L^{-1} -----			
0,0	0,0	0,0	0,0
2,25	13,00	12,71	20,72
4,50	26,00	25,42	41,44
8,99	52,00	38,13	62,16
13,49	77,99	50,84	82,88
17,99	103,99	76,26	124,33
22,48	129,99	101,67	165,77
26,98	155,99	152,51	207,21
31,48	181,99	203,35	248,65
35,97	207,98	254,18	290,09
71,94	233,98	305,02	580,19

O conjunto solo-solução foi levado para o agitador vertical, tipo Wagner, durante período de vinte e quatro horas consecutivas a uma velocidade de 60 rpm. Após agitação, o conjunto solo-solução foi levado a centrifugação a uma velocidade

de 3000 rpm por cinco minutos. Em seguida, o sobrenadante foi filtrado em papel de filtro quantitativo. A determinação dos metais Cd, Cr, Cu e Pb em equilíbrio foram feitas em Espectrofotometro de Absorção Atômica (Agilent Technologies 200 Series AA). Os valores referentes à leitura da solução preparada e dos metais na solução de equilíbrio, que originaram as isotermas de adsorção, para os solos e metais estudados encontram-se nas Tabelas 8, 9, 10 e 11.

A quantidade de metal adsorvida foi calculada pela diferença entre a quantidade de metal inicialmente adicionada e quantidade de metal que permaneceu na solução de equilíbrio.

4.3 Análises Estatísticas

Os dados obtidos a partir dos ensaios de adsorção foram inseridos no Programa STATISTICA versão 13.0, para que os parâmetros dos modelos de Langmuir (Equação 3) e Freundlich (Equação 4) fossem obtidos por análises de regressão não linear e os gráficos foram confeccionados.

$$[]_{ads} = (a * b * C_e) / (1 + (a * C_e)) \quad (\text{Eq. 3})$$

$$[]_{ads} = k_f * C_e^n \quad (\text{Eq. 4})$$

Em que: $[]_{ads}$ é a quantidade de metal adsorvido (mg g^{-1} de metal/solo); a é a constante relacionada a energia de ligação do metal no solo ($(\text{mg L}^{-1})^{-1}$); b é a capacidade máxima de adsorção (mg g^{-1}); C_e é a concentração do metal na solução de equilíbrio (mg L^{-1}); k_f é o coeficiente de Freundlich e indica a capacidade do solo em reter um soluto e; n se relaciona a heterogeneidade dos sítios de adsorção.

Foi realizado estudo de correlação linear simples (Correlação de Pearson), em que os solos foram divididos em três grupos distintos, levando em consideração a sua textura. Sendo agrupados: solos com textura mais arenosa (Grupo I) e solos com textura mais argilosa (Grupo II) (Tabela 7). A Terra Preta de Índio, apesar de suas características peculiares desenvolvidas através das atividades antropogênicas no passado, encontra-se no grupo II, pois o número de informações sobre este solo é insuficiente para realização do estudo de correlação de forma isolada.

Tabela 7. Grupos de solos a partir da sua textura

Grupo I	Grupo II
Neossolo Quartzarênico Hidromórfico	Latossolo Amarelo
Neossolo Flúvico	Argissolo Amarelo
Neossolo Quartzarênico Órtico	Gleissolo Háptico
Espodossolo	Plintossolo
	Terra Preta de Índio

Neste estudo foram relacionados os parâmetros obtidos a partir da equação de Langmuir, capacidade máxima de adsorção (CMA) e energia de ligação (EL), os parâmetros obtidos a partir da equação de Freundlich, Kf e n, e os atributos do solo: areia, silte, argila, CTC_{ef}, P, MO, Fe_d, Fe_o, Al_d e Al_o. Com esta análise foi possível verificar quais dentre estes atributos melhor se relacionam com o fenômeno de adsorção para os solos estudados.

Tabela 8. Média dos valores experimentais que originaram as isotermas de adsorção de Langmuir e Freundlich para Cádmi

LA ^{1/} (A)		PA ^{2/} (A)		RQg ^{3/} (A)		GX ^{4/} (A)		RY ^{5/} (A)		TPI ^{6/} (A1)		TPI ^{6/} (A2)		F ^{7/} (A)		RQo ^{8/} (A)		E ^{9/} (A)	
CEq ^{10/} (mgL ⁻¹)	Cd ^{11/} (mgg ⁻¹)	CEq (mgL ⁻¹)	Cd (mgg ⁻¹)	CEq (mgL ⁻¹)	Cd (mgg ⁻¹)	CEq (mgL ⁻¹)	Cd (mgg ⁻¹)	CEq (mgL ⁻¹)	Cd (mgg ⁻¹)	CEq (mgL ⁻¹)	Cd (mgg ⁻¹)	CEq (mgL ⁻¹)	Cd (mgg ⁻¹)	CEq (mgL ⁻¹)	Cd (mgg ⁻¹)	CEq (mgL ⁻¹)	Cd (mgg ⁻¹)	CEq (mgL ⁻¹)	Cd (mgg ⁻¹)
0,01	0,00	0,09	0,00	0,03	0,00	0,08	0,00	0,02	0,00	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,23	0,00
0,53	0,03	0,69	0,03	1,21	0,01	0,45	0,04	0,14	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05	1,51	0,02	0,92	0,03	0,85	0,03
1,08	0,06	0,02	0,08	2,53	0,02	0,71	0,06	0,27	0,07	0,09	0,07	0,10	0,07	2,39	0,03	1,63	0,04	1,52	0,04
2,14	0,10	2,20	0,10	5,91	0,04	0,91	0,15	0,12	0,17	0,05	0,23	0,34	0,16	6,36	0,04	4,72	0,08	3,71	0,10
3,39	0,19	3,80	0,18	8,30	0,05	1,80	0,20	0,62	0,22	0,18	0,31	0,44	0,22	9,20	0,05	7,18	0,09	6,32	0,11
4,94	0,25	5,72	0,23	11,47	0,04	2,77	0,25	1,21	0,29	0,31	0,42	0,73	0,29	12,69	0,06	9,71	0,12	8,99	0,13
6,80	0,33	7,45	0,31	14,84	0,10	3,94	0,34	2,06	0,38	0,46	0,46	1,10	0,40	15,72	0,11	13,52	0,15	13,79	0,15
8,00	0,40	8,93	0,38	16,06	0,14	4,87	0,37	2,68	0,42	0,60	0,52	1,31	0,44	18,08	0,11	15,11	0,17	15,38	0,16
8,70	0,45	10,08	0,43	21,22	0,14	6,65	0,40	4,15	0,45	0,79	0,70	1,86	0,49	21,93	0,09	19,40	0,14	19,52	0,14
10,21	0,51	11,79	0,48	23,40	0,17	7,17	0,57	4,96	0,61	3,14	1,40	2,28	0,67	23,87	0,23	22,18	0,27	21,69	0,28
25,64	0,97	27,06	0,94	50,68	0,25	16,50	1,14	13,15	1,20			7,91	1,31	45,58	0,55	56,71	0,33	52,56	0,41
LA ^{1/} (Bw)		PA ^{2/} (Bt)		RQg ^{3/} (C)		GX ^{4/} (Cg)		RY ^{5/} (C)		TPI ^{6/} (Bt)		F ^{7/} (C)		RQo ^{8/} (C)		E ^{9/} (Bs)			
CEq (mgL ⁻¹)	Cd (mgg ⁻¹)	CEq (mgL ⁻¹)	Cd (mgg ⁻¹)	CEq (mgL ⁻¹)	Cd (mgg ⁻¹)	CEq (mgL ⁻¹)	Cd (mgg ⁻¹)	CEq (mgL ⁻¹)	Cd (mgg ⁻¹)	CEq (mgL ⁻¹)	Cd (mgg ⁻¹)	CEq (mgL ⁻¹)	Cd (mgg ⁻¹)	CEq (mgL ⁻¹)	Cd (mgg ⁻¹)	CEq (mgL ⁻¹)	Cd (mgg ⁻¹)		
0,01	0,00	0,24	0,00	0,05	0,00	0,07	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,06	0,00	0,07	0,00	0,06	0,00		
0,81	0,02	1,42	0,01	1,74	0,00	0,21	0,04	0,12	0,04	0,71	0,03	1,39	0,02	0,85	0,03	1,50	0,02		
1,42	0,06	2,70	0,02	2,75	0,02	0,40	0,07	0,25	0,07	1,28	0,05	2,20	0,03	1,56	0,04	2,59	0,02		
2,83	0,09	5,54	0,05	7,23	0,02	0,46	0,16	0,62	0,16	1,73	0,14	4,08	0,09	5,96	0,05	7,29	0,03		
4,13	0,17	8,28	0,05	10,17	0,01	0,96	0,21	0,92	0,21	3,44	0,16	6,45	0,10	6,60	0,10	9,74	0,04		
6,14	0,22	10,30	0,06	12,88	0,01	1,58	0,28	1,44	0,28	5,31	0,20	9,43	0,12	9,46	0,12	12,90	0,05		
7,47	0,31	14,13	0,11	15,78	0,08	2,38	0,37	2,10	0,38	7,19	0,28	12,86	0,16	13,16	0,16	18,26	0,06		
9,08	0,37	16,97	0,12	18,56	0,09	3,06	0,41	2,88	0,41	9,36	0,28	15,50	0,16	16,25	0,15	22,21	0,03		
11,17	0,40	19,69	0,17	21,96	0,12	4,29	0,45	3,70	0,46	11,69	0,30	18,92	0,15	19,22	0,15	24,70	0,04		
12,09	0,47	22,69	0,19	24,39	0,15	4,90	0,61	4,66	0,62	13,28	0,45	21,47	0,28	22,27	0,27	29,21	0,13		
27,46	0,93	39,62	0,47	45,00	0,36	12,00	1,23	12,13	1,22	27,73	0,91	42,64	0,61	57,21	0,32	62,82	0,21		

^{1/}Latossolo Amarelo; ^{2/}Argissolo Amarelo; ^{3/}Neossolo Quartzarênico Hidromórfico; ^{4/}Gleissolo Háplico; ^{5/}Neossolo Flúvico; ^{6/}Terra Preta de Índio; ^{7/}Plintossolo; ^{8/}Neossolo Quartzarênico Órtico; ^{9/}Espodossolo. ^{10/}Cádmi na concentração de equilíbrio; ^{11/}Cádmi adsorvido.

Tabela 9. Média dos valores experimentais que originaram as isotermas de adsorção de Langmuir e Freundlich para Cromo

LA ^{1/} (A)		PA ^{2/} (A)		RQg ^{3/} (A)		GX ^{4/} (A)		RY ^{5/} (A)		TPI ^{6/} (A1)		TPI ^{6/} (A2)		F ^{7/} (A)		RQo ^{8/} (A)		E ^{9/} (A)	
CEq ^{10/} (mgL ⁻¹)	Cr ^{11/} (mgg ⁻¹)	CEq (mgL ⁻¹)	Cr (mgg ⁻¹)	CEq (mgL ⁻¹)	Cr (mgg ⁻¹)	CEq (mgL ⁻¹)	Cr (mgg ⁻¹)	CEq (mgL ⁻¹)	Cr (mgg ⁻¹)	CEq (mgL ⁻¹)	Cr (mgg ⁻¹)	CEq (mgL ⁻¹)	Cr (mgg ⁻¹)	CEq (mgL ⁻¹)	Cr (mgg ⁻¹)	CEq (mgL ⁻¹)	Cr (mgg ⁻¹)	CEq (mgL ⁻¹)	Cr (mgg ⁻¹)
0,00	0,00	0,02	0,00	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00	0,06	0,00	0,02	0,00	0,03	0,00
0,92	0,19	2,45	0,16	2,23	0,17	0,04	0,22	0,02	0,22	0,04	0,22	0,01	0,22	0,51	0,21	2,34	0,19	5,83	0,13
3,99	0,39	10,92	0,26	9,69	0,28	0,19	0,46	0,25	0,46	0,07	0,46	0,05	0,46	3,34	0,40	13,14	0,27	17,72	0,23
24,16	0,65	42,24	0,29	38,39	0,37	0,40	0,92	0,39	0,92	0,14	0,92	0,28	0,92	15,33	0,62	42,07	0,31	49,03	0,24
37,96	0,67	56,38	0,30	54,11	0,35	1,53	1,34	1,32	1,34	0,56	1,36	4,52	1,28	37,59	0,62	57,01	0,31	64,35	0,30
61,38	0,74	79,36	0,38	77,42	0,42	3,62	1,86	3,65	1,86	1,99	1,89	15,82	1,61	60,89	0,71	83,57	0,34	92,62	0,23
81,79	0,78	127,96	0,36	100,17	0,41	8,72	2,25	9,82	2,23	10,57	2,22	28,59	1,86	81,85	0,79	107,61	0,38	117,25	0,37
103,68	0,85	155,94	0,32	125,92	0,40	25,40	2,16	16,63	2,34	21,97	2,23	41,72	1,84	121,74	0,78	127,90	0,40	165,55	0,50
126,94	0,90	196,80	0,48	149,19	0,45	26,65	2,68	27,54	2,66	35,65	2,50	57,85	2,06	165,84	1,05	154,07	0,50	217,01	0,51
151,43	0,87			173,29	0,44	37,24	2,62	39,55	2,58	49,15	2,38	71,54	1,94			199,69	0,51		
173,70	0,94			197,09	0,47	52,54	3,32	51,94	3,33	66,38	3,04	90,18	2,56						

LA ^{1/} (Bw)		PA ^{2/} (Bt)		RQg ^{3/} (C)		GX ^{4/} (Cg)		RY ^{5/} (C)		TPI ^{6/} (Bt)		F ^{7/} (C)		RQo ^{8/} (C)		E ^{9/} (Bs)	
CEq (mgL ⁻¹)	Cr (mgg ⁻¹)	CEq (mgL ⁻¹)	Cr (mgg ⁻¹)	CEq (mgL ⁻¹)	Cr (mgg ⁻¹)	CEq (mgL ⁻¹)	Cr (mgg ⁻¹)	CEq (mgL ⁻¹)	Cr (mgg ⁻¹)	CEq (mgL ⁻¹)	Cr (mgg ⁻¹)	CEq (mgL ⁻¹)	Cr (mgg ⁻¹)	CEq (mgL ⁻¹)	Cr (mgg ⁻¹)	CEq (mgL ⁻¹)	Cr (mgg ⁻¹)
0,00	0,00	0,05	0,00	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1,40	0,18	2,93	0,15	2,77	0,16	0,07	0,22	0,12	0,22	0,24	0,21	0,41	0,21	6,73	0,11	4,94	0,15
8,10	0,31	11,92	0,24	12,44	0,23	0,19	0,46	0,36	0,46	2,49	0,41	5,59	0,35	21,16	0,16	18,20	0,22
36,38	0,41	43,65	0,26	43,14	0,27	0,21	0,92	0,54	0,92	14,30	0,64	19,74	0,53	53,06	0,16	50,55	0,21
51,29	0,40	59,83	0,23	60,29	0,22	0,73	1,35	1,36	1,34	36,71	0,63	42,33	0,52	68,78	0,21	68,40	0,22
76,46	0,44	132,55	0,27	84,09	0,29	1,75	1,89	3,46	1,86	62,71	0,67	66,88	0,59	95,49	0,18	92,23	0,24
96,54	0,49	156,32	0,31	103,34	0,35	4,02	2,35	8,60	2,26	84,10	0,75	88,73	0,65	123,95	0,23	118,21	0,35
120,59	0,51	181,45	0,27	197,25	0,47	7,69	2,52	16,14	2,35	94,54	0,78	99,27	0,69	149,40	0,26	142,93	0,39
149,38	0,45	203,71	0,34			15,01	2,91	29,53	2,62	123,49	0,74	124,57	0,72	178,49	0,24		
193,32	0,54					23,75	2,89	44,67	2,47	140,47	0,56	173,50	0,90	228,96	0,27		
						35,05	3,67	60,03	3,17	168,57	0,99						

^{1/}Latossolo Amarelo; ^{2/}Argissolo Amarelo; ^{3/}Neossolo Quartzarênico Hidromórfico; ^{4/}Gleissolo Háplico; ^{5/}Neossolo Flúvico; ^{6/}Terra Preta de Índio; ^{7/}Plintossolo; ^{8/}Neossolo Quartzarênico Órtico; ^{9/}Espodossolo. ^{10/}Cromo na concentração de equilíbrio; ^{11/}Cromo adsorvido.

Tabela 10. Média dos valores experimentais que originaram as isotermas de adsorção de Langmuir e Freundlich para Cobre

LA ^{1/} (A)		PA ^{2/} (A)		RQg ^{3/} (A)		GX ^{4/} (A)		RY ^{5/} (A)		TPI ^{6/} (A1)		TPI ^{6/} (A2)		F ^{7/} (A)		RQo ^{8/} (A)		E ^{9/} (A)	
CEq ^{10/} (mgL ⁻¹)	Cu ^{11/} (mgg ⁻¹)	CEq (mgL ⁻¹)	Cu (mgg ⁻¹)	CEq (mgL ⁻¹)	Cu (mgg ⁻¹)	CEq (mgL ⁻¹)	Cu (mgg ⁻¹)	CEq (mgL ⁻¹)	Cu (mgg ⁻¹)	CEq (mgL ⁻¹)	Cu (mgg ⁻¹)	CEq (mgL ⁻¹)	Cu (mgg ⁻¹)	CEq (mgL ⁻¹)	Cu (mgg ⁻¹)	CEq (mgL ⁻¹)	Cu (mgg ⁻¹)	CEq (mgL ⁻¹)	Cu (mgg ⁻¹)
0,08	0,00	0,04	0,00	0,50	0,00	0,19	0,00	0,05	0,00	0,11	0,00	0,00	0,00	0,17	0,00	0,06	0,00	0,25	0,00
2,70	0,18	6,88	0,10	4,35	0,15	1,18	0,21	0,44	0,23	0,05	0,24	0,00	0,24	3,19	0,17	1,46	0,23	1,65	0,23
7,54	0,35	15,88	0,18	11,81	0,26	3,06	0,43	1,53	0,47	0,31	0,49	0,13	0,49	9,77	0,30	7,92	0,40	11,19	0,34
14,45	0,44	25,12	0,23	16,91	0,39	6,49	0,60	3,43	0,66	0,48	0,72	0,40	0,72	18,15	0,37	17,45	0,46	21,39	0,38
22,54	0,57	36,87	0,28	27,50	0,47	8,41	0,85	5,26	0,91	1,79	0,98	1,05	1,00	26,09	0,50	29,64	0,47	31,04	0,44
39,35	0,74	58,61	0,36	48,15	0,56	18,64	1,15	12,64	1,27	0,60	1,52	2,72	1,47	45,27	0,62	42,42	0,74	47,58	0,64
59,30	0,89	82,97	0,42	73,37	0,61	29,47	1,49	23,95	1,60	2,77	2,02	9,49	1,89	62,46	0,83	68,41	0,79	66,76	0,83
102,54	1,15	128,92	0,63	111,96	0,96	56,44	2,08	51,26	2,18	12,02	2,96	36,91	2,47	104,57	1,11	121,06	0,83	213,31	1,25
150,15	1,10	226,18	1,20	157,51	0,96	86,45	2,38	82,86	2,45	32,98	3,45	73,61	2,63	150,55	1,09	164,54	0,96	270,21	1,20
196,89	1,78	285,57	1,08	204,31	1,64	126,74	3,19	126,21	3,20	72,52	4,27	120,46	3,31	202,59	1,67	210,01	1,31		
247,76	1,84			260,24	1,59	162,74	3,54	165,19	3,49	115,36	4,48	169,20	3,41	252,76	1,74	265,46	1,30		
LA ^{1/} (Bw)		PA ^{2/} (Bt)		RQg ^{3/} (C)		GX ^{4/} (Cg)		RY ^{5/} (C)		TPI ^{6/} (Bt)		F ^{7/} (C)		RQo ^{8/} (C)		E ^{9/} (Bs)			
CEq (mgL ⁻¹)	Cu (mgg ⁻¹)	CEq (mgL ⁻¹)	Cu (mgg ⁻¹)	CEq (mgL ⁻¹)	Cu (mgg ⁻¹)	CEq (mgL ⁻¹)	Cu (mgg ⁻¹)	CEq (mgL ⁻¹)	Cu (mgg ⁻¹)	CEq (mgL ⁻¹)	Cu (mgg ⁻¹)	CEq (mgL ⁻¹)	Cu (mgg ⁻¹)	CEq (mgL ⁻¹)	Cu (mgg ⁻¹)	CEq (mgL ⁻¹)	Cu (mgg ⁻¹)	CEq (mgL ⁻¹)	Cu (mgg ⁻¹)
0,05	0,00	0,06	0,00	0,20	0,00	0,01	0,00	0,07	0,00	0,05	0,00	0,02	0,00	0,10	0,00	0,06	0,00		
8,14	0,07	7,83	0,08	7,16	0,09	0,48	0,23	0,17	0,23	3,22	0,17	4,44	0,15	3,97	0,18	6,20	0,14		
16,74	0,16	13,57	0,22	15,47	0,19	1,88	0,46	1,05	0,48	10,30	0,29	13,02	0,24	13,66	0,29	17,95	0,20		
26,86	0,20	25,38	0,23	21,85	0,30	4,12	0,65	2,79	0,68	17,37	0,39	23,06	0,27	27,02	0,27	28,44	0,24		
36,19	0,29	38,64	0,24	35,47	0,31	7,34	0,87	4,53	0,93	26,21	0,49	31,84	0,38	38,03	0,30	40,99	0,24		
58,36	0,36	59,41	0,34	57,40	0,38	14,41	1,24	11,59	1,30	46,45	0,60	52,69	0,47	56,28	0,46	57,96	0,43		
82,30	0,43	86,31	0,35	82,53	0,43	23,46	1,61	21,64	1,65	68,32	0,71	75,55	0,57	77,49	0,61	84,05	0,48		
121,36	0,78	125,78	0,69	121,42	0,78	51,10	2,18	46,51	2,27	116,38	0,88	123,88	0,73	138,80	0,47	132,14	0,61		
169,77	0,71	226,53	1,19	218,12	1,36	77,91	2,55	79,25	2,52	157,88	0,95	223,91	1,24	294,21	0,72	178,58	0,68		
229,06	1,14	284,83	1,09	273,22	1,33	111,83	3,49	117,23	3,38	276,90	1,25	273,77	1,32			293,61	0,73		
281,49	1,16					152,15	3,75	155,74	3,68										

