

CECÍLIA CALHAU ALMEIDA

**ADSORÇÃO DE ARSÊNIO: SELEÇÃO DE CLASSES DE SOLOS MINEIROS
INDICADAS PARA UTILIZAÇÃO COMO BARREIRA GEOQUÍMICA NA
IMOBILIZAÇÃO DESTE ELEMENTO**

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
2009

CECÍLIA CALHAU ALMEIDA

**ADSORÇÃO DE ARSÊNIO: SELEÇÃO DE CLASSES DE SOLOS MINEIROS
INDICADAS PARA UTILIZAÇÃO COMO BARREIRA GEOQUÍMICA NA
IMOBILIZAÇÃO DESTA ELEMENTO**

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: 27 de Julho de 2009

Prof. João Carlos Ker
(Co-orientador)

Prof. Júlio César Lima Neves

Prof. Renildes Lúcio Ferreira Fontes

Dr. Juscimar da Silva

Prof. Maurício Paulo Ferreira Fontes
(Orientador)

*A Deus,
Ao Thiago e Helena, meus amores,
À minha mãe, que sempre me incentivou,
Dedico.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelas oportunidades que foram colocadas em minha vida por suas mãos.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Solos pela oportunidade de realização dos estudos.

Ao CNPq, pela bolsa concedida.

À família, pelo encorajamento e pelos momentos de afeto.

Agradeço minha mãe, maior incentivadora. Minhas irmãs, Júlia e Alice, por terem torcido por mim. À Coinha e Desirrée, pelo carinho.

Especialmente, agradeço meu marido, Thiago, pela paciência e compreensão.

À minha filha Helena, por ser a melhor filha do mundo e por dar sentido à minha vida.

A todos os funcionários que sempre estiveram prontos a colaborar, especialmente à Luciana da Secretaria de Pós-graduação, aos laboratoristas: Claudio (Física), Geraldo Robésio (Geoquímica), Carlos Fonseca (Fertilidade). Ao José Francisco, do Laboratório de Mineralogia, meu especial agradecimento pelas colaborações, favores prestados e companhia.

Aos professores Jaime W. V. de Mello, Elpídio Inácio, Luiz Dias, Hugo Ruiz, Genelício Crusóé, pelos conhecimentos adquiridos em suas disciplinas.

Ao professor João Carlos Ker, pelos ensinamentos para toda vida, pelos muitos conselhos, amizade, sugestões ao trabalho, e pelo estímulo que me encorajou a entrar com o pedido de mestrado.

Ao meu orientador, Maurício Paulo F. Fontes, pela porta do gabinete sempre aberta, pela orientação, pela confiança a mim depositada, e por sua tranquilidade e educação que tornaram o período de defesa uma época mais fácil.

Aos colegas da Mineralogia, Guilherme Rosa, Breno Serafim, Bruno Toríbio e Michelle pela companhia, amizade e favores prestados.

Ao Igor, pelos anos de amizade, por todas as ajudas e pela boa vontade de sempre.

Ao Juscimar e ao Sandro, pelos materiais emprestados e pelas dúvidas tiradas.

Às meninas do DPS, por tornarem o dia mais alegre quando nos encontramos: Diana, Lina, Gracinha, Mariana, Loane, Carol, Gigi.

A todos os amigos que cursaram disciplinas comigo, pelos momentos de descontração, brincadeiras e de estudos em grupo.

Àqueles que indiretamente contribuíram com este trabalho pela torcida em cada conquista.

BIOGRAFIA

CECÍLIA CALHAU ALMEIDA nasceu em Manhuaçu-MG, no ano de 1981. É filha de Maria Ignez Motta Calhau e José Almeida Silva Júnior. É casada com Thiago Torres Costa Pereira, mãe de Helena Calhau Torres Pereira.

Em 2001, iniciou o bacharelado em Geografia na Universidade Federal de Viçosa Viçosa, Minas Gerais.

Em 2002 iniciou estágio no Departamento de Solos, tendo trabalhado com os professores Jaime Wilson V. de Melo e, posteriormente, João Carlos Ker, até o ano de 2005. Formou-se em 2006, e a partir de então, trabalhou como professora de Geografia até o ano de 2008.

Em março de 2008 iniciou o Curso de Mestrado no Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas da Universidade Federal de Viçosa, sob orientação do professor Maurício Paulo F. Fonte, finalizando-o com a defesa da presente dissertação em julho de 2009.

SUMÁRIO

	Página
RESUMO.....	viii
ABSTRACT.....	x
1.INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	4
2.1. Aspectos gerais sobre ocorrência e comportamento do arsênio no ambiente.....	4
2.2. Adsorção de arsênio em solos e materiais de solo.....	6
2.3. Solos do Estado de Minas Gerais.....	9
2.4. Mineralogia dos solos.....	12
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	14
3.1. Seleção dos perfis e coleta de amostras de solos.....	14
3.2.Caracterização física dos solos.....	16
3.2.1. Análise textural.....	16
3.2.2. Argila dispersa em água (ADA).....	16
3.3. Caracterização química dos solos.....	16
3.3.1. Análise para avaliação da fertilidade do solo.....	16
3.3.2. Outras análises químicas.....	17

3.4. Carbono orgânico total (COT).....	18
3.5. Análise mineralógica.....	18
3.6. Análises Termodiferencial e Termogravimétrica.....	19
3.7. Adsorção de arsênio.....	19
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	21
4.1. Características físicas dos solos.....	21
4.2. Características químicas de rotina dos solos.....	25
4.3. Características mineralógicas dos solos.....	31
4.3.1. Fração argila.....	31
4.3.2. Fração silte e areia.....	56
4.4. Adsorção de arsênio.....	70
4.5. Seleção de solos para construção de barreiras geoquímicas para imobilização de As.....	86
5. CONCLUSÕES.....	87
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	89

RESUMO

ALMEIDA, Cecília Calhau, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2009.

Adsorção de arsênio: seleção de classes de solos mineiros indicadas para utilização como barreira geoquímica deste elemento. Orientador: Maurício Paulo Ferreira Fontes. Co-orientadores: João Carlos Ker e Jaime Wilson Vargas de Mello.