^{1/}Latossolo Amarelo; ^{2/}Argissolo Amarelo; ^{3/}Neossolo Quartzarênico Hidromórfico; ^{4/}Gleissolo Háplico; ^{5/}Neossolo Flúvico; ^{6/}Terra Preta de Índio; ^{7/}Plintossolo; ^{8/}Neossolo Quartzarênico Órtico; ^{9/}Espodossolo. ^{10/}Cobre na concentração de equilíbrio; ^{11/}Cobre adsorvido.

Tabela 11. Média dos valores experimentais que originaram as isotermas de adsorção de Langmuir e Freundlich para Chumbo

LA ^{1/} (A)		PA ^{2/} (A)		RQg ^{3/} (A)		GX ^{4/} (A)		RY ^{5/} (A)		TPI ^{6/} (A1)		TPI ^{6/} (A2)		F ^{7/} (A)		RQo ^{8/} (A)		E ^{9/} (A)	
CEq ^{10/} (mgL ⁻¹)	Pb ^{11/} (mgg ⁻¹)	CEq (mgL ⁻¹)	Pb (mgg ⁻¹)	CEq (mgL ⁻¹)	Pb (mgg ⁻¹)	CEq (mgL ⁻¹)	Pb (mgg ⁻¹)	CEq (mgL ⁻¹)	Pb (mgg ⁻¹)	CEq (mgL ⁻¹)	Pb (mgg ⁻¹)	CEq (mgL ⁻¹)	Pb (mgg ⁻¹)	CEq (mgL ⁻¹)	Pb (mgg ⁻¹)	CEq (mgL ⁻¹)	Pb (mgg ⁻¹)	CEq (mgL ⁻¹)	Pb (mgg ⁻¹)
0,00	0,00	0,47	0,00	0,66	0,00	0,04	0,00	0,10	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00	0,01	0,00	0,01	0,00	0,08	0,00
1,16	0,31	3,80	0,26	2,01	0,29	0,49	0,63	0,20	1,60	0,00	0,34	0,02	1,14	0,46	0,33	0,22	0,33	0,37	0,37
4,02	0,55	13,86	0,36	8,62	0,46	0,99	1,12	0,72	2,35	0,09	0,63	0,06	1,60	4,61	0,54	2,32	0,59	6,16	0,72
7,39	0,99	23,70	0,66	15,45	0,83	1,81	1,56	2,79	2,96	0,08	1,14	0,19	2,36	8,96	0,96	8,56	0,97	12,58	0,99
12,65	1,35	38,75	0,83	26,25	1,08	4,14	2,28	6,67	3,76	0,10	1,60	0,51	3,01	17,18	1,26	12,65	1,35	22,38	1,14
25,91	1,85	64,61	1,07	47,39	1,42	9,02	2,84	11,28	4,37	0,10	2,37	1,16	3,87	32,73	1,71	32,66	1,71	49,15	1,37
40,95	2,20	93,75	1,14	74,36	1,53	13,61	3,62	18,37	5,01	0,29	3,01	2,31	4,55	56,00	1,90	93,73	2,01	72,80	1,58
61,73	2,65	131,14	1,27	101,88	1,85	21,09	4,18	115,99	8,77	0,56	3,88	5,40	5,27	77,57	2,34	152,07	2,33	107,59	1,94
84,54	2,91	157,02	1,46	138,61	1,83	27,60	4,82			0,72	4,59	109,25	8,90	104,55	2,51	365,77	3,77	144,75	1,63
106,37	3,25	189,13	1,59	163,84	2,10	138,52	8,32			1,21	5,35			131,86	2,74			166,25	1,92
292,26	5,24	419,56	2,70	387,86	3,33					21,45	10,66			313,55	4,82			405,55	2,71

LA ^{1/} (Bw)		PA ^{2/} (Bt)		RQg ^{3/} (C)		GX ^{4/} (Cg)		RY ^{5/} (C)		TPI ^{6/} (Bt)		F ^{7/} (C)		RQo ^{8/} (C)		E ^{9/} (Bs)	
CEq (mgL ⁻¹)	Pb (mgg ⁻¹)	CEq (mgL ⁻¹)	Pb (mgg ⁻¹)	CEq (mgL ⁻¹)	Pb (mgg ⁻¹)	CEq (mgL ⁻¹)	Pb (mgg ⁻¹)	CEq (mgL ⁻¹)	Pb (mgg ⁻¹)	CEq (mgL ⁻¹)	Pb (mgg ⁻¹)	CEq (mgL ⁻¹)	Pb (mgg ⁻¹)	CEq (mgL ⁻¹)	Pb (mgg ⁻¹)	CEq (mgL ⁻¹)	Pb (mgg ⁻¹)
0,11	0,00	0,02	0,00	0,16	0,00	0,01	0,00	0,11	0,00	0,15	0,00	0,14	0,00	0,01	0,00	0,16	0,00
6,34	0,21	8,69	0,16	6,34	0,21	0,11	0,33	0,08	1,60	0,49	0,33	1,97	0,30	2,25	0,33	6,85	0,24
17,68	0,28	23,37	0,17	20,19	0,23	0,06	0,63	0,45	2,36	3,92	0,56	10,44	0,43	13,03	0,58	19,46	0,45
28,33	0,57	36,72	0,40	30,89	0,52	0,24	1,13	2,48	2,97	8,73	0,96	18,23	0,77	25,78	0,72	29,62	0,65
42,49	0,75	52,56	0,55	44,39	0,71	0,59	1,59	5,98	3,77	15,06	1,30	29,16	1,02	35,36	0,88	43,90	0,71
69,57	0,98	82,75	0,71	76,30	0,84	1,44	2,34	10,43	4,39	31,81	1,73	49,46	1,38	70,37	0,95	74,00	0,87
99,69	1,02	114,74	0,72	107,55	0,87	3,49	2,95	17,80	5,02	51,47	1,99	77,04	1,48	99,17	1,05	101,12	1,01
132,40	1,24	144,35	1,00	143,27	1,02	7,37	3,74	114,69	8,79	73,67	2,42	109,01	1,71	166,59	1,19	138,76	1,32
164,76	1,30	179,95	1,00	177,82	1,04	11,33	4,37			99,59	2,61	139,13	1,82	460,50	1,61	164,56	1,23
195,08	1,47	214,64	1,08	211,16	1,15	17,48	5,02			128,03	2,81	165,66	2,06			202,10	1,21
429,96	2,49	447,59	2,13	460,71	1,87	94,79	9,19			342,92	4,23	384,52	3,40			458,12	1,66

^{1/}Latossolo Amarelo; ^{2/}Argissolo Amarelo; ^{3/}Neossolo Quartzarênico Hidromórfico; ^{4/}Gleissolo Háplico; ^{5/}Neossolo Flúvico; ^{6/}Terra Preta de Índio; ^{7/}Plintossolo; ^{8/}Neossolo Quartzarênico Órtico; ^{9/}Espodossolo. ^{10/}Chumbo na concentração de equilíbrio; ^{11/}Chumbo adsorvido.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Isotermas de adsorção de Langmuir e Freundlich

Os valores referentes aos R^2 , b , k , k_f e n das equações de Langmuir e Freundlich, respectivamente, para os metais Cd, Cr, Cu e Pb são apresentados nas Tabelas 12 a 15.

Para as isotermas de Langmuir, os valores de R^2 variaram de 0,96 a 0,99 para Cd (Tabela 12), de 0,85 a 0,98 para Cr (Tabela 13), de 0,90 a 0,99 para Cu (Tabela 14) e de 0,90 a 0,98 para Pb (Tabela 15).

Com relação às isotermas de Freundlich, os ajustes variaram de 0,91 a 0,99 para Cd (Tabela 12), de 0,88 a 0,99 para Cr (Tabela 13), de 0,94 a 0,99 para Cu (Tabela 14) e de 0,97 a 0,99 para Pb (Tabela 15).

A capacidade máxima de adsorção (CMA) variou de 0,51 a 6,42 mg g^{-1} para Cd; de 0,26 a 3,19 mg g^{-1} para Cr; de 0,97 a 4,58 mg g^{-1} para Cu; e de 1,51 a 10,89 mg g^{-1} para Pb. Os menores valores referentes à CMA para Cd, Pb e Cr correspondeu à amostra de RQo, horizonte C e para Cu a amostra correspondente foi a amostra E, horizonte Bs. Os maiores valores da CMA para Cd correspondeu a amostra GX, horizonte A, para Pb a amostra TPI, horizonte A1 e para Cu e Cr a amostra Gx, horizonte C.

O coeficiente a , relacionado à energia de ligação variou de 0,01 a 0,65 $(\text{mg g}^{-1})^{-1}$ para Cd; de 0,02 a 3,15 $(\text{mg g}^{-1})^{-1}$ para Cr; de 0,002 a 0,35 $(\text{mg g}^{-1})^{-1}$ para Cu; e de 0,002 a 1,03 $(\text{mg g}^{-1})^{-1}$ para Pb. Os menores valores de a para Cd correspondeu a amostra RQg, horizonte A, para Pb e Cu foi a amostra PA, horizonte Bt e para Cr foi a amostra E, horizonte A. Para os maiores valores têm-se para Cd e Pb a amostra TPI, horizonte A1 e para Cu e Cr a amostra TPI, horizonte A2.

O coeficiente K_f da isoterma de Freundlich, que representa a capacidade do solo em reter um soluto, variou de 0,002 a 0,72 para Cd; de 0,05 a 1,37 para Cr; de 0,02 a 1,18 para Cu; e de 0,17 a 4,28 para Pb. O menor valor de K_f para Cd refere-se a amostra E, horizonte Bs; para Pb a amostra F, horizonte C; para Cu a amostra RQg, horizonte C; e para Cr a amostra E, horizonte A. Para os maiores valores de k para Cd, Pb e Cu corresponde a amostra TPI, horizonte A1 e para Cr a amostra GX, horizonte C.

Para os valores de n encontrados neste trabalho, observa-se que eles variaram de 0,58 a 0,95 para Cd; de 0,19 a 0,44 para Cr; de 0,24 a 0,77 para Cu; e de 0,22 a 0,71 para Pb. O menor valor de n para Cd corresponde a amostra RQo, horizonte A; para Pb e Cu a amostra TPI, horizonte A2; e para Cr a amostra PA, horizonte Bt. O maior valor de n para Cd refere-se à amostra E, horizonte Bs, para Pb a amostra PA, horizonte Bt, para Cu a amostra RQg, horizonte C e para Cr a amostra E, horizonte A.

Tabela 12. Capacidade máxima de adsorção de cádmio (CMA), constante relacionada à energia de ligação, K_f e n ajustados pelas equações de Langmuir e Freundlich respectivamente.

Amostra	Hor.	Langmuir			Freundlich		
		R^2	EL (a) (mg L ⁻¹) ⁻¹	CMA (b) (mg g ⁻¹)	R^2	k_f	n
LA ^{1/}	A	0,99	0,02 ± 0,01	3,10 ± 1,36	0,99	0,07 ± 0,01	0,80 ± 0,08
	Bw	0,99	0,01 ± 3E ⁻³	5,17 ± 1,53	0,99	0,05 ± 3E ⁻³	0,90 ± 0,03
PA ^{2/}	A	0,99	0,01 ± 0,01	4,20 ± 1,79	0,99	0,06 ± 0,01	0,85 ± 0,06
	Bt	ND ^{10/}	ND	ND	ND	ND	ND
RQg ^{3/}	A	0,96	0,01 ± 0,01	0,75 ± 0,41	0,96	0,01 ± 2E ⁻³	0,78 ± 0,10
	C	ND	ND	ND	ND	ND	ND
GX ^{4/}	A	0,98	0,01 ± 3E ⁻³	6,43 ± 1,38	0,99	0,10 ± 3E ⁻³	0,87 ± 0,02
	Cg	0,99	0,04 ± 3E ⁻³	3,52 ± 0,21	0,99	0,18 ± 2E ⁻³	0,77 ± 0,01
RY ^{5/}	A	0,97	0,08 ± 0,01	2,29 ± 0,12	0,99	0,22 ± 0,01	0,64 ± 0,01
	C	0,99	0,07 ± 0,01	2,77 ± 0,39	0,99	0,20 ± 0,01	0,72 ± 0,04
TPI ^{6/}	A1	0,98	0,65 ± 0,07	2,09 ± 0,16	0,98	0,72 ± 0,01	0,59 ± 0,03
	A2	0,99	0,20 ± 0,01	2,12 ± 0,08	0,99	0,37 ± 0,01	0,62 ± 0,02
	Bt	ND	ND	ND	0,98	0,04 ± 4E ⁻³	0,95 ± 0,05
F ^{7/}	A	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	C	ND	ND	ND	ND	ND	ND
RQo ^{8/}	A	0,97	0,03 ± 0,01	0,53 ± 0,09	0,95	0,03 ± 0,01	0,58 ± 0,05
	C	0,96	0,03 ± 2E ⁻³	0,51 ± 0,01	0,95	0,03 ± 3E ⁻³	0,58 ± 0,02
E ^{9/}	A	0,96	0,02 ± 0,01	0,96 ± 0,37	0,96	0,03 ± 0,01	0,68 ± 0,08
	Bs	ND	ND	ND	ND	ND	ND

média ± desvio padrão; ^{1/}Latossolo Amarelo; ^{2/}Argissolo Amarelo; ^{3/}Neossolo Quartzarênico Hidromórfico; ^{4/}Gleissolo Háplico; ^{5/}Neossolo Flúvico; ^{6/}Terra Preta de Índio; ^{7/}Plintossolo; ^{8/}Neossolo Quartzarênico Órtico; ^{9/}Espodossolo; ^{10/}não determinado².

² No presente trabalho, em algumas amostras não foi possível determinar os valores de CMA, EL, K_f e n . Dessa forma, quando o programa utiliza as equações para fazer o ajuste, há uma tendência de superestimar a CMA dos solos. Para estes casos optou-se por não determinar os valores, e não representar as figuras das isotermas, Langmuir e Freundlich, obtidas a partir dos modelos.

Tabela 13. Capacidade máxima de adsorção de cromo (CMA)^{1/}, constante relacionada à energia de ligação^{1/}, K_f^{1/} e n^{1/} ajustados pelas equações de Langmuir e Freundlich respectivamente.

Amostra	Hor.	Langmuir			Freundlich		
		R ²	EL (a) (mg L ⁻¹) ⁻¹	CMA (b) (mg g ⁻¹)	R ²	k _f	n
LA ^{1/}	A	0,98	0,17 ± 0,02	0,88 ± 0,02	0,99	0,27 ± 2E ⁻³	0,24 ± 5E ⁻³
	Bw	0,98	0,34 ± 0,09	0,47 ± 0,03	0,98	0,20 ± 0,01	0,19 ± 0,03
PA ^{2/}	A	0,92	0,22 ± 0,06	0,38 ± 0,02	0,94	0,13 ± 0,01	0,23 ± 0,02
	Bt	0,93	0,35 ± 0,04	0,29 ± 0,01	0,90	0,12 ± 0,01	0,19 ± 0,01
RQg ^{3/}	A	0,96	0,22 ± 0,08	0,44 ± 0,04	0,94	0,14 ± 0,01	0,23 ± 0,03
	C	0,86	0,15 ± 0,04	0,35 ± 0,03	0,93	0,08 ± 0,01	0,31 ± 0,02
GX ^{4/}	A	0,96	0,80 ± 0,16	2,75 ± 0,03	0,96	1,15 ± 0,06	0,25 ± 0,01
	Cg	0,98	0,92 ± 0,02	3,19 ± 3E ⁻³	0,98	1,37 ± 0,01	0,27 ± 2E ⁻³
RY ^{5/}	A	0,97	0,69 ± 0,04	2,81 ± 0,02	0,98	1,13 ± 0,01	0,26 ± 0,01
	C	0,98	0,65 ± 0,01	2,77 ± 4E ⁻³	0,96	1,10 ± 0,01	0,25 ± 1E ⁻³
TPI ^{6/}	A1	0,97	2,59 ± 0,13	2,49 ± 0,02	0,96	1,25 ± 0,03	0,20 ± 0,01
	A2	0,94	3,15 ± 0,51	1,92 ± 0,01	0,98	0,92 ± 4E ⁻³	0,20 ± 2E ⁻³
	Bt	0,90	0,62 ± 0,16	0,74 ± 0,03	0,90	0,32 ± 0,01	0,19 ± 0,01
F ^{7/}	A	0,93	0,24 ± 0,06	0,84 ± 0,07	0,96	0,25 ± 0,02	0,26 ± 0,03
	C	0,90	0,19 ± 0,12	0,75 ± 0,09	0,97	0,21 ± 0,03	0,26 ± 0,04
RQo ^{8/}	A	0,90	0,15 ± 0,06	0,43 ± 0,02	0,95	0,12 ± 0,01	0,27 ± 0,02
	C	0,90	0,08 ± 0,05	0,26 ± 0,03	0,88	0,06 ± 0,01	0,27 ± 0,04
E ^{9/}	A	0,90	0,02 ± 0,02	0,71 ± 0,29	0,93	0,05 ± 0,02	0,44 ± 0,09
	Bs	0,85	0,11 ± 0,04	0,32 ± 0,03	0,93	0,08 ± 4E ⁻³	0,30 ± 0,01

média ± desvio padrão; ^{1/}Latossolo Amarelo; ^{2/}Argissolo Amarelo; ^{3/}Neossolo Quartzarênico Hidromórfico; ^{4/}Gleissolo Háplico; ^{5/}Neossolo Flúvico; ^{6/}Terra Preta de Índio; ^{7/}Plintossolo; ^{8/}Neossolo Quartzarênico Órtico; ^{9/}Espodossolo.

Tabela 14. Capacidade máxima de adsorção de cobre (CMA)^{1/}, constante relacionada à energia de ligação^{1/}, K_f^{1/} e n^{1/} ajustados pelas equações de Langmuir e Freundlich respectivamente.

Amostra	Hor.	Langmuir			Freundlich		
		R ²	EL (a) (mg L ⁻¹) ⁻¹	CMA (b) (mg g ⁻¹)	R ²	k _f	n
LA ^{1/}	A	0,94	0,01 ± 1E ⁻³	2,28 ± 0,22	0,98	0,11 ± 0,01	0,50 ± 0,02
	Bw	0,95	3E ⁻³ ± 2E ⁻³	2,84 ± 1,32	0,98	0,02 ± 0,01	0,73 ± 0,09
PA ^{2/}	A	0,90	3E ⁻³ ± 2E ⁻⁴	2,34 ± 0,36	0,94	0,02 ± 2E ⁻³	0,69 ± 0,02
	Bt	0,96	2E ⁻³ ± 2E ⁻⁵	3,04 ± 0,06	0,97	0,02 ± 1E ⁻³	0,75 ± 0,01
RQg ^{3/}	A	0,96	5E ⁻³ ± 1E ⁻³	2,87 ± 0,54	0,97	0,05 ± 0,01	0,62 ± 0,04
	C	0,97	2E ⁻³ ± 1E ⁻³	4,07 ± 1,29	0,98	0,02 ± 0,01	0,77 ± 0,08
GX ^{4/}	A	0,99	0,02 ± 1E ⁻³	4,51 ± 0,20	0,99	0,25 ± 5E ⁻³	0,52 ± 0,01
	Cg	0,98	0,02 ± 3E ⁻³	4,58 ± 0,24	0,99	0,33 ± 0,02	0,49 ± 0,02
RY ^{5/}	A	0,98	0,04 ± 1E ⁻³	3,70 ± 0,10	0,99	0,42 ± 0,01	0,41 ± 0,01
	C	0,98	0,04 ± 2E ⁻³	3,92 ± 0,12	0,99	0,46 ± 0,02	0,41 ± 0,01
TPI ^{6/}	A1	0,97	0,29 ± 0,02	4,25 ± 0,03	0,97	1,18 ± 0,01	0,30 ± 0,01
	A2	0,96	0,35 ± 0,03	3,02 ± 0,12	0,99	1,03 ± 0,01	0,24 ± 0,01
	Bt	0,97	0,02 ± 0,01	1,36 ± 0,25	0,98	0,12 ± 0,01	0,42 ± 0,04
F ^{7/}	A	0,98	0,01 ± 3E ⁻⁴	2,53 ± 0,19	0,99	0,08 ± 3E ⁻³	0,57 ± 0,01
	C	0,98	5E ⁻³ ± 1E ⁻³	2,31 ± 0,45	0,98	0,04 ± 0,01	0,62 ± 0,05
RQo ^{8/}	A	0,94	0,03 ± 0,01	1,40 ± 0,33	0,96	0,16 ± 0,04	0,37 ± 0,07
	C	0,93	0,03 ± 2E ⁻³	0,73 ± 0,03	0,94	0,11 ± 3E ⁻³	0,33 ± 1E ⁻³
E ^{9/}	A	0,96	0,02 ± 0,01	1,54 ± 0,33	0,95	0,13 ± 0,03	0,41 ± 0,07
	Bs	0,97	0,01 ± 4E ⁻³	0,97 ± 0,12	0,96	0,06 ± 0,02	0,46 ± 0,06

média ± desvio padrão; ^{1/}Latossolo Amarelo; ^{2/}Argissolo Amarelo; ^{3/}Neossolo Quartzarênico Hidromórfico; ^{4/}Gleissolo Háplico; ^{5/}Neossolo Flúvico; ^{6/}Terra Preta de Índio; ^{7/}Plintossolo; ^{8/}Neossolo Quartzarênico Órtico; ^{9/}Espodossolo.

Tabela 15. Capacidade máxima de adsorção de chumbo (CMA)^{1/}, constante relacionada à energia de ligação^{1/}, K_f^{1/} e n^{1/} ajustados pelas equações de Langmuir e Freundlich respectivamente.

Amostra	Hor.	Langmuir			Freundlich		
		R ²	EL (a) (mg L ⁻¹) ⁻¹	CMA (b) (mg g ⁻¹)	R ²	k _f	n
LA ^{2/}	A	0,98	0,01 ± 1E ⁻⁴	6,09 ± 0,16	0,99	0,40 ± 4E ⁻³	0,45 ± 5E ⁻³
	Bw	0,95	0,01 ± 2E ⁻³	3,85 ± 0,99	0,99	0,08 ± 0,03	0,57 ± 0,08
PA ^{3/}	A	0,97	0,01 ± 1E ⁻³	3,68 ± 0,28	0,99	0,10 ± 0,01	0,53 ± 0,02
	Bt	0,96	0,002 ± 1E ⁻³	5,08 ± 1,62	0,99	0,03 ± 0,01	0,71 ± 0,06
RQg ^{4/}	A	0,96	0,01 ± 2E ⁻³	3,65 ± 0,23	0,99	0,22 ± 0,02	0,45 ± 0,02
	C	0,96	0,01 ± 0,01	2,44 ± 1,11	0,98	0,09 ± 0,03	0,50 ± 0,10
GX ^{5/}	A	0,98	0,05 ± 0,01	9,19 ± 0,59	0,99	1,26 ± 0,05	0,39 ± 0,02
	Cg	0,96	0,09 ± 2E ⁻³	9,68 ± 0,13	0,99	1,83 ± 0,03	0,36 ± 1E ⁻³
RY ^{6/}	A	0,92	0,11 ± 4E ⁻³	8,74 ± 0,14	0,99	2,11 ± 0,04	0,30 ± 5E ⁻³
	C	0,91	0,12 ± 2E ⁻⁴	8,76 ± 0,10	0,98	2,23 ± 0,01	0,29 ± 4E ⁻³
TPI ^{7/}	A1	0,97	1,03 ± 0,09	10,89 ± 0,13	0,97	4,28 ± 0,15	0,31 ± 0,02
	A2	0,92	0,90 ± 0,24	7,88 ± 0,42	0,97	3,31 ± 0,09	0,22 ± 0,01
	Bt	0,97	0,02 ± 2E ⁻³	4,46 ± 0,22	0,99	0,41 ± 0,02	0,40 ± 0,01
F ^{8/}	A	0,96	0,01 ± 4E ⁻⁴	6,10 ± 0,13	0,99	0,28 ± 0,02	0,49 ± 0,01
	C	0,94	0,01 ± 1E ⁻³	4,24 ± 0,41	0,99	0,17 ± 0,02	0,50 ± 0,03
RQo ^{9/}	A	0,93	0,03 ± 0,01	3,44 ± 0,43	0,99	0,47 ± 0,09	0,34 ± 0,05
	C	0,93	0,04 ± 0,01	1,51 ± 0,22	0,98	0,29 ± 0,06	0,28 ± 0,05
E ^{10/}	A	0,90	0,04 ± 0,02	2,40 ± 0,32	0,97	0,44 ± 0,10	0,30 ± 0,05
	Bs	0,97	0,02 ± 1E ⁻³	1,77 ± 0,08	0,98	0,17 ± 0,01	0,38 ± 0,02

média ± desvio padrão; ^{1/}Latossolo Amarelo; ^{2/}Argissolo Amarelo; ^{3/}Neossolo Quartzarênico Hidromórfico; ^{4/}Gleissolo Háplico; ^{5/}Neossolo Flúvico; ^{6/}Terra Preta de Índio; ^{7/}Plintossolo; ^{8/}Neossolo Quartzarênico Órtico; ^{9/}Espodossolo.

Fontes & Santos (2010) observaram que, em seis Latossolos de Minas Gerais, o ajuste para os metais Cd, Cu, Ni, Pb e Zn, as isotermas de Langmuir e Freundlich se deram de forma semelhante para os dados experimentais. Linhares et al., (2009) trabalharam com adsorção de Cd e Pb em quatro Latossolos e um Argissolo, e observaram que os resultados se ajustaram aos dois modelos estudados. Isso mostra que, os ajustes para as isotermas testadas nestes trabalhos se deram de forma semelhante aos encontrados no presente estudo.

Basílio et al., (2005) em estudos de adsorção de As, Cu, Pb e Cr observaram a ausência do patamar nas isotermas para As, dentro do intervalo de concentrações estudada e, isto indicou que o equilíbrio de adsorção de As não foi atingido.

No presente estudo, as amostras Latossolo Amarelo, horizonte Bw, com CMA igual a 5,17 mg g⁻¹ e Gleissolo Háplico, horizonte A, com CMA igual a 6,43 mg g⁻¹ foi observado que o patamar das isotermas de Cd não foi atingido. Desta forma, como o patamar não foi atingido, provavelmente o ajuste ao modelo de

Langmuir pode estar superestimando a CMA de Cd para estas amostras. E, isto está indicando que o equilíbrio de Cd não foi atingido, decorrido o tempo utilizado no ensaio de adsorção. Assim, apesar de apresentar o modelo de Langmuir apresentar um bom ajuste para os dados obtidos, a equação de Langmuir não se adequa à distribuição dos pontos obtidos, como observado no trabalho e Basílio et al. (2005).

A capacidade máxima de adsorção não guarda relação direta com a energia de ligação. Para Cd, por exemplo, o horizonte A do Gleissolo Háplico (CMA igual a $6,43 \text{ mg g}^{-1}$) é o que adsorve maiores quantidades do metal, apesar da baixa energia de ligação. O mesmo vale para Cr e Cu, em que o horizonte Cg do Gleissolo Háplico (CMA igual a $3,19 \text{ mg g}^{-1}$ para Cr e $4,58 \text{ mg g}^{-1}$ para Cu) apresenta maiores quantidades dos metais adsorvidos, com baixas energias de ligação. Isso mostra que, apesar de solo adsorver muito estes metais, ele pode facilmente desorver os metais, e que a maior parte dos sítios de adsorção é de baixa afinidade pelos elementos (Linhares et al., 2009).

Os maiores valores de energia de ligação observados neste estudo são encontrados nas amostras de TPI, nos horizontes superficiais (A1 e A2). Para Cd e Pb os valores são $0,65$ e $1,03 \text{ (mg L}^{-1}\text{)}^{-1}$, horizonte A1, e para Cr e Cu os valores são $0,35$ e $3,15 \text{ (mg L}^{-1}\text{)}^{-1}$, horizonte A2. Estes resultados mostram que os horizontes superficiais de TPI apresentam grande afinidade com os metais.

As TPIs são solos altamente férteis. Estes solos apresentam uma taxa elevada de nutrientes e matéria orgânica (Glaser & Birk, 2012). As propriedades que caracterizam estes solos podem estar contribuindo diretamente para a adsorção de Cd, Cr, Cu e Pb. A diminuição dos metais no sistema pode estar relacionada à adsorção ou complexação com o material orgânico do solo. Isto mostra que, maior parte dos sítios de adsorção apresenta grande afinidade pelos elementos. E, desta forma, o solo não desorve facilmente os metais.

A afinidade do adsorvato pelo adsorvente é dada pelo valor de n (equação de Freundlich), desta forma, quanto maior o valor de n maior será a afinidade. Elevados valores de n indicam forte interação entre o adsorvente e o adsorvato. Enquanto baixos valores de n indicam fraca interação entre o adsorvente e o adsorvato e, quanto mais baixo o valor de n maior será a heterogeneidade dos sítios de adsorção (Sposito, 2008).

Para os metais estudados observa-se que Cd e Cu apresentam forte interação entre o adsorvente e o adsorvato, ao contrário do Cr e Pb que apresentam baixa

interação. Assim, para Cr e Pb têm-se uma maior heterogeneidade dos sítios de adsorção, e para Cd e Cu a superfície adsorvente tende a se tornar homogênea.

A representação gráfica para as isotermas de Langmuir e Freundlich referente aos solos e os metais estudados são apresentados nas Figuras 2 a 17. Para melhor visualização das figuras, as amostras de solos foram separadas por horizontes e, procurou-se representar em uma mesma figura solos que apresentavam comportamento semelhante de adsorção dos metais.

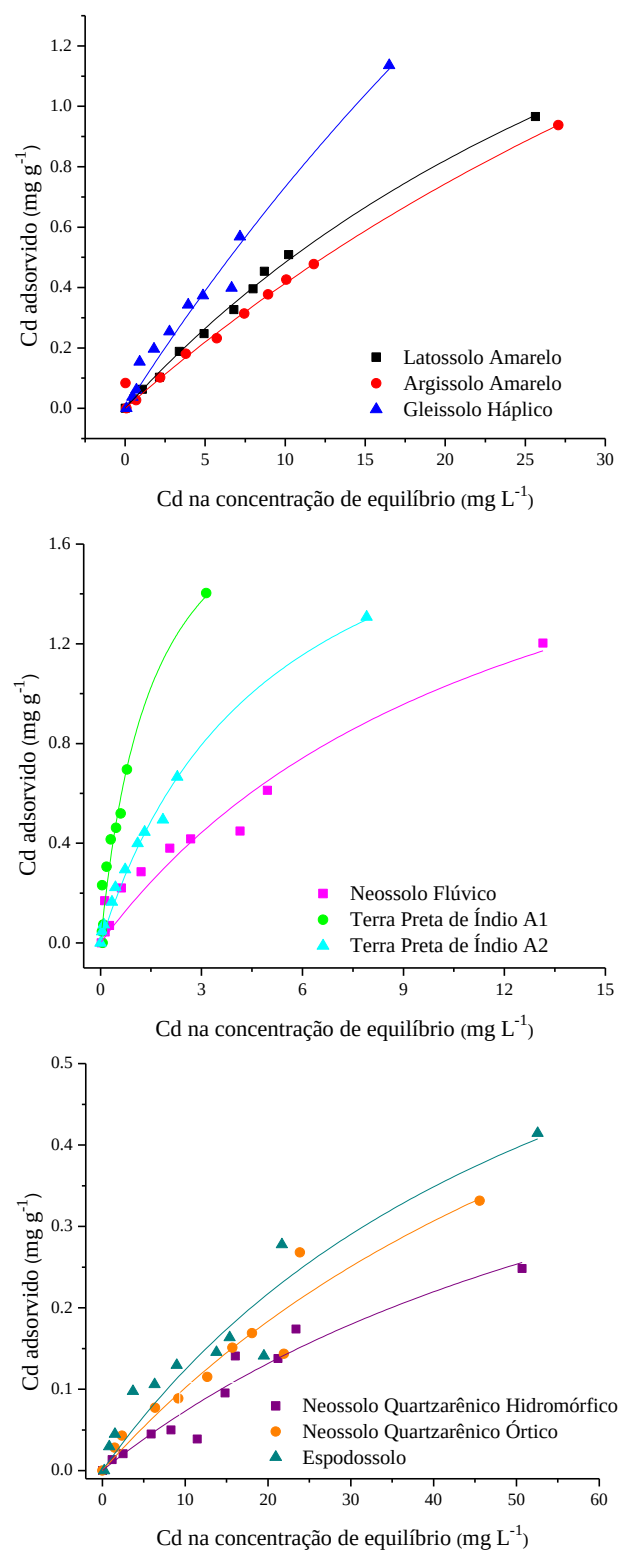


Figura 2. Isothermas de adsorção de Langmuir para o metal cádmio dos horizontes superficiais dos solos estudados.

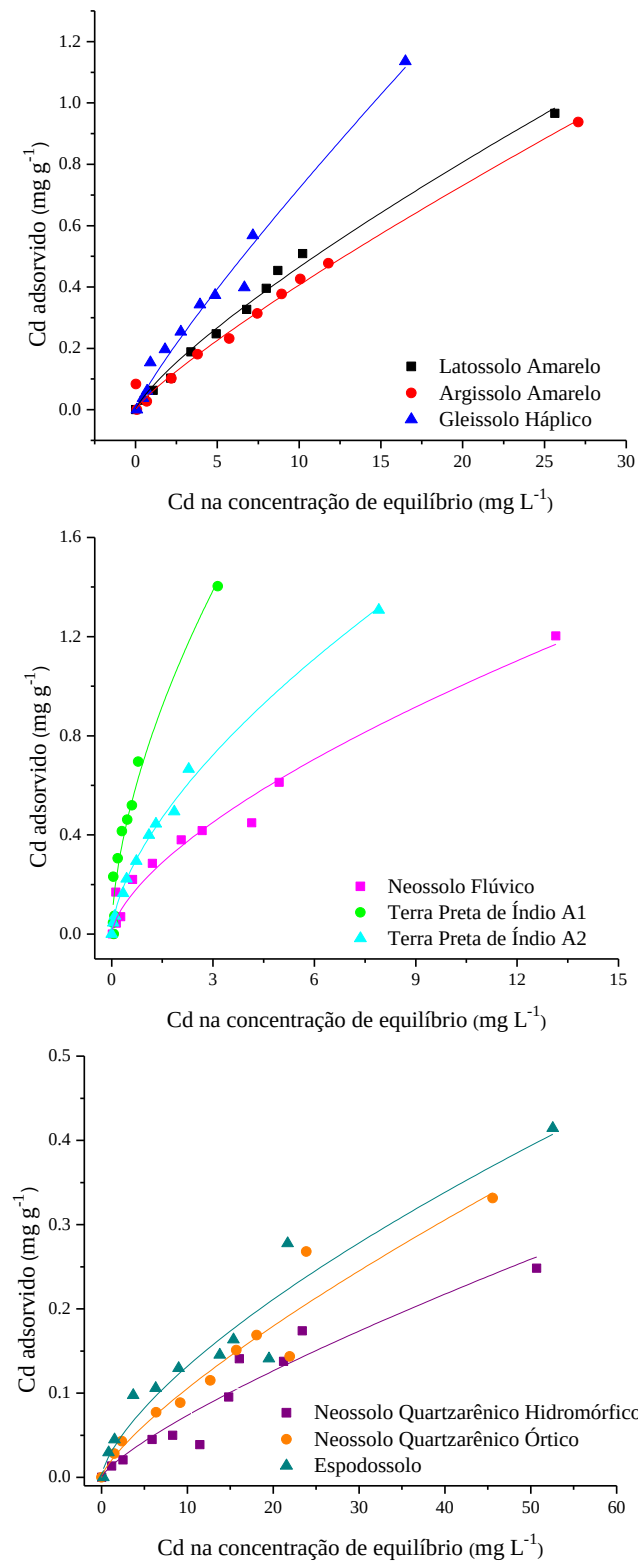


Figura 3. Isotermas de adsorção de Freundlich para o metal cádmio dos horizontes superficiais dos solos estudados.