A água é considerada um recurso natural de importância estratégica para o homem no futuro. Reconhece-se que a manutenção da qualidade das reservas naturais de água e seu fornecimento, de maneira segura, para o desenvolvimento das atividades humanas é o grande desafio da humanidade nos próximos anos. Um dos problemas que se somam à escassez de água em certas regiões é a contaminação de corpos d'água, o que tem comprometido o fornecimento de água potável em vários locais do mundo. Dentre os possíveis contaminantes, o arsênio (As) é um dos mais problemáticos, sendo considerado, pela Organização Mundial da Saúde (OMS), o segundo mais importante em matéria de saúde pública global, atrás, somente, da contaminação microbiológica da água. O potencial toxicológico do As é conhecido há centenas de anos, mas somente nas últimas décadas, após a melhoria na capacidade de detecção analítica de elementos em solução, foi que a relação entre concentrações muito baixas de As e alguns tipos de câncer pôde ser melhor evidenciada. Sabe-se que, mesmo em concentrações da ordem de alguns $\mu\text{g/L}$, a ingestão de As afeta seriamente a saúde quando associada a períodos prolongados de exposição. A ocorrência do As em águas superficiais e subterrâneas depende da fonte desse elemento, da quantidade disponível e do ambiente geoquímico local. A mobilidade do As no ambiente depende, grande parte, das características do ambiente geoquímico, principalmente, das condições de pH e potencial redox (Eh), e dos equilíbrios de adsorção e dessorção, estes, controlados pelas matrizes mineral e orgânica dos solos. Em Minas Gerais predominam solos mais intemperizados do tipo Latossolos e Argissolos, que tem em sua constituição mineralógica predominantemente caulinita e óxidos de Fe e Al, esses últimos tidos na literatura como bons adsorvedores

de arsênio. Para o estudo, foram coletadas amostras dos horizontes A e B de perfis representativos das classes dominantes de solos do Estado de Minas Gerais, preferencialmente, nas profundidades de 0 a 20 e de 50 a 70 cm, e caracterizados física, química e mineralogicamente de forma a correlacionar essas propriedades com a capacidade de adsorção de arsênio nesses solos. O experimento de adsorção foi conduzido utilizando soluções de NaNO_3 0,001 mol/L contendo $\text{Na}_2\text{HAsO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ nas doses: 0; 0,08; 0,16; 0,24; 0,40, 0,56; 0,72; 0,88; 1,12; 1,36 e 1,60 mmol/L de As(V), com pH ajustado para 5,5 e o ajuste dos dados às isotermas de Langmuir e Freundlich, sendo que os maiores coeficientes de correlação foram obtidos no primeiro modelo. No processo de adsorção de arsênio, uma das características que mais interferem na capacidade do solo em atuar como superfície adsorvente para este elemento é a textura do solo, em função do aumento ou diminuição de sua superfície específica. Em relação aos Latossolos, os Argissolos, de um modo geral, apresentaram granulometria mais grosseira e mineralogia mais caulínica e/ou micácea do que os Latossolos. Os menores teores de argila e maiores teores de matéria orgânica conferem menor capacidade máxima de adsorção de arsênio (CMAAs) em relação ao horizonte subsuperficial desses mesmos solos. Os Latossolos, dentre as classes de solos estudadas, foram os que apresentaram maior CMAAs, seguido dos Argissolos, Cambissolos e, por último, o Neossolo Quartzarênico. A maior CMAAs foi do horizonte Bw de amostra de Latossolo Vermelho Distrófico (3,6 mg/g de As). Teores elevados de argila interferiram de forma marcante na CMAAs, além da mineralogia das amostras, sendo, de modo geral, evidenciada a presença de picos indicativos de goethita e hematita nos difratogramas representativos da fração argila dos solos que apresentaram maior CMAAs, bem como teores elevados de gibbsita obtidos por meio de Análise Termogravimétrica. É possível afirmar que, apesar de mineralogicamente os horizontes A e Bw não diferirem, fatores como: menor teor de C orgânico, a profundidade e estrutura farão com que o horizonte diagnóstico subsuperficial atue mais satisfatoriamente como barreira geoquímica na imobilização de As. Para tanto, o monitoramento é necessário, bem como novos estudos envolvendo o comportamento do arsênio no solo e que possam complementar os resultados encontrados neste trabalho.

ABSTRACT

ALMEIDA, Cecília Calhau, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2009.

Adsorption of arsenic: selection of soil classes indicated for use as geochemical barrier this element. Adviser: Maurício Paulo Ferreira Fontes. Co-advisers: João Carlos Ker and Jaime Wilson Vargas de Mello.

Water is considered a natural resource of strategic importance for the man in the future. It is recognized that maintaining the quality of natural resources and water supply, safely, for the development of human activities is the great challenge facing humanity in the coming years. One of the problems that add to water scarcity in some areas is the contamination of water bodies, which have jeopardized the supply of water in several locations around the world. Among the possible contaminants, arsenic (As) is one of the most problematic, being considered by the World Health Organization (WHO), the second most important public health overall, behind only of microbiological contamination of water. The toxicological potential of As has been known for hundreds of years, but only in recent decades, after the improvement in the analytical detection, was that the relationship between very low concentrations of As and some types of cancer might be best evidenced. It is known that at concentrations of the order of a few mg/L affects health when combined with prolonged periods of exposure. The occurrence of As in surface water and groundwater depends on the source this element, the quantity available and the local. The mobility depends largely of characteristics of geochemical environment, especially under conditions of pH and Eh, and the equilibrium adsorption and desorption, these controlled by matrix mineral and organic of soils. In Minas Gerais State, Oxisols and Ultisols have a predominantly mineral composition kaolinite, iron oxides and Al oxides. We collected samples of the A and B horizons, representative of dominant soil classes from Minas Gerais State, and characterized physically, chemically and mineralogically in order to correlate these properties with arsenic adsorption. The adsorption experiment was conducted using solutions of NaNO_3 0.001 mol/L containing $\text{Na}_2\text{HAsO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ doses: 0; 0.08; 0.16; 0.24;

0.40, 0.56; 0.72; 0.88; 1.12; 1.36 and 1.60 mmol/L As (V), with pH adjusted to 5.5 and adjusting the data to Langmuir and Freundlich, with the highest correlations were obtained in the first model. In the arsenic adsorption, one of the features that most interfere with the ability of soil to act as an absorbent surface for this element is the texture, due specific surface. The Ultisols, in general, had coarse mineralogy and more kaolinite and/or mica than Oxisols. The lower clay content and higher content of organic matter confer lower arsenic adsorption capacity (CMAAs) compared to the subsurface horizon. The Oxisols had the highest CMAAs, followed by Ultisols, Inceptisols, and sandy soils. Most CMAAs was the Bw horizon (3.6 mg/g of As). High clay content interfered markedly in CMAAs, and the mineralogy of samples, in general, evidenced the presence of peaks indicative of goethite and hematite in the XRD patterns representative of the clay soil that had higher CMAAs and high levels of gibbsite obtained by Thermogravimetric Analysis. We can say, that mineralogical A and Bw horizons do not differ, factors such: lower organic matter content, depth and structure will make subsurface horizon acts more satisfactorily as a barrier geochemical in the As immobilization. Thus, monitoring and new studies are required involving the arsenic behavior in soil.

1. INTRODUÇÃO

A água é considerada um recurso natural de importância estratégica para o homem no futuro. Reconhece-se que a manutenção da qualidade das reservas naturais de água e seu fornecimento, de maneira segura, para o desenvolvimento das atividades humanas é o grande desafio da humanidade nos próximos anos. Um dos problemas que se somam à escassez de água em certas regiões é a contaminação de corpos d'água, o que tem comprometido o fornecimento de água potável em vários locais do mundo. Dentre os possíveis contaminantes, o arsênio (As) é um dos mais problemáticos, sendo considerado, pela Organização Mundial da Saúde (OMS), o segundo mais importante em matéria de saúde pública global, atrás, somente, da contaminação microbológica da água.

No Brasil, foram relatados casos de exposição ao arsênio, predominantemente em áreas de mineração atuais ou pretéritas. Em Minas Gerais, na região do Quadrilátero Ferrífero, foram encontrados sinais de contaminação por arsênio nos solos, e na água de consumo de moradores das comunidades de Santa Bárbara e Nova Lima, se constituindo em um risco à saúde principalmente de crianças e jovens da região (Deschamps e Matschullat, 2007).

O potencial toxicológico do As é conhecido há centenas de anos, mas somente nas últimas décadas, após a melhoria na capacidade de detecção analítica de elementos em solução, foi que a relação entre concentrações muito baixas de As e alguns tipos de

câncer pôde ser mais bem evidenciada. Sabe-se que, mesmo em concentrações da ordem de alguns $\mu\text{g/L}$, a ingestão de As afeta seriamente a saúde quando associada a períodos prolongados de exposição.

A preocupação concernente à contaminação de águas por As ganhou maior importância a partir dos anos de 1990, com a descoberta do incidente em Bangladesh, onde têm sido relatados casos de milhares de pessoas sofrendo de danos à saúde em razão da contaminação por arsênio por meio do consumo de água enriquecida em larga escala por este metalóide. Diversos outros incidentes no mundo inteiro (Argentina, Chile, China, Índia, Hungria, México, Romênia, Taiwan, Vietnã, Estados Unidos, entre outros) provocaram, em muitos países, a inclusão do As na lista de elementos a serem rotineiramente dosados em laboratórios de análise de água. Tais casos geraram, também, a necessidade de revisão dos limites seguros de concentração de As em águas para consumo humano e da avaliação da situação mundial da contaminação de águas, principalmente subterrâneas, por As.

Em 1993, a OMS modificou, provisoriamente, o valor máximo permissível de 50 para 10 $\mu\text{g/L}$ de As em água para consumo humano. A União Européia vem adotando o valor de 10 $\mu\text{g/L}$, ou mais baixos. Muitos outros países, como Bangladesh, mantêm o limite de 50 $\mu\text{g/L}$. A agência de proteção ambiental dos Estados Unidos (USEPA), em 2001, reduziu de 50 para 10 $\mu\text{g/L}$, o que está sob discussão em razão dos custos que este limite impõe a certos setores da indústria americana. No Brasil, a portaria do Ministério da Saúde nº 1469/GM, de 29 de dezembro de 2000, republicada no D.O.U. em 02.01.2001, que aprova a Norma de Qualidade de Água para Consumo Humano, coloca, no Art.15, o valor de 10 $\mu\text{g/L}$ de As como o máximo permitido para o padrão de potabilidade da água (BRASIL, 2001). Dentro dessa recente preocupação com os teores de As nas águas brasileiras, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), órgão vinculado ao Ministério do Meio Ambiente, recentemente revisou os teores desse elemento para as águas de Classe 1 e 2, reduzindo de 50 $\mu\text{g/L}$ para 10 $\mu\text{g/L}$ (CONAMA, 2005).

A ocorrência do As em águas superficiais e subterrâneas depende da fonte desse elemento, da quantidade disponível e do ambiente geoquímico local. A mobilidade do As no ambiente depende, grande parte, das características do ambiente geoquímico, principalmente, das condições de pH e potencial redox (Eh), e dos equilíbrios de adsorção e dessorção, estes, controlados pelas matrizes mineral e orgânica dos solos.

Muitos estudos têm procurado esclarecer o papel de minerais, solos e sedimentos na retenção e liberação de As no ambiente. Conhecendo-se os tipos de interação envolvidos, torna-se possível compreender fenômenos passados que contribuíram para a ocorrência atual desse elemento em solos e águas e prever o destino do As com relação a possíveis alterações ambientais.

A hipótese levantada neste trabalho é que os solos mais oxidados e de textura argilosa apresentarão grande capacidade adsorvedora de arsênio de tal forma a ser possível a utilização destes como barreira geoquímica para imobilização de arsênio.

Para testar esta hipótese, os objetivos deste trabalho foram caracterizar química, física e mineralogicamente amostras das principais classes de solos de diversas mesorregiões do Estado de Minas Gerais, e estudar a adsorção de arsênio em seus horizontes A e B.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Aspectos gerais sobre ocorrência e comportamento do arsênio no ambiente

Arsênio é um elemento de ocorrência natural, pertencente ao grupo dos semi-metais da tabela periódica. Seu teor em rochas ígneas e sedimentares varia de 0,5 a 2,5 mg/kg, sendo que nessas últimas, pode aparecer co-precipitado com hidróxidos de Fe ou sulfetos. Está presente em mais de 245 minerais, a maioria contendo sulfetos associados a metais como Au, Co, Cu, Fe, Ni e Pb. É muito comum, portanto, em galena, pirita e calcopirita, sendo que o mineral de arsênio mais abundante é a arsenopirita (FeAsS) (Mandal e Suzuki, 2002).