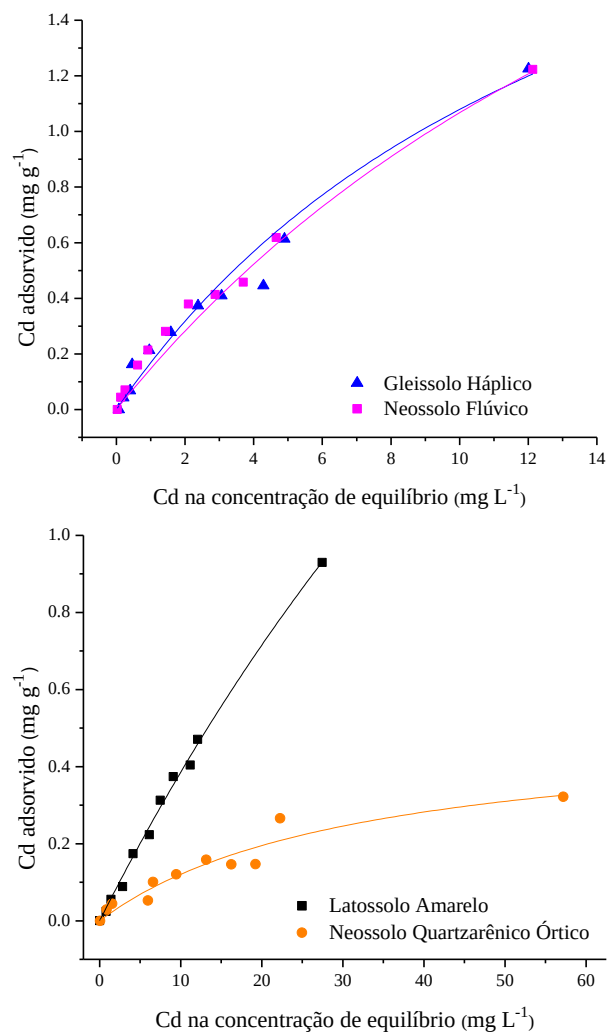


Figura 4. Isothermas de adsorção de Langmuir para o metal cádmio dos horizontes subsuperficiais dos solos estudados.

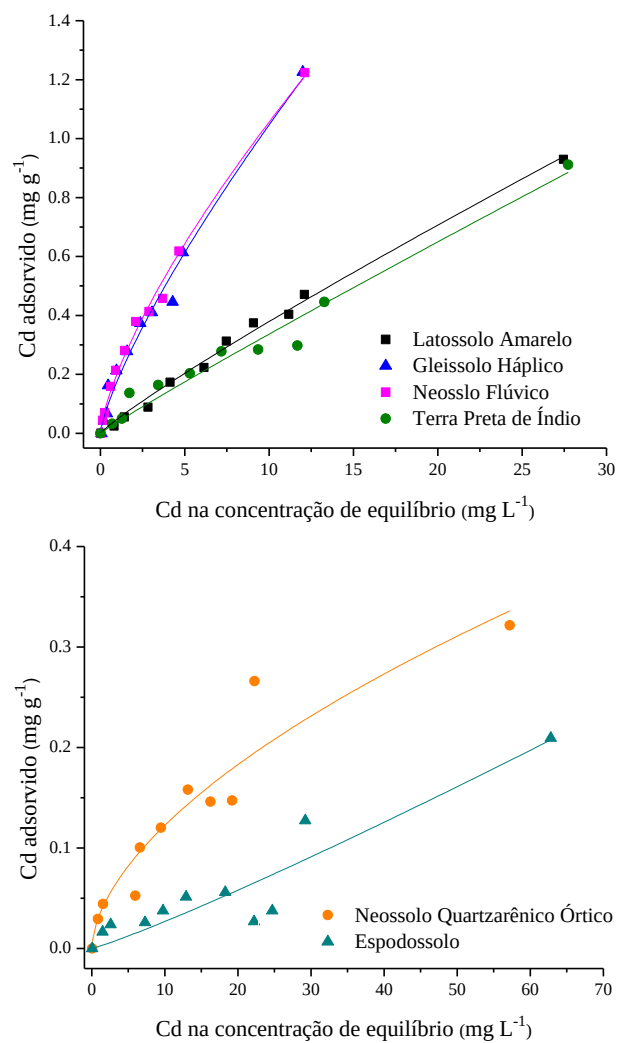


Figura 5. Isotermas de adsorção de Freundlich para o metal cádmio dos horizontes subsuperficiais dos solos estudados.

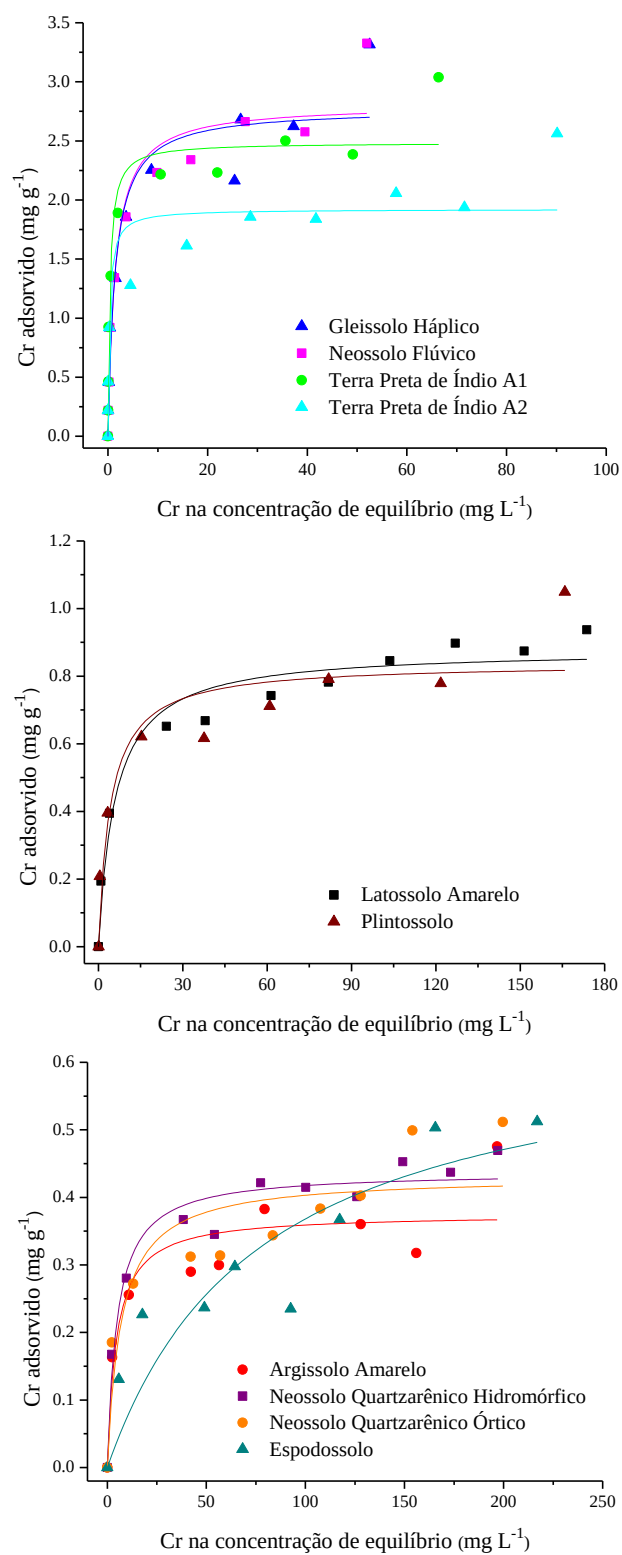


Figura 6. Isotermas de adsorção de Langmuir para o metal cromo dos horizontes superficiais dos solos estudados.

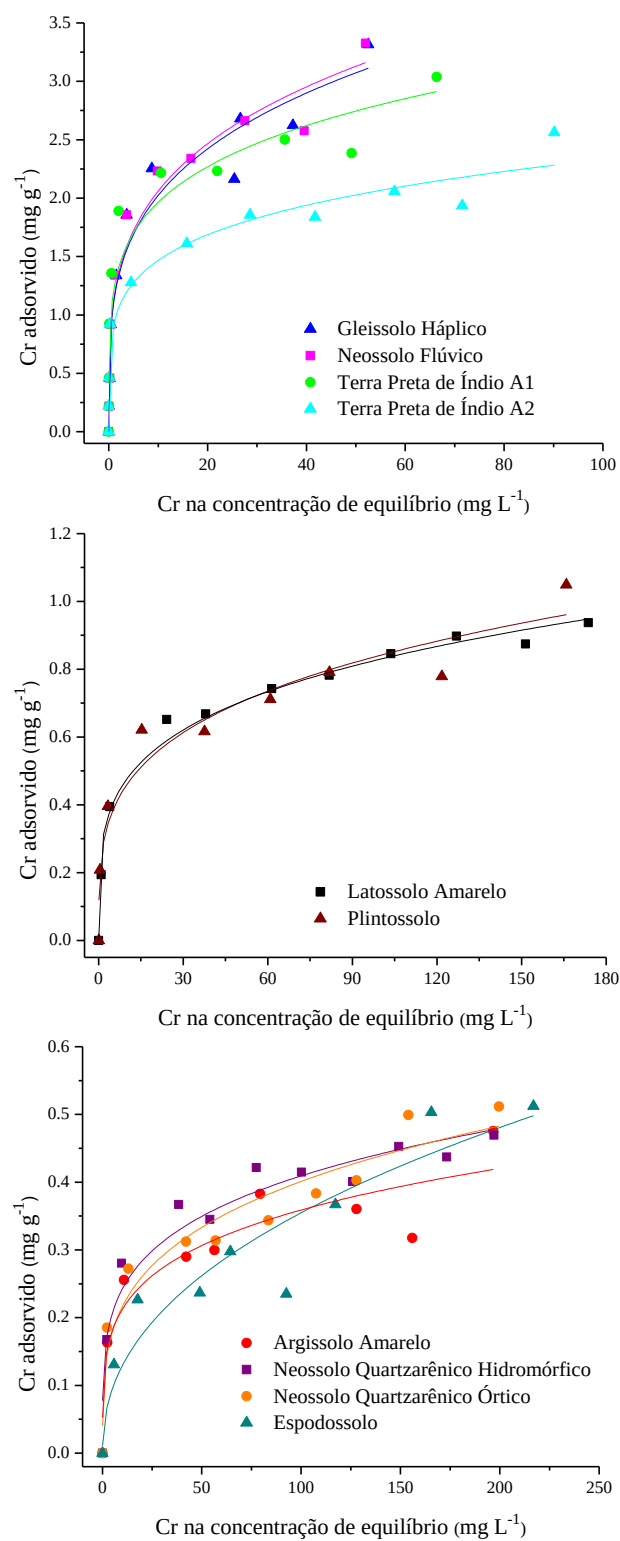


Figura 7. Isotermas de adsorção de Freundlich para o metal cromo dos horizontes superficiais dos solos estudados.

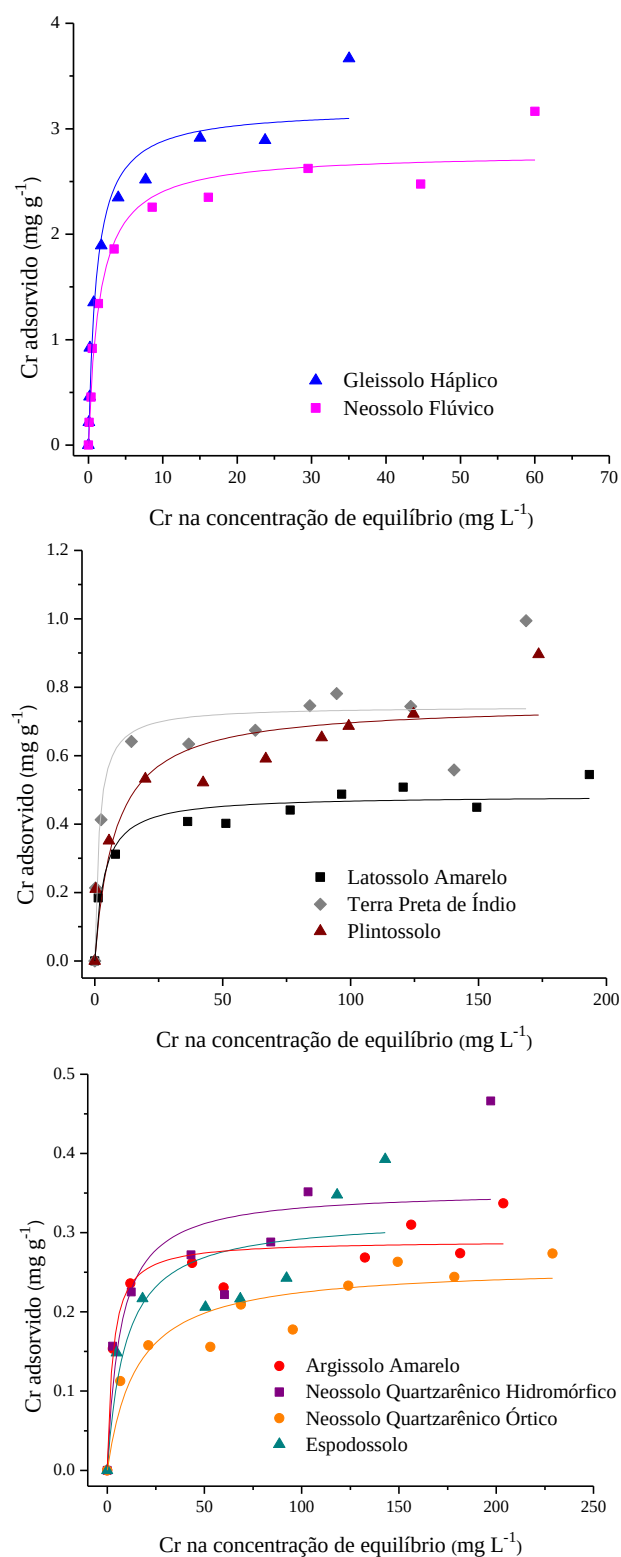


Figura 8. Isotermas de adsorção de Langmuir para o metal cromo dos horizontes subsuperficiais dos solos estudados.

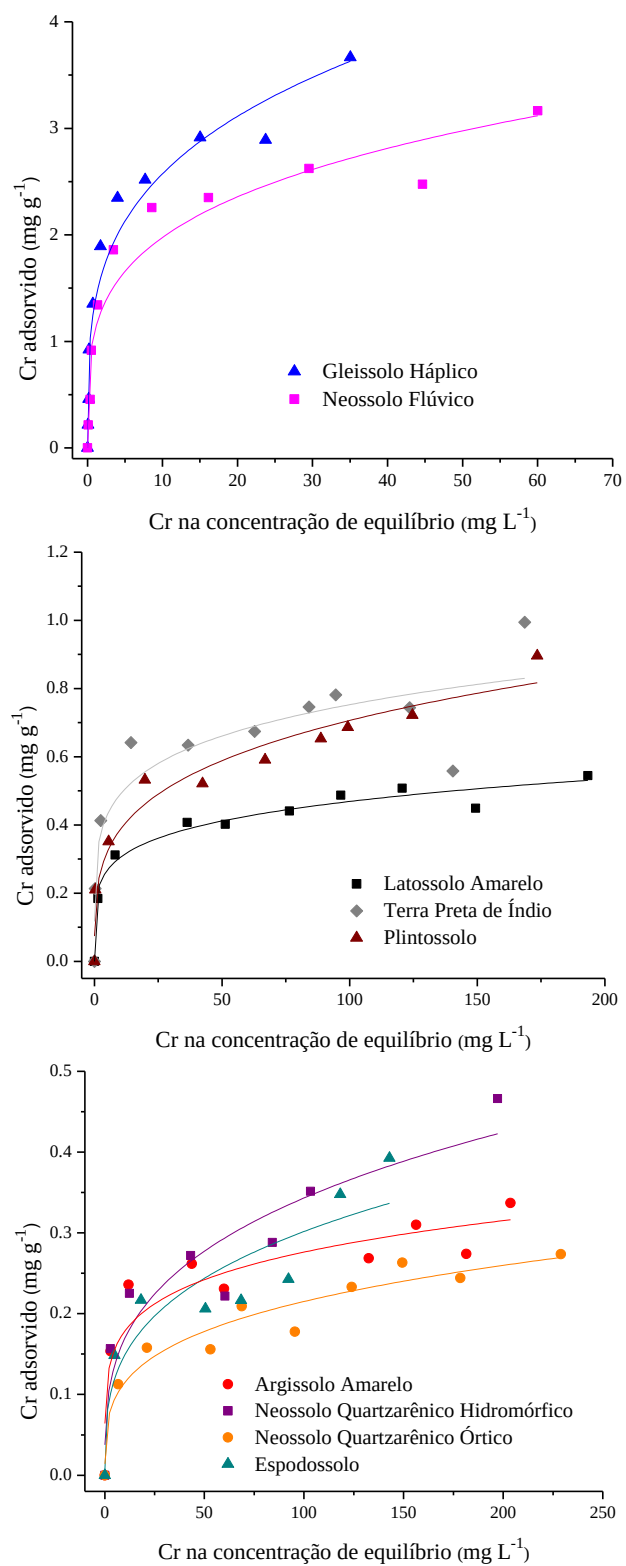


Figura 9. Isotermas de adsorção de Freundlich para o metal cromo dos horizontes subsuperficiais dos solos estudados.

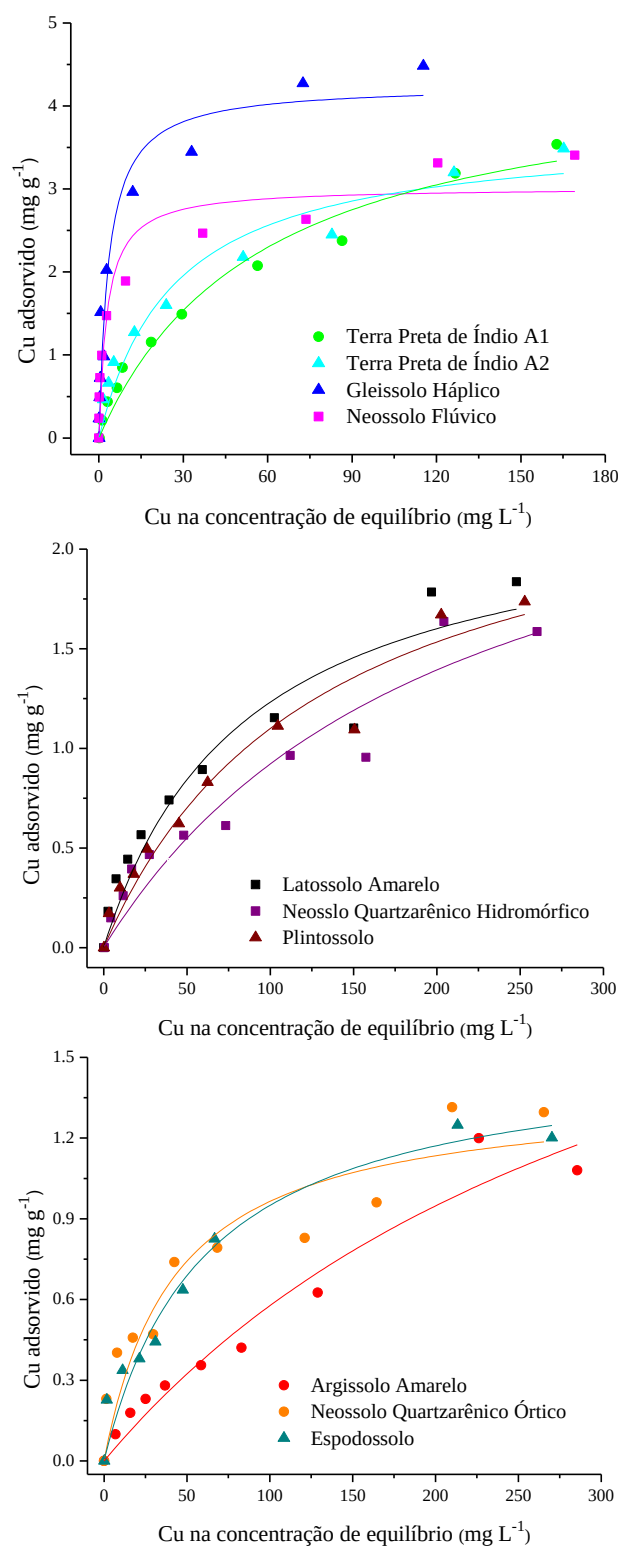


Figura 10. Isothermas de adsorção de Langmuir para o metal cobre dos horizontes superficiais dos solos estudados.