O material de origem e atividades humanas são os principais fatores que influenciam o teor de As em solos. Compostos de arsênio são utilizados como herbicidas, inseticidas, desfolhantes, promotores de crescimento na produção de suínos e aves, conservantes de madeira e possuem aplicação industrial na produção de certos tipos de vidros e equipamentos eletrônicos. O arsênio pode ser veiculado pela aplicação de fertilizantes, principalmente fosfatos, queima de combustível fóssil e disposição de resíduos animais e industriais. Atividades de mineração em áreas que contenham sulfetos podem contribuir significativamente para o aumento do teor de As em águas e solo. De modo geral, a ocorrência de altos teores de As no ambiente é geogênica (intemperismo de rochas e minerais, dissolução em fontes de águas geotermiais), como

se observa na maior parte dos casos de contaminação de águas subterrâneas no mundo (Mandal e Suzuki, 2002; Smedley e Kinniburgh, 2002).

Em solos, os teores de As variam consideravelmente entre diferentes regiões geográficas. Solos considerados não contaminados ou não anômalos possuem de 0,1 a 40 mg/kg de As, com teores mais baixos em solos arenosos e derivados de granitos e mais altos em solos aluviais e orgânicos (Kabata-Pendias e Pendias, 1984). A concentração de As em águas naturais não contaminadas varia de 1 a 10 µg/L. Águas de drenagem provenientes de áreas de mineração onde ocorrem sulfetos podem conter de 100 a 5.000 µg/L de As, valores estes encontrados por Deschamps e Matschullat (2007) para o Estado de Minas Gerais.

Potencial redox e pH são os fatores mais importantes no controle da especiação de As. Em ambientes oxidantes, As predomina no estado de oxidação As(V), como arsenato. Nessas condições, a forma H_2AsO_4^- predomina, sob valores de pH abaixo de 6,9; sob pH mais elevado, predomina a forma HAsO_4^{2-} . As formas H_3AsO_4^0 e AsO_4^{3-} podem estar presentes em condições extremamente ácidas ou alcalinas, respectivamente. Em ambientes redutores, As predomina no estado de oxidação As(III), como arsenito. Nessa condição, sob valores de pH abaixo de 9,2, predomina a espécie de arsenito H_3AsO_3^0 .

As formas inorgânicas são passíveis de metilação biológica, formando os íons monometilarsênico (MMA) ou dimetilarsênico (DMA) (Smedley e Kinniburgh, 2002). Arsenito pode ocorrer mesmo em águas de ambientes oxidantes, como resultado de redução biológica do As(V) (Aurillo et al., 1994) e por causa da cinética lenta da reação de oxidação direta pelo O_2 e por causa da cinética lenta da reação de oxidação direta pelo O_2 (Masscheleyn et al., 1991).

O componente biológico pode afetar a dinâmica do As no solo. Embora em condições aeróbicas o As predomine na forma de arsenato, algumas bactérias o utilizam como aceptor final de elétrons, aumentando no solo a mobilidade do elemento que estará sob a forma de arsenito.

O conhecimento da especiação de As em um meio é importante, pois estudos têm demonstrado que a toxicidade do As depende da espécie química e de seu estado de oxidação. Formas inorgânicas são mais tóxicas que espécies orgânicas, sendo que o arsenito é mais tóxico e móvel do que o arsenato (Lin e Plus, 2000).

2.2. Adsorção de arsênio em solos e materiais de solo

O fenômeno responsável pela interação do íon em solução com a fase sólida do solo é conhecido como sorção (McBride, 1994). Os mecanismos envolvidos nesse fenômeno incluem: 1) precipitação – desenvolvimento de uma fase sólida composta por uma unidade molecular que se repete segundo um arranjo em três dimensões; 2) adsorção – acúmulo de uma espécie química nas superfícies sólidas do solo. A adsorção ocorre por meio da formação de diferentes mecanismos de complexação, os quais manifestam diferentes comportamentos quanto à facilidade de dessorção, ou seja, transferência do íon da fase sólida para a fase líquida do solo. A biodisponibilização e a mobilidade de íons no solo dependem, em grande parte, do equilíbrio mantido entre os fenômenos de adsorção e dessorção (Stigliani, 1988).

A mobilidade de solutos no solo está inversamente relacionada à sua sorção neste meio. Segundo Korte et al. (1976), é fundamental levar em consideração a capacidade adsorptiva do solo na estimativa da migração de solutos no perfil e do potencial de contaminação de águas subterrâneas.

Estudos de adsorção de As têm utilizado como adsorventes uma série de materiais que incluem óxidos de Al pouco cristalinos (Manning e Goldberg, 1997), hidróxidos de Fe pouco cristalinos (Hsia et al., 1994; Wilkie e Hering, 1996; Raven et al., 1998; Jain et al., 1999), goethita (Matis et al., 1997; O'Reilly et al., 2001), gibbsita (Ladeira et al., 2001), hematita (Xu et al., 1988; Bowell, 1994), argilas silicatadas (Xu et al., 1988; Goldberg, 2002; Violante e Pigna, 2002) e solos (Violante e Pigna, 2002; Ladeira et al., 2002; Mello et al., 2006). De modo geral, os resultados indicam que os fatores textura, natureza dos constituintes minerais, pH e natureza dos íons competidores são os mais importantes no controle dos processos de adsorção em solos. Em sistemas puros, os resultados sugerem que As possui grande afinidade por superfícies oxídicas, sendo que a magnitude e a energia de adsorção dependem principalmente do pH, da densidade de carga superficial e da presença de íons competidores.

A adsorção de As varia com o estado de oxidação e a espécie química considerada. Alguns estudos mostram que as espécies metiladas de As são adsorvidas

menos intensamente em óxidos do que as formas inorgânicas (Xu et al., 1991; Howell, 1994). Arsenato revelou maior adsorção que arsenito em óxidos de Fe pouco cristalinos (Pierce e Moore, 1980), caulinita e montmorilonita (Frost e Griffin, 1977). Nesse último trabalho, os autores verificaram que, à medida que o pH aumentou, houve incremento da sorção de As(V) até um ponto de máximo, a partir do qual a adsorção diminuiu consideravelmente. A adsorção de As(V) em caulinita e montmorilonita revelou valor máximo a valores de pH entre 4 e 6. Arsenito exibiu adsorção máxima sob pH de 4 a 9 em caulinita e a pH 7 em montmorilonita. Manning e Goldberg (1997) estudaram a adsorção de arsenito em caulinita, montmorilonita, ilita e óxidos de Al amorfos em função do pH e reportaram que a adsorção máxima ocorreu na faixa de pH de 7,5 a 9,5. Jain e Loeppert (2000) e Goldberg e Johnston (2001), trabalhando com óxidos de Fe amorfos, encontraram que, sob valores de pH maiores que 7, a adsorção de arsenito foi maior que arsenato.