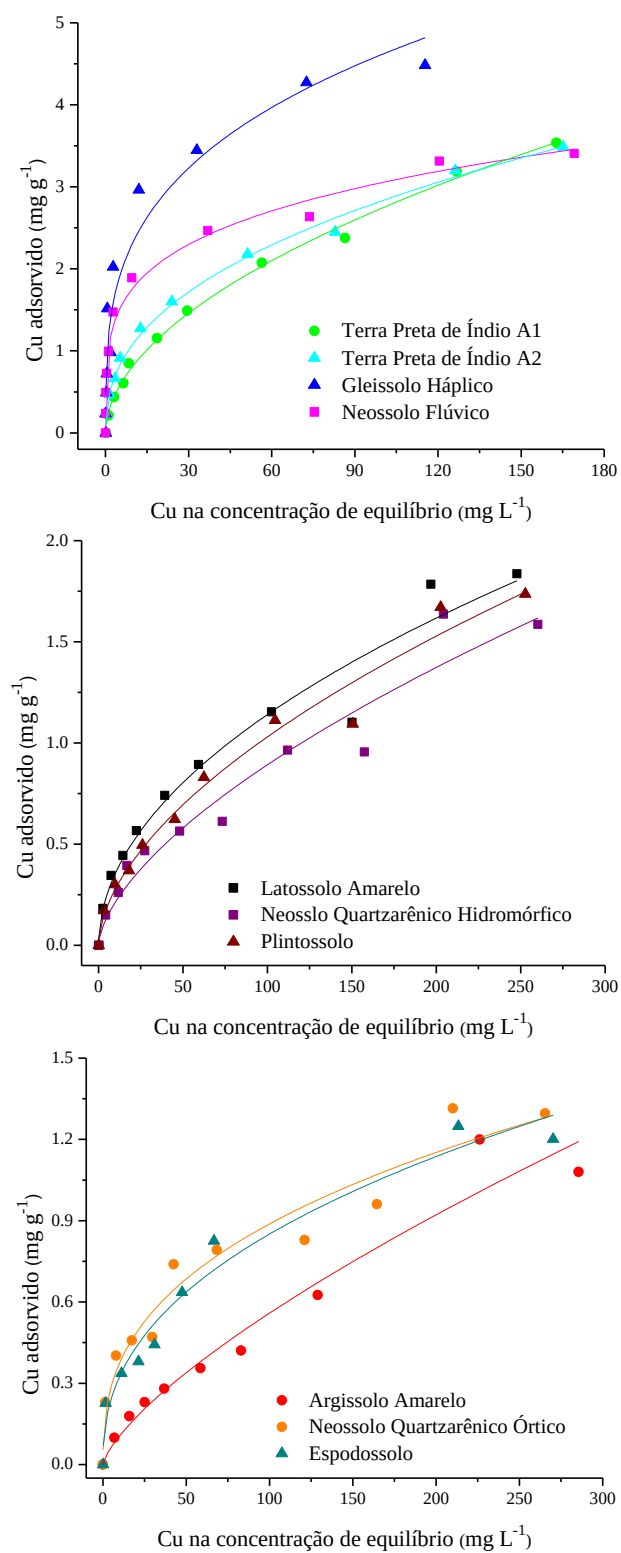


Figura 11. Isotermas de adsorção de Freundlich para o metal cobre dos horizontes superficiais dos solos estudados.

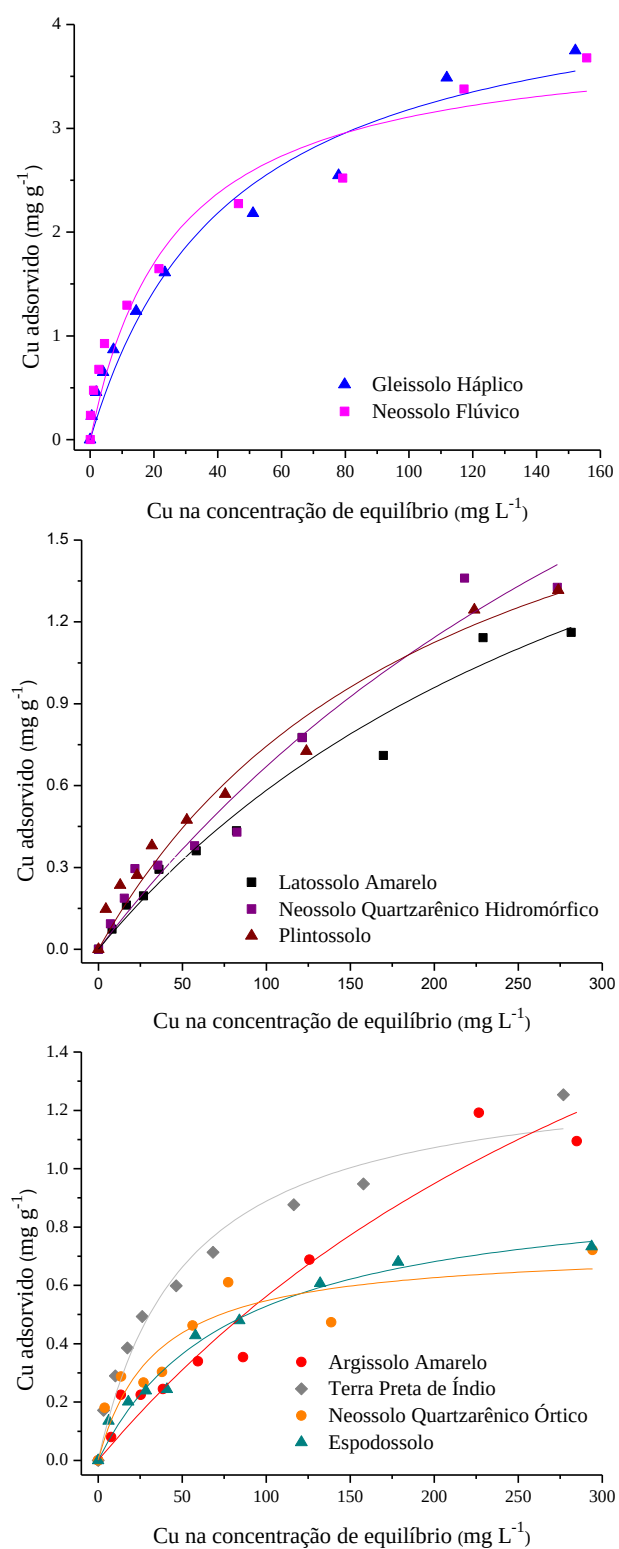


Figura 12. Isotermas de adsorção de Langmuir para o metal cobre dos horizontes subsuperficiais dos solos estudados.

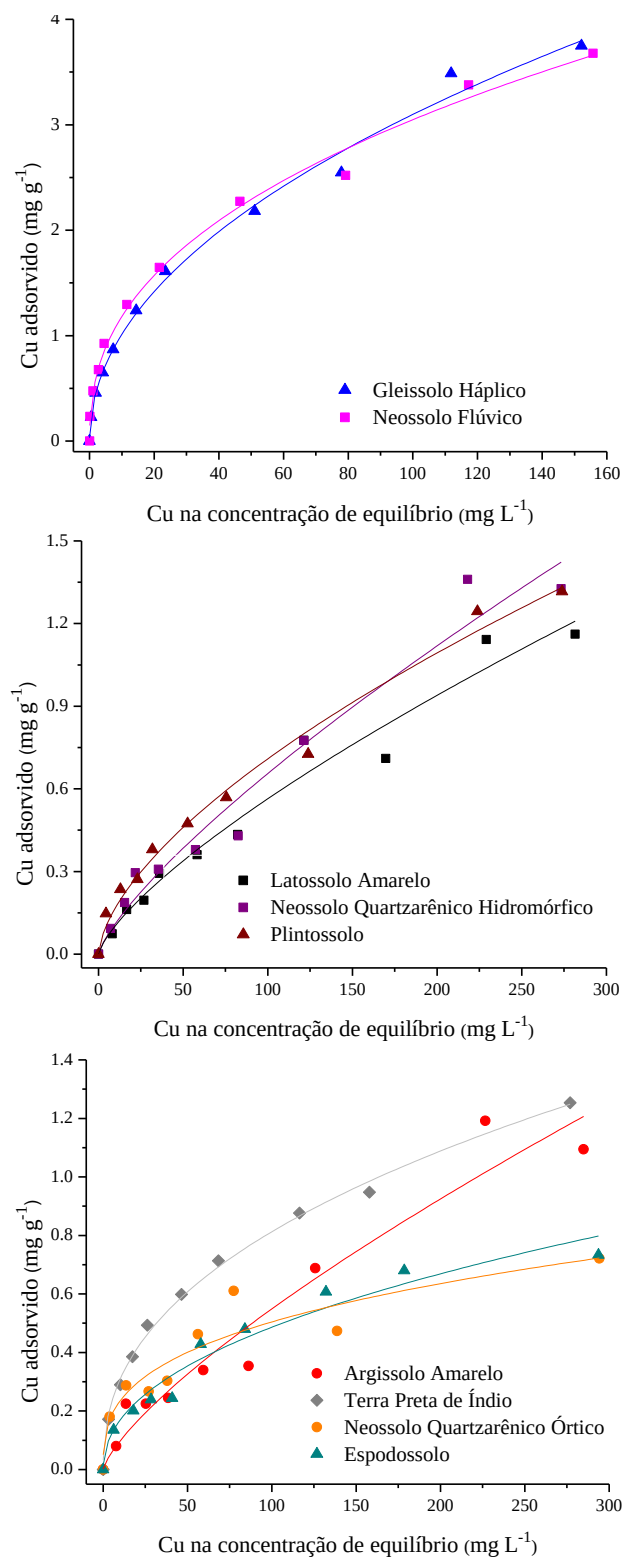


Figura 13. Isotermas de adsorção de Freundlich para o metal cobre dos horizontes subsuperficiais dos solos estudados.

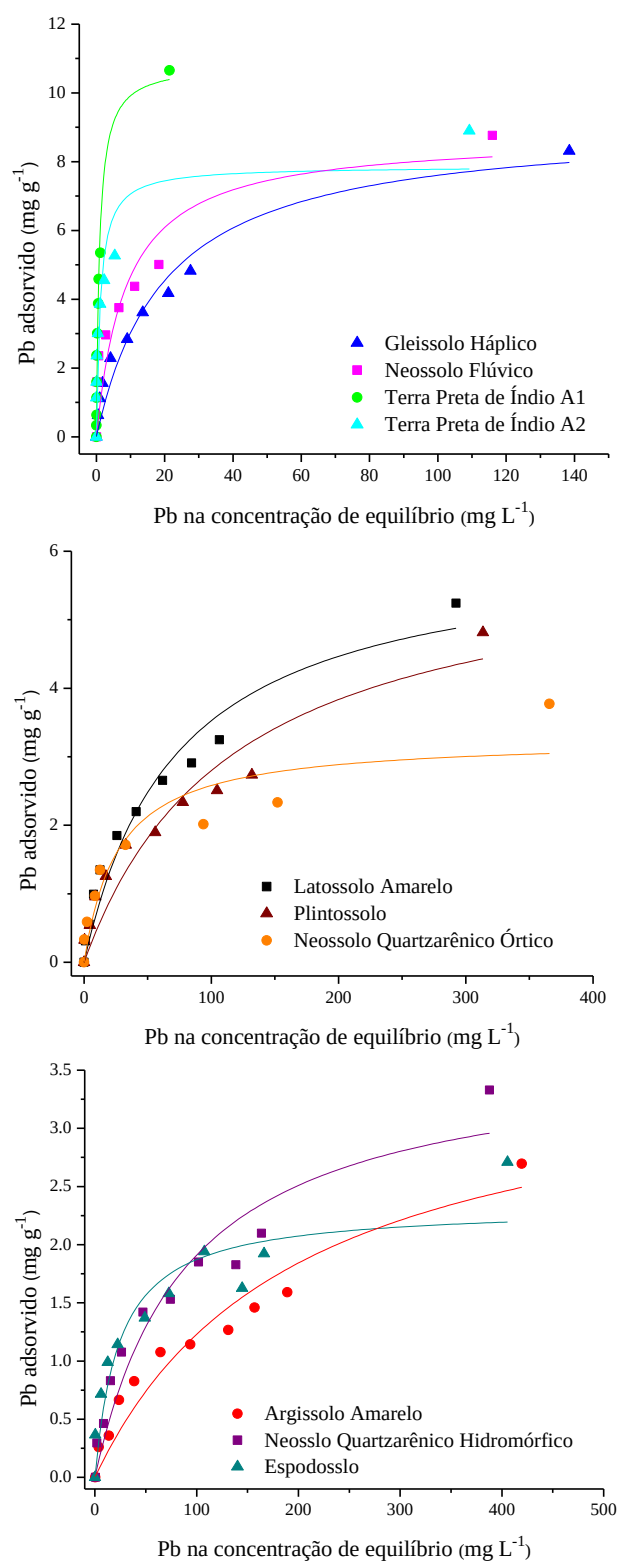


Figura 14. Isotermas de adsorção de Langmuir para o metal chumbo dos horizontes superficiais dos solos estudados.

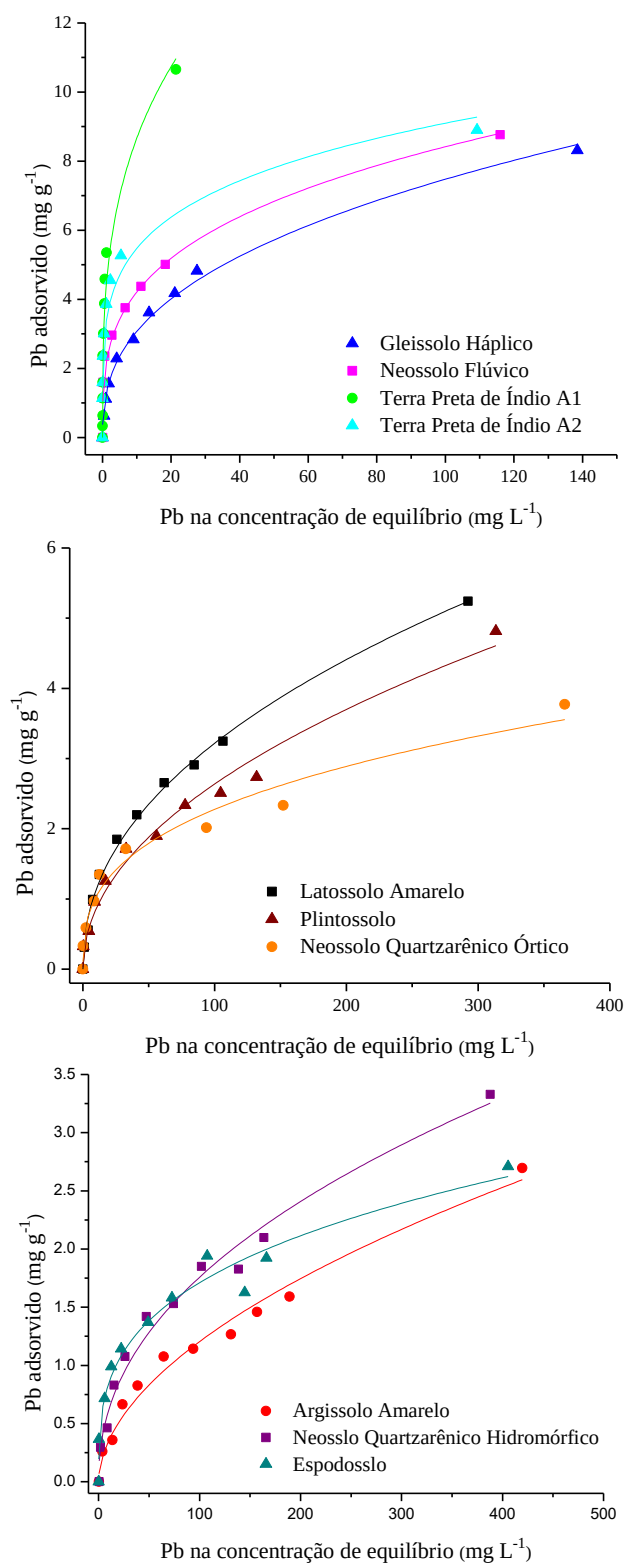


Figura 15. Isotermas de adsorção de Freundlich para o metal chumbo dos horizontes superficiais dos solos estudados.

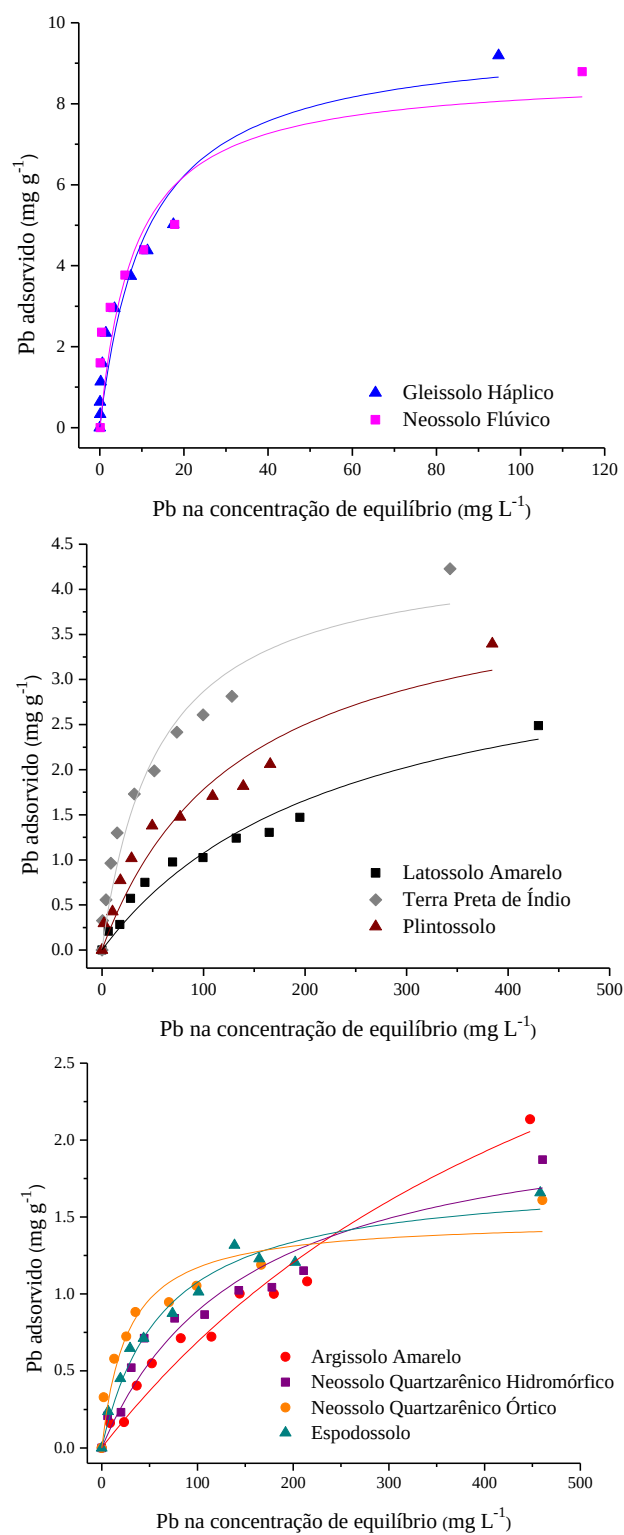


Figura 16. Isotermas de adsorção de Langmuir para o metal chumbo dos horizontes subsuperficiais dos solos estudados.

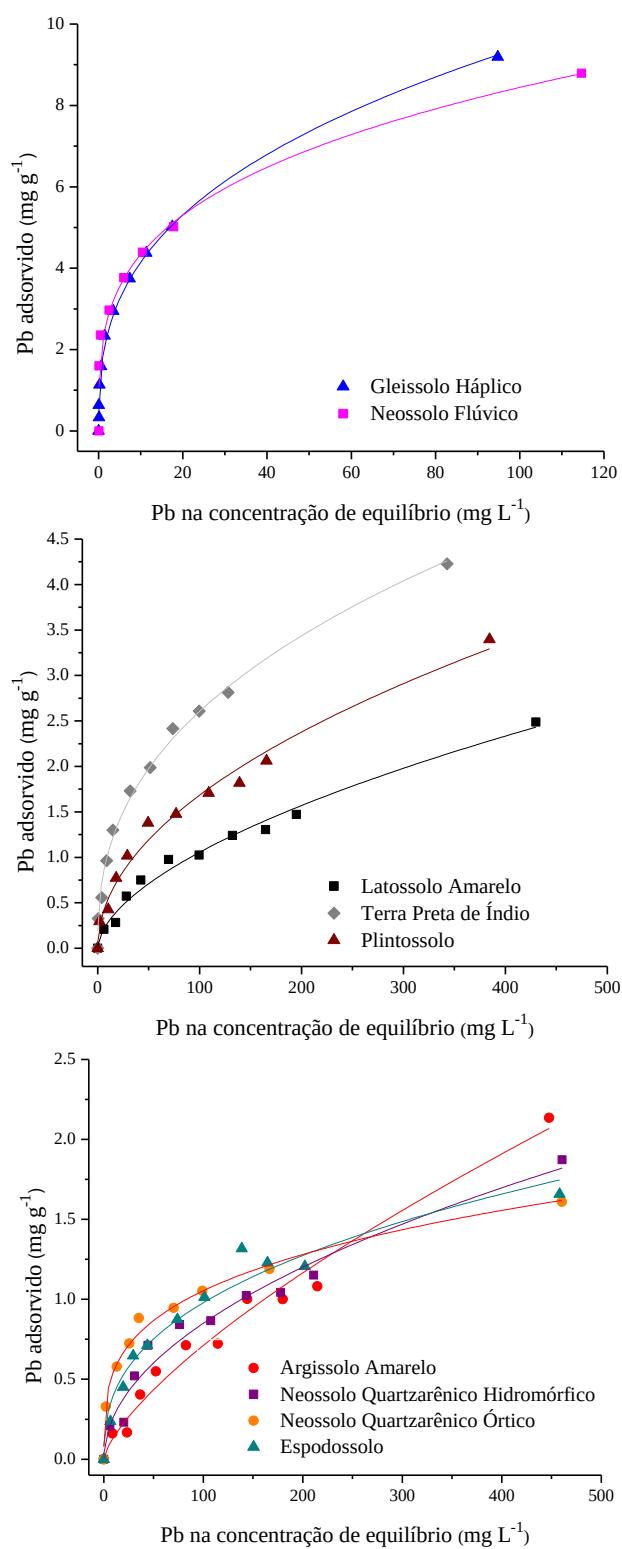


Figura 17. Isotermas de adsorção de Freundlich para o metal chumbo dos horizontes subsuperficiais dos solos estudados.

Os gráficos mostram que para as concentrações iniciais a maior parte da solução adicionada contendo os metais foi adsorvida, evidenciando a forte afinidade dos constituintes dos solos para com os metais Cd, Cr, Cu e Pb principalmente quando estão em menores concentrações no meio. A inclinação das curvas de adsorção mostraram que o aumento da adsorção dos metais Cd, Cr, Cu e Pb foram maiores quando as concentrações dos metais eram mais baixas.

Em contrapartida, à medida que a concentração dos metais aumentou, menores foram as quantidades de metais adsorvidas, indicando possível saturação dos sítios de adsorção, como abordado por Fontes & Gomes (2003), Silveira & Alleoni (2003) e Pierangeli et al. (2007).

A isoterma do tipo L foi predominante para todos os metais e solos analisados, o que é um indício de alta afinidade entre a fase sólida do solo pelo soluto a baixas concentrações. As amostras descritas por este formato de isoterma pode ser observado principalmente para Cr, Cu e Pb (figuras 6 a 17).

Isotermas do tipo H também foram observadas. Estas isotermas descrevem fenômenos de adsorção de alta afinidade, que por sua vez estão relacionados com sítios altamente energéticos. A inclinação inicial, maior do que a isoterma do tipo L sugere grande afinidade do solo pelos íons, usualmente produzida por mecanismos de adsorção do tipo esfera interna (Lopes, 2009). Foram observadas isotermas do tipo H para os metais em estudos nas seguintes situações: Cd – amostra TPI, horizonte A1 (Figuras 2 e 3) e Pb – amostra TPI, horizonte A1 (Figuras 14 e 15). Novamente, a alta afinidade entre o adsorvente e o adsorvato pode estar relacionada com as características da TPI, em que os sítios de adsorção apresentam grande afinidade pelos elementos.

5.2 Relações entre os coeficientes das isotermas de Langmuir e Freundlich com as características dos solos

A seguir são apresentadas as correlações lineares da matriz de correlação de Pearson, entre areia grossa + areia fina (AG+AF), silte, argila, CTC_{ef}, P, matéria orgânica (MO), Ferro extraído por ditionito (Fe_d), Ferro extraído por oxalato (Fe_o), Alumínio extraído por ditionito (Al_d), Alumínio extraído por oxalato (Al_o) e os coeficientes EL e CMA da isoterma de Langmuir e K_f e n da isoterma de Freundlich.

Foram consideradas todas as amostras (solos), amostras do horizonte superficial e amostras do horizonte subsuperficial, para os grupos I e II, para os metais cádmio (Tabela 16), cromo (Tabela 17), cobre (Tabela 18) e chumbo (Tabela 19). Para as correlações observadas neste trabalho, relativamente baixas, se devem provavelmente às características muito contrastantes entre os nove solos utilizados neste trabalho.

Para Cd foi observado correlações negativas entre a fração areia e a EL ($r = -0,87^*$), CMA ($r = -0,98^{**}$) e K_f ($r = -0,94^{**}$) para todas as amostras de solo do grupo I, e correlação positiva entre CMA e a fração silte ($r = 0,98^{***}$). Para este metal houve ainda correlações significativas entre CMA e a CTC_{ef} ($r = 0,98^{**}$), K_f e Fe_d ($r = 0,99^{***}$) e Fe_o ($r = 0,99^{***}$) para as amostras de solo, grupo I. No horizonte A houve correlação significativa entre K_f e Fe_d ($r = 0,99^{***}$) e Fe_o ($r = 0,99^{***}$). Para o grupo II houve correlação positiva entre EL e Al_d, para todas as mostras de solo. Nos horizontes subsuperficiais o número de informações para este metal foi insuficiente para realização do estudo de correlação (Tabela 16).

A matéria orgânica contribui de forma significativa para adsorção de metais pesados no solo, pois ela aumenta densidade superficial de cargas negativas. Neste estudo não foi observado correlação entre o teor de matéria orgânica, e os coeficientes das isotermas de Langmuir e Freundlich para Cd.

Braz (2011) trabalhou com adsorção de metais pesados em solos paraenses utilizando a equação de Freundlich, e não observou correlação entre a matéria orgânica e os parâmetros das isotermas de Freundlich para os metais Cd, Co, Cu, Hg, Pb e Zn. Somente Cr e Ni apresentaram correlações entre os parâmetros de Freundlich e o teor de matéria orgânica.

Lopes (2009), trabalhando com adsorção de Cd, Cu, Ni e Zn, apenas observou correlação entre a CMA e matéria orgânica para Cu. Este autor explica que a falta de correlação com os demais metais se deve principalmente pelo baixo pH dos solos estudados, fato que pode não ter favorecido a disponibilização das cargas negativas da matéria orgânica. Desta forma, a matéria orgânica do conjunto de solos estudados pode não ter expressado todo o seu potencial de aumento da CTC_{ef}.

Tabela 16. Matriz de correlação entre areia grossa + areia fina (AG+AF), silte, argila, CTC_{ef}, P, matéria orgânica (MO), Ferro extraído por ditionito (Fe_d), Ferro extraído por oxalato (Fe_o), Alumínio extraído por ditionito (Al_d), Alumínio extraído por oxalato (Al_o) e os coeficientes EL e CMA da isoterma de Langmuir e K_f e n da isoterma de Freundlich para Cd, considerando todas as amostras (solos), amostras do horizonte superficial e amostras do horizonte subsuperficial, para os dois grupos I e II.

(continuação)									
Variáveis	Langmuir		Freundlich		Variáveis	Langmuir		Freundlich	
	EL	CMA	K _f	n		EL	CMA	K _f	n
Solos (Grupo I)					Solos (Grupo II)				
AG+AF	-0,87*	-0,98**	-0,94**	-0,36	AG+AF	0,49	-0,56	0,48	-0,50
Silte	0,89*	0,98***	0,95**	0,27	Silte	-0,27	0,44	-0,09	0,07
Argila	0,62	0,79	0,74	0,63	Argila	-0,31	0,18	-0,45	0,50
CTC _{ef}	0,89*	0,98***	0,94**	0,26	CTC _{ef}	0,20	-0,01	0,37	-0,39
P	0,85*	0,97**	0,91*	0,27	P	0,59	-0,60	0,43	-0,35
MO	-0,35	-0,21	-0,28	0,24	MO	0,47	-0,49	0,47	-0,56
Fe _d	0,96**	0,94**	0,99***	0,12	Fe _d	0,81*	-0,74	0,69	-0,56
Fe _o	0,96**	0,95**	0,99***	0,16	Fe _o	0,03	0,38	0,13	-0,08
Al _d	0,71	0,89*	0,78	0,38	Al _d	0,87**	-0,66	0,62	-0,44
Al _o	0,50	0,70	0,64	0,70	Al _o	-0,01	0,39	0,09	-0,07
Horizonte Superficial (Grupo I)					Horizonte Superficial (Grupo II)				
AG+AF	-0,86	-0,94	-0,93	-0,01	AG+AF	0,41	-0,59	0,42	-0,49
Silte	0,93	0,97*	0,98*	-0,13	Silte	-0,29	0,86	-0,29	0,51
Argila	0,53	0,70	0,65	0,42	Argila	-0,26	-0,18	-0,29	0,10
CTC _{ef}	0,97*	0,98*	0,99*	-0,26	CTC _{ef}	0,43	0,29	0,45	-0,21
P	0,96*	0,98*	0,99**	-0,23	P	0,54	-0,56	0,68	-0,84
MO	-0,76	-0,84	-0,83	-0,13	MO	0,37	-0,49	0,31	-0,34
Fe _d	0,97*	0,97*	0,99**	-0,24	Fe _d	0,87	-0,70	0,94*	-0,97**
Fe _o	0,95*	0,98*	0,99**	-0,20	Fe _o	-0,07	0,58	0,01	0,11
Al _d	0,87	0,93	0,93	-0,02	Al _d	0,85	-0,67	0,93*	-0,96*
Al _o	0,40	0,62	0,54	0,56	Al _o	-0,13	0,66	-0,03	0,10

*, ** e *** Significativo a 5%, 1% e 0,1%, respectivamente, pelo teste t.

Alleoni et al. (2005) observaram para horizontes A de solos tropicais, correlação positiva entre a adsorção máxima de Cd com os teores de argila, silte, óxidos de ferro bem cristalizados e alumínio extraído pelo ataque sulfúrico, e correlação negativa com o teor de areia. Os autores ainda afirmam que esta correlação positiva entre o metal e o teor de argila foi favorecida pela mineralogia semelhante dos solos, com predominância de caulinita e gibssita na fração argila.

A mineralogia dos solos neste trabalho, com a presença de caulinita em praticamente todas as frações pode ser relacionada com a correlação positiva entre a fração silte e a CMA, como abordado no trabalho de Alleoni et al. (2005).

Dias et al. (2001) estudando adsorção de Cd em Latossolos ácricos e Nitossolos, observaram que a disponibilidade de Cd na solução do solo se dá em função do pH, ou seja,

quanto maior o valor de pH menor a disponibilidade de Cd no solo. Esses autores ainda observaram que os solos apresentam correlação positiva entre os parâmetros da equação de Langmuir e a matéria orgânica, a CTC, a superfície específica, o teor de argila, a retenção de cátion, a quantidade de cargas negativas permanentes e variáveis. Estes atributos do solo apresentaram-se estreitamente relacionados com a CTC dos solos e, assim, o incremento em qualquer um destes atributos acarretaria no incremento da CTC e, conseqüentemente no aumento da capacidade de adsorção de cádmio.

O horizonte A do Gleissolo Háplico apresentou maior CMA de Cd ($6,43 \text{ mg g}^{-1}$). Neste solo a esmectita é um mineral que está presente na fração argila. Este mineral apresenta alta CTC. Apesar de não ter sido observado correlação entre a CMA e a fração argila, levando em consideração que a CTC está diretamente relacionada com a superfície específica e com o teor de argila dos solos, o incremento desses atributos acarreta o aumento na CTC e, conseqüentemente influencia na dinâmica de adsorção dos metais pesados (Alleoni et al., 2005).

Não existe um significado físico para as constantes K_f e n da isoterma de Freundlich. Para Cd, o coeficiente K_f , que indica a capacidade do solo em reter um soluto, apresentou correlação positiva com Fe_d e Fe_o . Apesar dos valores encontrados para Fe_d e Fe_o serem considerados baixos em função da menor participação de ferro no material de origem dos solos, a presença de hematita e goethita (óxidos de ferro com estrutura cristalina bem definida), a exceção das amostras RQg, GX e RY, podem estar contribuindo para a adsorção de Cd. Vale destacar que, capacidade de adsorção de determinado óxido ou argilomineral depende do seu grau de cristalinidade, que é variável em função da idade e condições ambientais de sua formação, além do tamanho e a morfologia dos cristais (Pierangeli et al., 2001).

O Cr apresentou correlações significativas negativas entre a EL e a fração areia ($r = -0,96^{***}$), e positivas entre CMA e a fração silte ($r = 0,96^{***}$), CTC_{ef} ($r = 0,96^{***}$), Fe_d ($r = 0,99^{***}$) e Fe_o ($r = 0,99^{***}$), para K_f correlações positivas significativas com as mesmas variáveis, nas amostras de solo, grupo I. No horizonte superficial a EL e a CMA apresentaram correlações significativas com a CTC_{ef} ($0,99^{**}$), P ($r = 0,99^{**}$), Fe_d ($r = 0,99^{**}$) e Fe_o ($r = 0,99^{**}$). Para o horizonte subsuperficial a CMA e K_f apresentaram correlações significativas com P ($r = 0,99^{***}$), Fe_d ($r = 0,99^{***}$) e Fe_o ($r = 1,00^{**}$) (Tabel 17).

Tabela 17. Matriz de correlação entre areia grossa + areia fina (AG+AF), silte, argila, CTC_{ef}, P, matéria orgânica (MO), Ferro extraído por ditionito (Fe_d), Ferro extraído por oxalato (Fe_o), Alumínio extraído por ditionito (Al_d), Alumínio extraído por oxalato (Al_o) e os coeficientes EL e CMA da isoterma de Langmuir e K_f e n da isoterma de Freundlich para Cr, considerando todas as amostras (solos), amostras do horizonte superficial e amostras do horizonte subsuperficial, para os dois grupos I e II.

(continuação)									
Variáveis	Langmuir		Freundlich		Variáveis	Langmuir		Freundlich	
	EL	CMA	K _f	n		EL	CMA	K _f	n
Solos (Grupo I)					Solos (Grupo II)				
AG+AF	-0,96***	-0,94***	-0,95***	0,40	AG+AF	0,30	-0,36	-0,28	-0,30
Silte	0,95***	0,96***	0,97***	-0,37	Silte	-0,03	0,78**	0,69*	0,65*
Argila	0,71*	0,61	0,63	-0,39	Argila	-0,33	-0,45	-0,45	-0,38
CTC _{ef}	0,93**	0,96***	0,96***	-0,32	CTC _{ef}	0,42	0,97***	0,94***	0,38
P	0,90**	0,93**	0,93**	-0,34	P	0,76**	0,32	0,40	-0,48
MO	-0,05	0,001	-0,07	0,32	MO	0,33	0,24	0,25	0,06
Fe _d	0,97***	0,99***	0,99***	-0,35	Fe _d	0,30	0,14	0,13	0,21
Fe _o	0,98***	0,99***	0,99***	-0,35	Fe _o	0,41	0,70*	0,69*	0,09
Al _d	0,80*	0,82*	0,82*	-0,35	Al _d	0,49	0,04	0,09	-0,19
Al _o	0,07	-0,01	0,03	-0,12	Al _o	0,44	0,56	0,57	-0,09
Horizonte Superficial (Grupo I)					Horizonte Superficial (Grupo II)				
AG+AF	-0,98*	-0,94	-0,97*	0,43	AG+AF	0,34	-0,36	-0,20	-0,53
Silte	0,97*	0,98*	0,99**	-0,33	Silte	-0,18	0,61	0,48	0,42
Argila	0,84	0,67	0,75	-0,63	Argila	-0,29	-0,23	-0,30	0,27
CTC _{ef}	0,95	0,99**	0,99**	-0,25	CTC _{ef}	0,47	0,98**	0,94**	-0,23
P	0,96*	0,99**	0,99**	-0,28	P	0,98**	0,58	0,67	-0,83*
MO	-0,96*	-0,84	-0,91	0,61	MO	0,09	0,09	0,10	-0,18
Fe _d	0,96*	0,99**	0,99**	-0,29	Fe _d	0,57	0,24	0,31	-0,31
Fe _o	0,97*	0,99**	0,99**	-0,30	Fe _o	0,30	0,85*	0,76	0,01
Al _d	0,99*	0,94	0,97*	-0,46	Al _d	0,69	0,33	0,41	-0,45
Al _o	0,74	0,58	0,65	-0,59	Al _o	0,39	0,80	0,75	-0,15
Horizonte Subsuperficial (Grupo I)					Horizonte Subsuperficial (Grupo II)				
AG+AF	-0,99*	-0,98*	-0,97*	0,67	AG+AF	-0,62	-0,66	-0,67	-0,30
Silte	0,99**	0,99**	0,99**	-0,78	Silte	0,73	0,98**	0,96**	0,83
Argila	0,61	0,56	0,54	-0,06	Argila	-0,28	-0,55	-0,51	-0,69
CTC _{ef}	0,99**	0,99**	0,99**	-0,78	CTC _{ef}	0,87	0,98**	0,99**	0,64
P	0,99**	0,99***	0,99***	-0,78	P	0,43	0,02	0,05	-0,29
MO	0,36	0,29	0,28	0,17	MO	0,34	0,35	0,39	-0,04
Fe _d	0,99**	0,99**	0,99***	-0,79	Fe _d	-0,13	0,09	0,02	0,58
Fe _o	0,99**	1,00***	1,00***	-0,77	Fe _o	0,90*	0,65	0,68	0,18
Al _d	0,99**	0,99**	0,97**	-0,75	Al _d	-0,21	-0,32	-0,36	-0,04
Al _o	-0,17	-0,18	-0,18	0,49	Al _o	0,49	0,01	0,06	-0,46

*, ** e *** Significativo a 5%, 1% e 0,1%, respectivamente, pelo teste t.