Raven et al. (1998), estudando a adsorção de arsenato e arsenito em ferridrita, encontraram que a adsorção de arsenato foi maior a pH 4,6 que a pH 9,2, o que foi atribuído à geração de cargas negativas e, conseqüentemente, à repulsão das espécies H_2AsO_4^- e HAsO_4^{2-} , que predominam nessas condições de pH mais elevado. Tal resultado confirmou o encontrado por Hsia et al. (1994). Esses autores reportaram a diminuição da porcentagem de adsorção de arsenato em óxidos de Fe amorfos com o aumento do pH, e incremento dessa adsorção com a elevação da concentração de As em solução. Para arsenito, em concentrações mais altas, a adsorção ocorreu em quantidades próximas a pH 4,6 e a pH 9,2. Em concentrações de equilíbrio mais baixas, a adsorção a pH 9,2, foi, de modo geral, maior que a pH 4,6. Em decorrência de que, nessa faixa de pH, predomina a espécie neutra de arsenito (H_3AsO_3^0), concluiu-se que As(III) sofreu menor influência da repulsão de cargas negativas geradas pela elevação do pH.

A presença de íons competidores influencia a adsorção de As. Muitos trabalhos têm reportado que a presença de fosfato reduz a adsorção de arsenato em uma série de matrizes, como óxidos de Fe amorfos (Jain e Loeppert, 2000), goethita e gibbsita (Hingston et al., 1971; Manning e Goldberg, 1996a), caulinita, montmorilonita e ilita (Manning e Goldberg, 1996b). Jain e Loeppert (2000) também encontraram diminuição da adsorção de arsenito em óxidos de Fe amorfos na presença de fosfato, mesmo na presença de sítios de adsorção com maior afinidade para arsenito. A possibilidade dos íons fosfato serem competidores em relação ao arsenato deve-se ao fato de que eles se

comportam como moléculas com comportamento semelhante, assim, pode-se inferir que matrizes que adsorvam muito fosfato, como gibbsita, goethita e hematita (Fontes e Weed, 1996) serão também bons adsorvedores de arsenato.

Além disso, no processo de adsorção de arsênio, uma das características que mais interferem na capacidade do solo em atuar como superfície adsorvente para este elemento é a textura do solo. A classe textural fornece importantes informações acerca da reatividade do material, em função do aumento ou diminuição de sua superfície específica.

A adsorção de As em solos tem sido pouco estudada e, especialmente, são raros os trabalhos de caracterização da adsorção de As que contemplem a utilização de solos brasileiros. Ladeira et al. (2002) conduziram um trabalho onde se estudou a adsorção de As em 3 diferentes solos, mas cuja caracterização dificulta a extrapolação dos dados, uma vez que a classificação dos mesmos se restringiu a chamá-los de solo vermelho, solo amarelo e solo marrom. Campos et al. (2006) avaliaram o efeito da força iônica da solução de equilíbrio sobre a adsorção e dessorção de arsênio em 17 Latossolos de diferentes regiões geográficas brasileiras, utilizando o horizonte A e duas concentrações iniciais de As. Recentemente, Mello et al. (2006), estudaram fatores que influenciam na mobilização do As em amostras de solos e sedimentos, sub e superficiais, com altas concentrações de As em áreas de mineração em Minas Gerais. Esses autores observaram que em solos que apresentaram a gibbsita na composição mineralógica, foram mais eficientes em reter o As em condições redutoras.

Os estudos de adsorção de arsênio em diferentes adsorventes têm sido avaliados por isotermas de Langmuir e Freundlich (Griffin et al., 1977, Pierce e Moore, 1980, Pigna et al. 2006). O modelo matemático de adsorção proposto por Langmuir, inicialmente para descrever o comportamento dos gases, pressupõe a adsorção em uma única camada de íons adsorvidos na superfície sólida, de modo que, após a cobertura dessa camada, a adsorção não mais ocorre. Outras duas pressuposições do modelo se referem à energia de adsorção como sendo constante e independente da superfície coberta, e a outra, que as moléculas são adsorvidas em posições específicas da superfície, não havendo interação entre elas. Apesar de não corresponderem exatamente à realidade, o modelo tem sido muito utilizado para descrever o fenômeno de adsorção de arsênio em solos e materiais de solo com bons resultados obtidos.

Por outro lado, o modelo matemático proposto por Freundlich, apesar de

descrever a adsorção dos íons de modo semelhante à isoterma de Langmuir, prevê que a adsorção continua ocorrendo após a cobertura completa da superfície adsorvente por uma camada de íons, com a energia de adsorção decrescendo em função logarítmica à medida que a superfície coberta aumenta.