No grupo II, para Cr houve correlações entre CMA e a CTC_{ef} ($r = 0,97***$) e K_f e a CTC_{ef} ($r = 0,94***$), para todas amostras de solo. No horizonte A houve correlação entre CMA e a CTC_{ef} ($r = 0,98**$), K_f e a CTC_{ef} ($r = 0,94**$) e EL e P ($r = 0,98**$). Para o subsuperficial foi observado correlação positiva entre a CMA e a fração silte ($r = 0,98**$) e CTC_{ef} ($r = 0,98**$) e para K_f correlações positivas significativas com as mesmas variáveis (Tabela 17).

Soares (2004) estudando adsorção dos metais pesados, Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb e Zn, em solos do estado de São Paulo, correlacionou o coeficiente de distribuição (K_d) com os atributos do solo e, para o Cr, observou correlações positivas com o teor de argila, Fe_d , Fe_o , Al_o e CTC_{ef} . Gomes et al. (2001) avaliaram a sequência de seletividade de metais pesados (Cd, Cr, Cu, Ni, Pb e Zn) em solos brasileiros e, para Cr observaram que houve correlação positiva entre o K_d e o pH, a CTC_{ef} e a $CTC_{pH7,0}$.

Bradl (2004) expõe que muitos fatores controlam grande parte dos processos de separação de Cr entre o meio sólido e aquoso dos solos, dentre eles tem-se: pH, os minerais dos solos, o estado de oxidação, entre outros. Ele afirma que a adsorção de Cr pode aumentar ou diminuir em função da variação do pH e do teor de matéria orgânica no solo. Os óxidos de Fe, Al e Mn, minerais de argila, caulinita e montmorilonita exibem forte afinidade para adsorção de Cr.

No presente estudo foi observada uma forte interação entre a CMA e os óxidos de ferro bem cristalizados e mal cristalizados. Neste caso, tem-se como a mineralogia do solo esta exibindo forte influência na adsorção de Cr.

Para Cu houve correlação positiva entre a CMA e a fração argila ($r = 0,99***$). A K_f apresentou correlações significativas entre a CTC_{ef} ($r = 0,96***$), Fe_d ($r = 0,95***$) e Fe_o ($r = 0,94***$), para todas as amostras de solo do grupo I. No grupo II, foi observada correlação entre CMA e CTC_{ef} ($r = 0,87**$), para todas as amostras de solo. No horizonte A houve correlação entre a EL e P ($r = 0,96**$) e a CMA e CTC_{ef} ($r = 0,98**$). Para o horizonte subsuperficial, grupo II, a correlação significativa foi entre EL e Fe_o ($r = 0,98**$) (Tabela 18).

Moreira (2004) observou correlação positiva entre a CMA de Cu e o conteúdo de manganês, o pH e a CTC que evidencia que a adsorção específica seria o mecanismo preferencial de retenção de Cu. Neste trabalho foi observada ainda correlação negativa com a fração areia do solo.

Neste estudo também foi observado correlação negativa com a CMA e a K_f com a fração areia ($r = -0,79*$ e $r = -0,88**$, respectivamente), em concordância com o observado no trabalho de Morreira (2004). É esperada a correlação negativa com a fração areia, visto que esta é a fração mais grosseira do solo e que pouco ou nada contribui com cargas de superfície.

Tabela 18. Matriz de correlação entre areia grossa + areia fina (AG+AF), silte, argila, CTC_{ef}, P, matéria orgânica (MO), Ferro extraído por ditionito (Fe_d), Ferro extraído por oxalato (Fe_o), Alumínio extraído por ditionito (Al_d), Alumínio extraído por oxalato (Al_o) e os coeficientes EL e CMA da isoterma de Langmuir e K_f e n da isoterma de Freundlich para Cu, considerando todas as amostras (solos), amostras do horizonte superficial e amostras do horizonte subsuperficial, para os dois grupos I e II.

(continuação)									
Variáveis	Langmuir		Freundlich		Variáveis	Langmuir		Freundlich	
	EL	CMA	K _f	n		EL	CMA	K _f	n
Solos (Grupo I)					Solos (Grupo II)				
AG+AF	-0,56	-0,79*	-0,88**	0,02	AG+AF	0,42	-0,27	0,29	-0,07
Silte	0,67	0,65	0,93**	-0,21	Silte	-0,19	0,73*	-0,01	-0,08
Argila	0,03	0,99***	0,44	0,56	Argila	-0,29	-0,50	-0,36	0,18
CTC _{ef}	0,72*	0,62	0,96***	-0,26	CTC _{ef}	0,27	0,87**	0,47	-0,46
P	0,67	0,62	0,92**	-0,23	P	0,72*	-0,06	0,67*	-0,83**
MO	-0,08	0,26	-0,02	0,21	MO	0,42	0,16	0,47	-0,49
Fe _d	0,72*	0,62	0,95***	-0,26	Fe _d	0,34	-0,13	0,33	-0,45
Fe _o	0,70	0,64	0,94***	-0,23	Fe _o	0,29	0,57	0,37	-0,47
Al _d	0,55	0,56	0,81*	-0,17	Al _d	0,55	-0,24	0,50	-0,61*
Al _o	-0,38	0,01	-0,13	0,25	Al _o	0,32	0,49	0,36	-0,38
Horizonte Superficial (Grupo I)					Horizonte Superficial (Grupo II)				
AG+AF	-0,52	-0,93	-0,99	-0,51	AG+AF	0,41	-0,33	0,32	-0,09
Silte	0,65	0,87	0,99	0,52	Silte	-0,31	0,69	-0,19	0,15
Argila	0,08	0,99*	0,99	0,50	Argila	-0,24	-0,39	-0,25	-0,05
CTC _{ef}	0,74	0,78	0,99	0,51	CTC _{ef}	0,36	0,98**	0,52	-0,49
P	0,72	0,80	0,99	0,50	P	0,96**	0,38	0,91*	-0,91*
MO	-0,38	-0,97*	-0,99*	-0,40	MO	0,16	-0,01	0,25	-0,39
Fe _d	0,77	0,80	0,99*	0,48	Fe _d	0,60	0,16	0,59	-0,57
Fe _o	0,69	0,82	0,99	0,51	Fe _o	0,17	0,81	0,24	-0,31
Al _d	0,53	0,93	0,99*	0,47	Al _d	0,72	0,24	0,71	-0,66
Al _o	-0,08	0,96*	0,98	0,59	Al _o	0,26	0,74	0,30	-0,35
Horizonte Subsuperficial (Grupo I)					Horizonte Subsuperficial (Grupo II)				
AG+AF	-0,61	-0,73	-0,92	0,06	AG+AF	-0,52	-0,42	-0,63	0,40
Silte	0,74	0,57	0,98*	-0,27	Silte	0,55	0,80	0,91*	-0,42
Argila	-0,01	0,99*	0,39	0,62	Argila	-0,16	-0,56	-0,48	0,12
CTC _{ef}	0,74	0,57	0,98*	-0,27	CTC _{ef}	0,64	0,82	0,96*	-0,45
P	0,73	0,57	0,98*	-0,27	P	0,74	-0,56	0,24	-0,80
MO	-0,23	0,95	0,13	0,79	MO	0,03	0,53	0,28	0,17
Fe _d	0,74	0,55	0,98*	-0,29	Fe _d	0,27	-0,37	0,09	-0,50
Fe _o	0,72	0,56	0,98*	-0,26	Fe _o	0,98**	0,10	0,81	-0,91*
Al _d	0,69	0,54	0,97*	-0,27	Al _d	0,29	-0,84	-0,20	-0,54
Al _o	-0,49	-0,22	-0,25	0,13	Al _o	0,61	-0,32	0,24	-0,56

*, ** e *** Significativo a 5%, 1% e 0,1%, respectivamente, pelo teste t.

Silveira & Alleoni (2003) e Silveira et al. (1999), estudando a adsorção de Cu em Latossolos tropicais e Latossolos ácidos, as características do solo influenciam na adsorção do metal em diferentes intensidades. Nos solos com maior grau de intemperismo e predominância da mineralogia oxidada na fração argila, a adsorção do metal é diferente quando comparado com solos com presença de minerais do tipo 2:1. Estes autores concluíram que o equilíbrio de carga no solo, influenciado pela característica mineralógica (principalmente o óxido de ferro e alumínio) e os níveis de matéria orgânica, foram os fatores mais importantes que controlaram as reações de adsorção de Cu nos solos estudados.

Alleoni et al. (2005) observaram correlação positiva entre a CMA de Cu com a saturação por alumínio e com os teores de argila, de óxidos de alumínio extraídos com ácido sulfúrico e mal cristalizados no horizonte A, e com pH e teores de argila e óxido de alumínio mal cristalizado no horizonte B. Segundo estes autores, a fração argila, que é formada por colóides com superfícies específicas reativas, exerce um considerável controle na adsorção de Cu, pois grande parte das reações físico-químicas processam-se na superfície dos colóides. Estes autores afirmam também que além do conteúdo (mesmo em baixas concentrações) dos óxidos, a sua natureza e o grau de cristalinidade influem também na adsorção de metais como o Cu.

Araújo et al. (2002) utilizaram análise de trilha para observar a relação entre os parâmetros de adsorção obtidos para alguns metais. Para Cu, eles observaram que os atributos que apresentaram correlação positiva significativa com a CMA e K_f foram matéria orgânica, CTC_{ef} , teor de argila e óxidos de alumínio. Estes autores afirmam que a ausência de efeito direto da CTC_{ef} na adsorção de Cu demonstra, possivelmente, uma menor contribuição da adsorção não-específica, em decorrência do mecanismo de formação de complexos de esfera externa, os sítios de troca, para solos intemperizados.

Novamente, neste estudo foi observada uma forte interação entre a CMA os óxidos de ferro e a CTC do solo. Assim, observa como a mineralogia e as características químicas do solo esta exibindo forte influência na adsorção de Cu, como mencionado por Alleoni et al. (2005), Araújo et al. (2002), Silveira & Alleoni (2003) e Silveira et al. (1999).

Com relação a Pb, para o grupo I houve correlação negativa entre CMA e a fração areia ($r = -0,94^{***}$), e positiva com a fração silte ($r = 0,94^{***}$), K_f também apresentou correlação positiva com a fração silte ($r = 0,96^{***}$). A EL, CMA e K_f apresentaram correlação positiva significativa com a CTC_{ef} , Fe_d e Fe_o . No horizonte A e subsuperficial a EL, CMA e K_f apresentaram correlação positiva com a CTC_{ef} , P, Fe_d e Fe_o (Tabela 19).

Tabela 19. Matriz de correlação entre areia grossa + areia fina (AG+AF), silte, argila, CTC_{ef}, P, matéria orgânica (MO), Ferro extraído por ditionito (Fe_d), Ferro extraído por oxalato (Fe_o), Alumínio extraído por ditionito (Al_d), Alumínio extraído por oxalato (Al_o) e os coeficientes EL e CMA da isoterma de Langmuir e K_f e n da isoterma de Freundlich para Pb, considerando todas as amostras (solos), amostras do horizonte superficial e amostras do horizonte subsuperficial, para os dois grupos I e II.

(continuação)									
Variáveis	Langmuir		Freundlich		Variáveis	Langmuir		Freundlich	
	EL	CMA	K _f	n		EL	CMA	K _f	n
Solos (Grupo I)					Solos (Grupo II)				
AG+Af	-0,87**	-0,94***	-0,93**	0,24	AG+Af	0,42	-0,16	0,19	0,07
Silte	0,94**	0,94***	0,96***	-0,41	Silte	-0,16	0,59	0,15	-0,28
Argila	0,42	0,69	0,53	0,36	Argila	-0,33	-0,47	-0,41	0,23
CTC _{ef}	0,95***	0,95***	0,97***	-0,46	CTC _{ef}	0,32	0,89***	0,61*	-0,59
P	0,92**	0,91**	0,94**	-0,42	P	0,66*	0,32	0,62*	-0,73*
MO	-0,11	0,10	-0,02	0,17	MO	0,45	0,46	0,45	-0,41
Fed	0,94***	0,97***	0,98***	-0,44	Fed	0,34	0,15	0,31	-0,39
Feo	0,94***	0,97**	0,98***	-0,42	Feo	0,26	0,62*	0,43	-0,55
Ald	0,81*	0,81*	0,83*	-0,33	Ald	0,54	0,15	0,43	-0,47
Alo	-0,11	-0,04	-0,06	0,33	Alo	0,28	0,48	0,39	-0,44
Horizonte Superficial (Grupo I)					Horizonte Superficial (Grupo II)				
AG+Af	-0,85	-0,97*	-0,92	0,19	AG+Af	0,43	-0,26	0,26	-0,05
Silte	0,92	0,99*	0,97*	-0,35	Silte	-0,29	0,39	-0,09	-0,01
Argila	0,49	0,79	0,62	0,28	Argila	-0,28	-0,11	-0,28	0,09
CTC _{ef}	0,97*	0,98*	0,99**	-0,48	CTC _{ef}	0,42	0,91*	0,61	-0,57
P	0,96*	0,98*	0,99**	-0,44	P	0,89*	0,57	0,87*	-0,96**
MO	-0,71	-0,94	-0,82	-0,03	MO	0,23	0,34	0,25	-0,18
Fed	0,95*	0,98*	0,99**	-0,44	Fed	0,62	0,44	0,57	-0,46
Feo	0,95	0,98*	0,99*	-0,41	Feo	0,14	0,63	0,31	-0,49
Ald	0,84	0,98*	0,92	-0,19	Ald	0,73	0,51	0,68	-0,57
Alo	0,38	0,68	0,51	0,38	Alo	0,21	0,56	0,35	-0,55
Horizonte Subsuperficial (Grupo I)					Horizonte Subsuperficial (Grupo II)				
AG+Af	-0,89	-0,99**	-0,95*	0,28	AG+Af	-0,69	-0,48	-0,65	0,69
Silte	0,97*	0,99**	0,99**	-0,46	Silte	0,95*	0,94*	0,95*	-0,62
Argila	0,36	0,63	0,48	0,41	Argila	-0,48	-0,67	-0,52	0,09
CTC _{ef}	0,97*	0,99**	0,99**	-0,46	CTC _{ef}	0,99**	0,98**	0,99**	-0,61
P	0,96*	0,99**	0,99**	-0,46	P	0,08	-0,06	0,11	-0,56
MO	0,09	0,37	0,21	0,59	MO	0,39	0,29	0,34	-0,12
Fed	0,97*	0,99**	0,99**	-0,48	Fed	0,03	-0,06	0,06	-0,48
Feo	0,96*	0,99**	0,99**	-0,45	Feo	0,69	0,61	0,72	-0,79
Ald	0,95*	0,99**	0,99*	-0,44	Ald	-0,33	-0,46	-0,29	-0,34
Alo	-0,30	-0,18	-0,22	0,31	Alo	0,08	0,09	0,12	-0,22

*, ** e *** Significativo a 5%, 1% e 0,1%, respectivamente, pelo teste t.

No grupo II, houve correlação significativa entre CMA e CTC_{ef} ($r = 0,89^{***}$), para todas as amostras de solo. E, para o horizonte subsuperficial a EL, CMA e K_f apresentaram correlação positiva com a CTC_{ef} (Tabela 19).

Para o estudo de diferentes Latossolos brasileiros Pierangeli et al. (2001) observaram que a presença de vermiculita com hidróxi entrecamadas favorece o aumento da $CTC_{pH7,0}$ dos solos e desta forma correlaciona-se positivamente com a CMA de Pb. Segundo os autores, esta correlação era esperada visto que o íon de Pb, sendo um cátion, é adsorvido nos sítios de cargas negativas dos colóides do solo.

Estes autores ainda observaram que para a maioria dos solos a CMA de Pb foi maior que a $CTC_{pH7,0}$ verificando que ocorreu uma maior adsorção de Pb. Destacando que a adsorção de Pb não constitui unicamente um processo de atração eletrostática e indica que o Pb é adsorvido de forma específica, visto que a adsorção de íons via formação de complexos de esfera interna pode ocorrer independentemente da carga superficial.

Linhares et al. (2009) observaram correlações positivas entre a energia de ligação com os teores de óxidos e, não observaram correlação com a CTC mostrando que as características são de adsorção específica. Estes autores ainda afirmam que as interações entre o Pb com os colóides dos solos são mais específicas e menos dependentes das cargas superficiais. A adsorção específica envolve a troca de metais com ligantes presentes na superfície dos colóides formando ligações covalentes. Esse fenômeno tem sido indicado como causa de alguns solos adsorverem metais acima da sua CMA relacionando a CTC. Fontes & Santos (2010) observaram correlação positiva entre CMA de Pb e teores de hematita e goethita. A mesma correlação foi observada para a constante de Freundlich.

Embora, no presente estudo, os teores de óxidos de ferro ocorrerem em menor quantidade na fração argila, em função da menor participação de ferro no material de origem dos solos, eles manifestaram grande afinidade pelo Pb. Esta afinidade pode ser observada através das correlações significativas com a EL, CMA e K_f observadas na Tabela 19.

Mattos et al. (2016) verificaram que os atributos do solo que mais afetam os parâmetros da equação de Freundlich e contribuem para a adsorção de Pb são: pH e teores de Mn, Ca, Mg, K e P.

No presente trabalho, para Pb, houve correlação entre CMA e P e CTC_{ef} (que leva em consideração os valores de Ca, Mg e K, para seu calculo). Foi possível observar que nas amostras que apresentaram teores mais elevados de Ca também adsorveram mais Pb, amostras GX, RY e TPI para todos os horizontes a exceção do horizonte Bt do TPI. Desta forma, o Ca observado no calculo da CTC do solo pode estar contribuindo para a CMA de Pb nos solos.

A variação encontrada entre os atributos do solo que melhor se correlacionam com a adsorção de Pb na literatura estão relacionados às diferenças na natureza dos constituintes minerais e orgânicos e na composição da solução do solo, que irão influenciar diretamente no comportamento dos metais no solo.

6. CONCLUSÕES

A diversidade de características físicas, químicas e mineralógicas encontrada nos solos da Bacia Sedimentar Amazônica, mostrou a diferenciação quanto à capacidade máxima de adsorção de Cd, Pb, Cu e Cr em estudo.

A textura foi um dos atributos que influenciou diretamente na adsorção dos metais. Solos com textura mais arenosa foi observada uma menor capacidade de adsorção.

Os modelos de isotermas de adsorção testados, Langmuir e Freundlich ajustaram bem aos resultados experimentais de adsorção para os metais estudados, na faixa de concentração estudada.