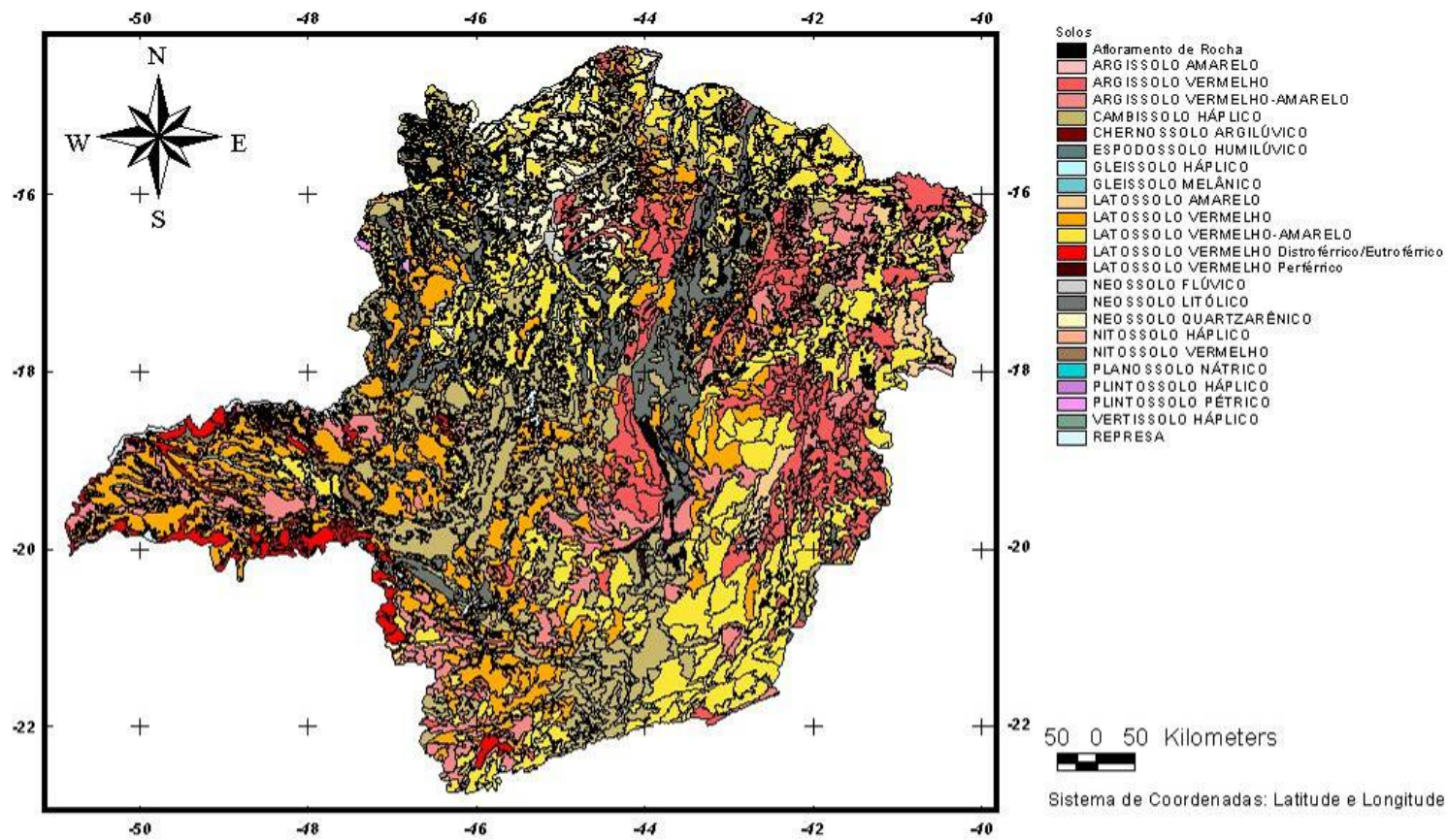
2.3. Solos do Estado de Minas Gerais

Existe uma grande variação de classes de solos em Minas Gerais. Em trabalho realizado por Lima (2007), as classes de solos de ocorrência no estado, descritas por Amaral (1993), foram reclassificadas segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Embrapa, 2006), e a distribuição, em porcentagem, pode ser observada no quadro 1 e figura 1.

Quadro 1. Ocorrência das classes de solos segundo Amaral (1993) (escala 1:1000000)

Classe de solo	Ocorrência (%)
LATOSSOLO	46,90
LATOSSOLO AMARELO	1,33
LATOSSOLO VERMELHO	17,82
LATOSSOLO VERMELHO Distro/Eutroférico	2,56
LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO	25,19
ARGISSOLO	20,97
ARGISSOLO VERMELHO	10,38
ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO	10,59
CAMBISSOLO	17,68
CAMBISSOLO HÁPLICO	17,68
NEOSSOLO	12,95
NEOSSOLO FLÚVICO	1,58
NEOSSOLO LITÓLICO	8,09
NEOSSOLO QUARTZARÊNICO	3,28
TOTAL	98,50

Fonte: Lima (2007). Reclassificados segundo Embrapa (2006)



Base cartográfica: Adaptado de Amaral (1993)

Figura 1. Mapa de solos de Minas Gerais. Fonte: Adaptado de Amaral (1993) e reclassificado segundo Embrapa (2006).

Em estudo realizado por BDMG (2002) foi apontado que as condições climáticas encontradas em grande parte do Estado de Minas Gerais são favorecedoras à formação e estabilidade das coberturas caulínicas friáveis, em que se destacam os Latossolos e Argissolos. Para Fontes (1988) e Fontes e Weed (1991) as condições climáticas típicas de formação dos solos tropicais, fazem com que os Latossolos e Argissolos apresentem elevado grau de intemperismo, apresentando mineralogia da fração argila predominantemente composta por caulinitas e óxidos de ferro e alumínio. Dentre essas duas classes de solos, os primeiros representam um total de 47 % dos solos do Estado de Minas Gerais, sendo que 25,2 % são de Latossolos Vermelho-Amarelos, 17,9 % de Latossolos Vermelhos, e 2,6 % de Latossolos Vermelhos Distrofêrricos (Amaral, 1993).

Os Latossolos são constituídos por material mineral, tendo a presença de horizonte B latossólico (Bw) imediatamente abaixo de qualquer tipo de horizonte A, dentro de 200 cm da superfície do solo ou dentro de 300 cm, se o horizonte A apresenta mais que 150 cm de espessura, para os Latossolos (Embrapa, 2006). De acordo com Ker (1998), baseado no conceito inicial estabelecido por Kellogg (1949), o termo Latossolos contemplava aqueles solos cujas características encontravam-se fortemente relacionadas à intemperização e lixiviação intensas, responsáveis pelas baixas atividades das argilas; capacidade de troca de cátions; relações moleculares sílica/alumínio ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 = \text{Ki}$) e sílica/óxidos de ferro e alumínio ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 = \text{Kr}$).

Já os Argissolos devem apresentar horizonte B textural imediatamente abaixo do A ou E, com argila de atividade baixa ou com argila de atividade alta conjugada com saturação por bases baixa e/ou caráter alítico na maior parte do horizonte B (Embrapa, 2006).

Os Cambissolos são solos não hidromórficos caracterizados essencialmente pelo horizonte B incipiente (Bi), apresentando um pequeno grau de desenvolvimento pedogenético, suficiente para distingui-lo do horizonte C, mas insuficiente para caracterizar qualquer outro tipo de horizonte B diagnóstico (Resende et al., 2007). Esses solos tendem a ocupar as vertentes mais íngremes da paisagem, inclusive as bordas das ravinas. Nesses casos, são solos rasos e sujeitos à erosão. Em regiões de ocorrência do Grupo Bambuí, Cambissolos Háplicos podem ocorrer nas áreas um pouco mais movimentadas ou mesmo acidentadas, sob influência de material de origem pelítico,

sendo caracterizados, de modo geral, por serem rasos, álicos e amarelados (Almeida, 1979).

Considerando uma abrangência mais ampla de todas essas classes de solos (Figura1), para o estado de Minas Gerais, Cambissolos e Neossolos são comumente encontrados na parte central do Estado (Carneiro e Fontes, 2005). Normalmente situando-se em porções mais elevadas da paisagem, possuindo, portanto, manto de intemperismo pouco profundo. Ao longo da Serra do Espinhaço, do Quadrilátero Ferrífero e dos planaltos e cristas da região de Lavras, esses solos correspondem às coberturas mais resistentes ao intemperismo encontradas. Na parte oeste em direção ao noroeste do estado, encontram-se zonas de Neossolos, em manchas arenitos, intercalados aos Latossolos. Na região centro-oeste, destaca-se uma grande área de Cambissolos correspondentes à região das Serras da Canastra e da Saudade. Em partes do sudoeste e oeste predominam, novamente, os Latossolos e Argissolos.

2.4. Mineralogia dos Solos

A mineralogia dos solos informa acerca de aspectos morfológicos, físicos e químicos dos solos, tais como desenvolvimento de estrutura, retenção de água, adsorção de íons e reserva de nutrientes. A constituição mineralógica dos solos está relacionada tanto com o material de origem quanto com o ambiente pedogenético que dará condições para a alteração de minerais primários para secundários.

A caulinita é o mineral secundário considerado a fase relativamente estável para a maioria dos solos (Fanning et al., 1989), sendo que os fatores que favorecem a formação deste mineral são aqueles relacionados a condições de clima quente e úmido, com drenagem livre, desde que sem lixiviação excessiva, e baixo pH (Resende et al., 2005; Resende et al., 2007). Nessas condições de clima tropical, freqüentemente apresenta baixo grau de cristalinidade (Hughes e Brown, 1979). Trata-se de um mineral silicatado composto por uma lâmina tetraédrica de silício sobreposta a uma lâmina octaédrica de alumínio, daí a denominação de mineral 1:1.

Os óxidos de ferro e de alumínio são, após a caulinita, os constituintes mais comuns encontrados nos solos tropicais. Exercem grande influência em certas características físico-químicas dos solos, como estabilidade dos agregados, reações de

troca iônica, além de serem determinantes na pigmentação nos solos. No que se refere à cor dos solos, a goethita é responsável pela coloração amarelada dos solos e a hematita pelo avermelhamento. Dentre esses minerais, o poder pigmentante da hematita é muito superior ao da goethita (Schefer et al., 1958; Resende, 1976; Fontes e Carvalho, 2005), de forma que, mesmo apresentando a coloração característica do mineral, pode estar presente no solo em pequena quantidade.

Um dos aspectos mais relevantes relacionados à presença de óxidos de ferro e alumínio em solos está relacionado com a adsorção de fosfatos. Gibbsita e óxidos de Al amorfos são os mais prováveis relacionados à adsorção de fosfato, principalmente baseada em sua relativa abundância, enquanto que goethita e hematita parecem ter mais características na adição de conteúdo que na influência de adsorção de P (Fontes e Weed, 1996).

Nos óxidos de ferro, o Fe pode ser substituído isomorficamente por muitos outros cátions metálicos, mas a substituição por Al é a que ocorre em maior proporção sob condições naturais (Schwertmann e Taylor, 1989). Essa substituição por Al impede o desenvolvimento em direção ao eixo cristalográfico Z, imprimindo na hematita uma coloração mais clara (Barrón e Torrent, 1984). Normalmente, o maior grau de substituição isomórfica nos óxidos de ferro está associado a solos mais intemperizados com maior atividade de Al (Fitzpatrick e Schwertmann, 1982; Fontes e Weed, 1991). Nos Latossolos brasileiros, têm sido encontradas substituições de Fe por Al, em hematitas, entre 4 e 17 % (Kämpf et al., 1988). Na goethita essas ocorrências também são bastante comuns, sendo que os mesmos fatores que favorecem a formação da Gt são favoráveis à substituição isomórfica no mineral (Schwertmann e Kämpf, 1985), ou seja, para que a substituição ocorra, deve haver disponibilidade de alumínio no sistema durante o processo de formação (Schwertmann e Cornell, 1991).

A presença de óxidos de titânio (anatásio) é também muito comum nos Latossolos, bem como a ocorrência de vermiculita com hidróxi nas entrecamadas (VHE) (Fontes, 1988) e, ainda que de forma menos expressiva, de mica e quartzo (Ker, 1998).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Seleção dos perfis e coleta de amostras de solos

Foram selecionados 23 perfis representativos das principais classes de solos de Minas Gerais, dos quais os horizontes A e B foram amostrados nas profundidades de 0 a 20 e de 50 a 70 cm, segundo critérios de descrição e amostragem estabelecidos por Santos et al. (2005).

A coleta de amostras ocorreu em diferentes pontos do território mineiro (Quadro2), abrangendo as 12 mesoregiões do Estado, de forma a se obter representatividade das classes de solos de Minas Gerais de maior ocorrência (Caires, 2009). De acordo com Amaral (1993), em observância do mapa de solos compilado para o Estado de Minas Gerais (escala 1:1.000.000), 17,7 % corresponde à classe dos Cambissolos Háplicos e 47 % à classe dos Latossolos, sendo 25,2 % de Latossolos Vermelho-Amarelos, 17,9 % de Latossolos Vermelhos, e 2,6 % de Latossolos Vermelhos Distroféricos

As amostras de solo foram coletadas com ferramentas de inox e acondicionadas em sacos plásticos lacrados e identificados. Na seqüência foram trazidas para as análises no Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa, onde primeiramente foram secas à sombra, peneiradas em malha de 2 mm e homogeneizadas.