Os solos que apresentaram maiores CMA foram Gleissolo Háplico e Neossolo Flúvico. No entanto, por apresentarem baixos valores de energia de ligação, estes solos podem facilmente dessorver os metais no meio.

Os resultados obtidos permitem aceitar uma parte e rejeitar outra parte da hipótese de trabalho apresentada. Constatou-se que os solos que apresentaram maior capacidade de adsorção dos metais pesados foram os que apresentaram, na fração argila, minerais do tipo 2:1 e com menores teores de óxidos de Fe e Al. Assim, a parte da hipótese de que os solos mais oxídicos e ricos em minerais 1:1 seriam os de maior capacidade adsortiva, foi rejeitada. Por outro lado, os solos que mostraram textura mais argilosa foram efetivamente os que demonstraram maior capacidade adsortiva, fazendo com que essa parte da hipótese fosse aceita.

Os atributos do solo atuam de forma combinada favorecendo a maior ou menor adsorção de metais e isto vai controlar o impacto dos metais no meio em função da retenção ou não destes elementos no solo. Assim, é imprescindível conhecer a dinâmica dos metais no solo, para que seja possível compreender seus riscos no meio ambiente. E, assim prever riscos ambientais como o uso agrário ou industrial do solo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AB'SABER, A. N. Os domínios de natureza no Brasil: potencialidades paisagísticas. São Paulo: Ateliê Editorial, 4ª ed. 151 p. 2007.
- AGUIAR, M. R. M. P. de; NOVAES, A. C.; GUARINO, A. W. S. Remoção de metais pesados de efluentes industriais por aluminossilicatos. *Química Nova*, v.25, n.6b, p.1145-1154, 2002.
- ALLEONI, L. R. F.; BORBA, R. P.; CAMARGO, O. A. Metais pesados: da cosmogênese aos solos brasileiros. In: TORRADO, P. V.; ALLEONI, L. R. R.; COOPER, M.; SILVA, A. P.; CARDOSO, E. J. (ed). *Tópicos em Ciência do Solo*, Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. IV, p. 1-42, 2005.
- ALLEONI, L. R. F.; MELLO, J. W. V.; ROCHA, W. S. D. Eletroquímica, Adsorção e Troca Iônica no solo. In: MELO, V. F.; ALLEONI, L. R. F. (ed) . *Química e Mineralogia do solo - Parte II - Aplicações*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 69-129. 2009.
- ALLEONI, L.R.F.; IGLESIAS, C.S.M.; MELLO, S.C.; CAMARGO, O.A.; CASAGRANDE, J.C.; LAVORENTI, N.A. Atributos do solo relacionados à adsorção de cádmio e cobre em solos tropicais. *Acta Scientiarum Agronomy*, Maringá, v. 27, n. 4, p. 729-737. 2005.
- ALLOWAY, B. J. Heavy metals in soils: trace metals and metalloids in soils and their bioavailability. 3ª ed. New York: Springer, 2012. 615 p.
- ARAÚJO, W. S.; AMARAL SOBRINHO, N. M. B.; MAZUR, N.; GOMES, P. C. Relação entre adsorção de metais pesados e atributos químicos e físicos de classes de solo do Brasil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.26, p.17-27, 2002.
- BASÍLIO, M. S.; FRIESE, K.; LENA, J. C.; NALINI JÚNIOR, H. A.; ROESER, H. M. P. Adsorção de As, Cu, Pb e Cr na avaliação da capacidade de fixação de metais por resíduo de mineradoras de ferro. *Química Nova*, São Paulo , v. 28, n. 5, p. 822-828, 2005 .
- BASTOS, T. X.; ROCHA, E. J. P.; ROLIM, P. A. M.; DINIZ, T. D. A. S.; SANTOS, E. C. R.; NOBRE, R. A. A.; CURTIM, E. M. C.; MENDONÇA, R. L. D. O estado atual dos conhecimentos de clima da Amazônia com finalidade agrícola. 1986. In: *Simpósio do Trópico Úmido*, I, Belém, 1984. *Anais*. Belém, EMBRAPA-CPATU, p. 19-36, v6. 1986.
- BHATTACHARYYA, K. G.; GUPTA, S. S. Adsorption of a few heavy metals on natural and modified kaolinite and montmorillonite: A review. *Advances in Colloid and Interface Science*, Elsevier. V.140, p. 114–131, 2008.
- BIZARRO, V. G.; MEURER, E. J.; TATSCH, F. R. P. Teor de cádmio em fertilizantes fosfatados comercializados no Brasil. *Ciência Rural*, Santa Maria, v. 38, n. 1, p. 247-250, jan-fev, 2008.
- BRADL, H. B. Adsorption of heavy metal ions on soils and soils constituents. *Journal of Colloid and Interface Science*, v. 277, p. 1-18, 2004.
- BRAZ, A. M. S. Coeficiente de distribuição de metais pesados em solos paraenses. Piracicaba, SP: ESALQ/USP, 2011. 86 p. Dissertação (Mestrado). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2011.

CAMARGO, O.A. de; ALLEONI, L.R.F.; CASAGRANDE, J.C. Reações dos micronutrientes e elementos tóxicos. In: FERREIRA, M. E.; CRUZ, M. C. P. da; van RAIJ, B.; ABREU, C.A. de (Ed.). Micronutrientes e elementos tóxicos na agricultura. Jaboticabal: CNPq/FAPESP/ POTAFOS, 2001. cap. 5, p. 89-124.

CAMPOS, M. C. C. ; RIBEIRO, M. R. ; SOUZA JÚNIOR, V. S. ; RIBEIRO FILHO, M. R. ; SOUZA, R. V. C. C. ; ALMEIDA, M. C. . Características mineralógicas de Latossolos e Argissolos na região Sul do Amazonas. Revista Acadêmica: Ciências Agrárias e Ambientais, v. 9, p. 01-7, 2011.

CAMPOS, M. L.; SILVA, F. N.; FURTINI NETO, A. E.; GUILHERME, R. G.; MARQUES, J. J.; ANTUNES, A. S. Determinação de cádmio, cobre, cromo, níquel, chumbo e zinco em fosfatos de rocha. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v. 40, n. 4, p. 361-367, Apr. 2005 .

CASAGRANDE, J. C.; SOARES, M. R. Modelos Químicos de adsorção. In: MELO, V. F.; ALLEONI, L. R. F. (ed) . Química e Mineralogia do solo - Parte II - Aplicações. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 131-160. 2009.

CHANG, T.W.; WANG, M.K.; LIN, C. Adsorption of cooper in the different sorbent/water ratios of soil systems. Water, Air, and Soil Pollution, v.138, p.199-209, 2002.

CORREIA, F. W. S.; MANZI, A. O.; CÂNDIDO, L. A.; SANTOS, R. M. N.; PAULIQUEVIS, T. Balanço de umidade na Amazônia e sua sensibilidade às mudanças na cobertura vegetal. Ciência e Cultura. vol.59, n.3, p. 39-43, 2007.

DIAS, N. M. P.; ALLEONI, L. R. F.; CASAGRANDE, J. C. and CAMARGO, O. A..Adsorção de cádmio em dois Latossolos ácricos e um Nitossolo. Rev. Bras. Ciênc. Solo. V. 25 nº2, p. 279-288, 2001.

DUBBE, A.; ZBYTNIIEWSKI, R.; KOWALKOWSKI, T.; CUKROWSKA, E.; BUSZEWSKI, B. Adsorption and migration of heavy metals in soil. Polish Journal of Environmental Studies, vol. 10, n. 1, 2001.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. 3ª edição. Brasília, DF, 2013.

FALESI, Í. C. Estado atual de conhecimento de solos da Amazônia brasileira. 1986. In: Simpósio do Trópico Úmido, I, Belém, 1984. Anais. Belém, EMBRAPA-CPATU, p. 168-191, v6. 1986.

FEARNSIDE, P.M. Desmatamento na Amazônia: dinâmica, impactos e controle. Revista Acta Amazônica, v. 36, p. 395-400, 2006.

FONSECA, A.; JUSTINO, M.; SOUZA Jr, C.; VERÍSSIMO, A. Boletim do desmatamento da Amazônia Legal (fevereiro e março de 2016) SAD. Transparência Florestal da Amazônia Legal. Imazon - Instituto do Homem e Meio Ambiente da Amazônia. 9 p. 2016.

FONTES, M. P. F. Behavior of heavy metals in soils: Individual and multiple competitive adsorption. p. 77-117. In: Competitive Sorption and Transport of Heavy Metals in Soils and Geological Media. SELIM, H. M. (ed). CRC. Press. 2013.

FONTES, M. P. F.; ALLEONI, L. R. F. Electrochemical attributes and availability of nutrients, toxic elements, and heavy metals in tropical soils. *Scientia Agrícola*. Piracicaba, v. 63, n. 6, p. 589-608, 2006 .

FONTES, M. P. F.; CAMARGO, O. A.; SPOSITO, G. Eletroquímica das partículas coloidais e sua relação com a mineralogia de solos altamente imtemperizados. *Scientia Agrícola*, v. 58, nº3, p. 627-646, 2001.

FONTES, M. P. F.; GOMES, P. C. Simultaneous competitive adsorption of heavy metals by the mineral matrix of tropical soils. *Applied Geochemistry* V. 18, P.795–804, 2003.

FONTES, M. P. F.; SANTOS, G. C. Lability and sorption of heavy metals as related to chemical, physical, and mineralogical characteristics of highly weathered soils. Springer-Verlag, *J Soils Sediments* 10, p. 774-786, 2010.

FONTES, M. P. F.; WEED, S. B. Phosphate adsorption by clays from Brazilian Oxisols: relationships with specific surface area and mineralogy. *Geoderma*, 72: 37-51, 1996.

FONTES, M.P.F. & WEED, S.B. Iron oxides in selected Brazilian Oxisols: I. Mineralogy. *Soil Science Society of America Journal*, v.55, p.1143-1149, 1991.

FORD, R.G.; SCHEINOST, A.C.; SPARKS, D.L. Frontiers in metal sorption/precipitation mechanisms on soil mineral surfaces. *Advances in Agronomy*, San Diego, v.74 , p.41-62, 2001.

FREITAS, E. V. S.; NASCIMENTO, C. W. A.; GOULART, D. F.; SILVA, J. P. S. Disponibilidade de cádmio e chumbo para milho em solo adubado com fertilizantes fosfatados. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 33, n. 6, p. 1899-1907, Dec. 2009.

GLASER, B.; BIRK, J. J. State of the scientific knowledge on properties and genesis of Anthropogenic Dark Earths in Central Amazonia (Terra Preta de Índio). *Geochimica et Cosmochimica Acta*, nº 82 p. 39–51, 2012.

GOMES, P. C.; FONTES, M. P. F.; SILVA, A. G.; MENDONÇA, E. S.; NETTO, A. R. Selectivity sequence and competitive adsorption of heavy metals by Brazilian soils. *Soil Science Society of America Journal*. v. 65, nº4, p. 1115-1121, 2001.

GUIMARÃES, S. T.; LIMA, H. N.; TEIXEIRA, W. G.; NEVES JUNIOR, A. F.; SILVA, F. W.; ROCHA, R. S. M.; SOUZA, K. W. Caracterização e classificação de gleissolos da várzea do rio Solimões (Manacapuru e Iranduba), Amazonas, Brasil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. v. 37, n. 2, p. 317-326, 2013.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Atlas do Censo demográfico 2010 - Distribuição da população por biomas. Rio de Janeiro, 2013. 160 p.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Geoestatísticas de Recursos Naturais da Amazônia Legal. 2003. Estudos e Pesquisas, Informações Geográficas nº 8. Rio de Janeiro, R.J., 2011.

JORDÃO, C. P.; CARARI, D. M.; PEREIRA, W. L.; ALMEIDA, R. M.; FONTES, M. P. F.; FERNANDES, R. B. A. Adsorption of Zn (II) in Oxisols as affected by selective removal of soil fractions. *International Journal of Environmental Studies*, v.67, nº6, p. 879-897, 2010.

KABATA-PENDIAS, A. Behavioural properties of trace metals in soils. *Applied Geochemistry*, n. 2, p. 3–9, 1993.

LEE, S.-Z.; CHANG, L.; YANG, H.-H.; CHEN, C.-M.; LIU, M.-C. Adsorption characteristics of lead onto soils. *Elsevier. Journal of Hazardous Materials*, A 63, p. 37-49, 1998.

LIMA, H. N. Gênese, química, mineralogia e micromorfologia de solos da Amazônia Ocidental. (Tese de Doutorado). Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, 176 p, 2001.

LIMA, H. N.; MELLO, J. W. V.; SCHAEFER C. E. G. R.; KER, J. C. & LIMA, A. M. N. Mineralogia e química de três solos de uma topossequência da bacia sedimentar do Alto Solimões, Amazônia Ocidental. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 30, p. 59-68, 2006.

LINHARES, L. A.; FILHO, F. B. E.; OLIVEIRA, C. V.; BELLIS, V. M. Adsorção de cádmio e chumbo em solos tropicais altamente intemperizados. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília , v. 44, n. 3, p. 291-299, Mar. 2009 .

LOPES, C. M. Adsorção individual e competitiva de Cd, Cu, Ni e Zn em solos em função da variação do pH. Piracicaba, SP: 2009. 100 p. Dissertação (Mestrado). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2009.

MARQUES, J.J.G.S.M.; CURI, N.; SCHULZE, D.G. Trace elements in Cerrado soils. In: ALVAREZ, V.H.; SCHAEFER, C.E.G.R.; BARROS, N.F.; MELLO, J.W.V.; COSTA, L.M. *Tópicos em Ciência do Solo (Topics in Soil Science)*, Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2002. cap. 3. p.103-142: Trace elements in Cerrado soils.

MARQUES, J.J.G.S.M.; TEIXEIRA, W.G.; SCHULZE, D.G. & CURI, N. Mineralogy of soils with unusually high exchangeable Al from the western Amazon Region. *Clay Mineralogy*, v. 37, p. 651-661, 2002.

MATTOS, A. G. Valores de referência de qualidade e adsorção de metais pesados em solos da Região do Médio Paraíba - RJ. Seropédica, RJ: UFRRJ, 2014. 73 p. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2014.

MATTOS, A. G.; SOBRINHO, N. M. B. A.; LIMA, E. S. A.; GUEDES, J. N.; SOUSA, F. F. Sorção de Cd e Pb nos solos da região do Médio Rio Paraíba - RJ, Brasil. *Revista Ciência Agronômica*, v. 47, n. 1, p. 1-12, jan-mar, 2016.

MOREIRA, C. S. Adsorção competitiva de cádmio, cobre, níquel e zinco em solos. Piracicaba, SP: ESALQ/USP, 2004. 108 p. Dissertação (Mestrado). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2004.

- NAIDU, R.; SUMNER, M. E.; HARTER, R. D. Sorption of heavy metals in strongly weathered soils: an overview. *Environ. Geochem. Health*, 20: 5-9, 1998.
- OLIVER, M. A. Soils and human health: a review. *Eur. J. Soil Sci.*, 48: 573-592, 1997.
- PIERANGELI, M. A. P.; GUILHERME, L. R. G.; CURI, N.; SILVA, M. L. N.; OLIVEIRA, L. R.; LIMA, J. M. Teor total e capacidade máxima de adsorção de chumbo em Latossolos brasileiros. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 25(2), p. 279-288, 2001.
- PIERANGELI, M. A. P.; GUILHERME, L. R. G.; CURI, N.; COSTA, E. T. S.; LIMA, J. M.; MARQUES, J. J. G. S. M.; FIGUEIREDO, L. F. P. Comportamento sortivo, individual e competitivo, de metais pesados em Latossolos com mineralogia contrastante. *Revista Bras. Ciência do Solo*, v. 31, p. 819-826, 2007.
- RADAM BRASIL. Departamento Nacional da Produção Mineral. Projeto RADAM BRASIL. Folha SA. 20 Manaus. Rio de Janeiro, 628 p. 1978.
- RODRIGUES, T. E. Solos da Amazônia. In: ALVAREZ, V. H.; FONTES, L. E. F.; FONTES, M. P. F. (ed). *O solo nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e o desenvolvimento sustentado*. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, UFV, p. 19-60, 930 p. 1996.
- SANTOS, G. C. Sorção e labilidade de metais pesados em Latossolos de Minas Gerais. Viçosa, MG: UFV, 2001. 93 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, 2001.
- SCHAEFER, C. E. G. R. Bases Físicas da paisagem brasileira: estrutura geológica, relevo e solos. In: ARAÚJO, A. P.; ALVES, B. J. R. (ed). *Tópicos em Ciência do Solo*, Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. VIII, p. 1-69. 2013.
- SILVEIRA, M. L. A.; ALLEONI, L. R. F. Copper adsorption in tropical oxisols. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, Curitiba, v. 46, n. 4, p. 529-536, Dec. 2003.
- SILVEIRA, M. L. A.; ALLEONI, L. R. F.; CASAGRANDE, J. C.; CAMARGO, O. A. Energia livre da reação de adsorção de cobre em latossolos ácidos. *Scientia Agricola*, Piracicaba, v. 56, n. 4, supl. p. 1117-1122, 1999.
- SOARES, M. R. Coeficiente de distribuição (K_d) de metais pesados e sua relação com atributos físico-químicos de solos do estado de São Paulo. Piracicaba, SP: ESALQ/USP, 2004. 202 p. Tese (Doutorado). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2004.
- SOARES, M. R.; CASAGRANDE, J. C. Adsorção e Modelos. In: RIBEIRO, M. R.; NASCIMENTO, C. W. A.; RIBEIRO FILHO, M. R.; CANTALICE, J. R. B. (ed). *Tópicos em Ciência do Solo*, Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. VI, p. 71-201. 2009.
- SOMBROEK, W. G. Amazon soils. A reconnaissance of the soils of the Brazilian Amazon region. Wageningen, Centre for Agricultural Publication and Documentation, 303 p. 1966.
- SPARKS, D. L. Kinetics and mechanisms of chemical reactions at the soil mineral/water interface. In: SPARKS, D. L. *Soil physical chemistry*. 2ª ed. New York: CRC Press, 1999. p. 135-192.
- SPOSITO, G. *The chemistry of soils*. 2ª ed. New York: Oxford University Press, 2008. 342p.

STIGLIANI, W. M. Changes in valued "capacities" of soils and sediments as indicators of nonlinear and time-delayed environmental effects. *Environ. Monit. Assess.*, v.10, p. 245-307, 1988.

TEIXEIRA, W.G.; ARRUDA, W.; SHINZATO, E.; MACEDO, R.S.; MARTINS, G.C.; LIMA, H.N. & RODRIGUES, T.E. Solos do Estado do Amazonas. In: MAIA, M.A.M.; MARMOS, J.L., eds. *Geodiversidade do Estado do Amazonas*. Manaus, CPRM, p.71-86, 288p, 2010.

TREVINO, J. C.; COLES, C. A. Kaolinite properties, structure and influence of metal retention on pH. *Applied Clay Science*. v. 23, p. 133-139, 2003.

VINHAL-FREITAS, I. C.; MALDONADO, A. C. D.; ALVARENGA, C. B.; CAMARGO, R.; WENDLING, B. Adsorção e dessorção de metais no solo e coeficientes de isotermas de Freundlich e Langmuir. *Agropecuária Técnica*, v. 31, nº 2, p. 153-163, 2010.

World Health Organization. Trace elements in human nutrition and health. Geneva: WHO, 1996.

XAVIER, B. T. L. Mineralogia e teores naturais de metais pesados em solos da bacia sedimentar amazônica. Viçosa, MG: UFV, 2013. 110 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, 2013.