Quadro 2: Classificação e localização dos solos estudados

Solo	Classificação	Município de Localização (MG)
LVA2	Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico	Prados
LVA6	Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico	Capão-Capelinha
LVA15	Latossolo Vermelho-Amarelo Eutrófico	Itacarambi
LVA19	Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico	Topázio
LVA21	Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico	Guanhães
LV5	Latossolo Vermelho Distrófico	Patos de Minas
LV7	Latossolo Vermelho Distrófico	Guimaraná
LV14	Latossolo Vermelho Eutroférico	Januária
LV22	Latossolo Vermelho Distroférico	Vazante
LV23	Latossolo Vermelho Distrófico	Prata
LV24	Latossolo Vermelho Distrófico	Santa Juliana
LB25	Latossolo Bruno Distrófico	Poços de Caldas
PVA4	Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico	Porto de Mendes
PVA8	Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico	Passos
PVA11	Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico	Almenara
PVA16	Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico	Francisco Sá-Montes Claros
PVA17	Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico	Tarumirim
PVA18	Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico	Topázio
CX1	Cambissolo Háptico Tb Distrófico	Região Metropolitana de BH
CX9	Cambissolo Háptico Tb Alumínico	Monte Carmelo
CX12	Cambissolo Háptico Tb Distrófico	Montes Claros-Bocaiúva
CX13	Cambissolo Háptico Ta Eutrófico	Lontra
RQ3	Neossolo Quartzarênico Órtico	Pintópolis

3.2. Caracterização física dos solos

3.2.1. Análise textural

Foram colocadas em contato 10 g de TFSA com 50 mL de NaOH 0,1 mol L⁻¹ e 150 mL de água deionizada em três repetições, com agitação e posterior repouso por um período de 6 horas. Este material, previamente transferido para frascos plásticos de 600 mL, foram agitados verticalmente durante 16 horas a 50 rpm. A suspensão foi passada através de peneira com malha de 0,053 mm e transferida para proveta de 500 mL, promovendo-se a separação das frações areia fina e grossa, da suspensão contendo as frações silte e argila. Esta suspensão foi transferida novamente para uma proveta de 500 mL, completando-se o volume com água deionizada, para determinação da argila pelo método da pipeta e o silte por diferença (Ruiz, 2005). As frações areia grossa e areia fina foram passadas em peneira com malha de 0,210 mm a fim de serem separadas.

3.2.2. Argila dispersa em água (ADA)

Foram pesadas 10 g de TFSA, e o material foi transferido para recipiente com 200 mL de água deionizada e deixado em repouso por um período de 6 horas. Após esse período, os materiais foram transferidos para frascos plásticos de 600 mL e agitados durante 16 horas a 50 rpm. A suspensão foi passada para proveta de 500 mL, sendo aferida com água deionizada. O cálculo do tempo de sedimentação foi feito com base na Lei de Stokes, e, passado o tempo calculado, uma alíquota de 25 mL, contendo argila, foi retirada em suspensão e transferida para béquer de vidro previamente tarado (aproximação de 0,0001 g) e levada à estufa (100 °C). Por diferença, calculou-se o peso da argila, a porcentagem de ADA e o grau de floculação (GF) (Ruiz, 2005).

3.3. Caracterização química dos solos

3.3.1. Análise para avaliação da fertilidade do solo

Foram utilizados para a caracterização química dos solos os métodos constantes em Embrapa (1997), sintetizadas a seguir. A interpretação dos resultados foi feita de acordo com a 5ª Aproximação (CFSEMG, 1999).

As determinações de pH em água e KCl 1 mol L⁻¹, foram realizadas por peagâmetro na relação solo:solução de 1:2,5 com 1 h de contato e agitação da suspensão no momento da leitura. Extração de P disponível, Na e K disponíveis foram realizadas com HCl 0,5 mol L⁻¹ + H₂SO₄ 0,0125 mol L⁻¹ (Mehlich-1) na relação solo:solução 1:10, e determinados por colorimetria (P disponível), fotometria de emissão de chama (Na e K); e por espectroscopia de absorção atômica (Ca e Mg trocáveis). O Al trocável foi determinado por titulometria após extração com KCl 1 mol L⁻¹ na relação solo:solução 1:10. A acidez potencial (Al+H) foi extraída e dosada por acetato de cálcio 0,5 mol L⁻¹ a pH 7,0.

O boro foi extraído em água quente (adaptação do método original, proposto por Gupta, 1967) e uso de chapa aquecedora, durante 5 min, adicionando-se às amostras depois de frias cinco gotas de solução de CaCl₂ a 0,1 mol L⁻¹. O extrato foi submetido a filtragem lenta, e o B na solução determinado por ICP-AES.

3.3.2. Outras análises químicas

O Fe da fração argila dos solos foi extraído, em três repetições, com ditionito-citrato (DC) (COFIN, 1963). Para tanto, foram adicionados, a 0,4 g de argila (sem matéria orgânica), previamente pesada em tubos de centrífuga, 10 mL de solução de citrato de sódio 0,2 mol/L e aproximadamente 500 mg de ditionito de sódio em pó. Os tubos foram levados a banho-maria (~ 50° C) por 30 minutos, e agitados continuamente durante este período. O material foi centrifugado, a 2000 rpm por 10 minutos, e o extrato decantado em balão volumétrico de 100 mL, que tiveram seu volume completado com água desionizada. Foram realizadas três extrações, e o Fe foi determinado por espectrofotometria de absorção atômica.

Efetuuou-se também a extração única de Fe com oxalato ácido de amônio (McKeague, 1978) com 0,4 g de argila previamente pesadas em tubos de centrífuga opacos, aos quais foram adicionados 10 mL da solução (oxalato de amônio 0,2 mol/L + ácido oxálico 0,2 mol/L a pH 3,0). Os tubos foram agitados por duas horas em agitador

horizontal, centrifugados a 2000 rpm por 10 minutos, e o extrato transferido para balão volumétrico opaco de 100 mL. A análise foi realizada em três repetições, e o Fe determinado por espectrofotometria de Absorção Atômica.

3.4. Carbono orgânico total (COT)

O carbono orgânico total (COT) foi determinado pelo método Yoemans e Bremner (1988), adaptado por Mendonça e Matos (2005), em três repetições, onde se fez a titulação do dicromato de potássio remanescente com sulfato ferroso amoniacal após o processo de oxidação por via úmida. Para tanto, foram adicionados 5 mL de $K_2Cr_2O_7$ 0,167 mol L⁻¹ e 7,5 mL de H_2SO_4 concentrado a 0,5 g de amostra de TFSA, previamente moída e passada em peneira com malha de 0,25 mm, contida em tubo de digestão. Essas amostras foram aquecidas em bloco digestor a 170 °C por 30 minutos. Após esse procedimento, o volume foi transferido para erlenmeyer utilizando-se água destilada, até obtenção de um volume aproximado de 80 mL.

A solução indicadora ferroin foi preparada por meio da dissolução de 1,485 g de o-fenantrolina e 0,695 g de $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ em 100 mL de água destilada, e, desta solução, 0,3 mL (3 gotas) foram adicionados aos erlenmeyers. O carbono foi determinado pela titulação com solução de sulfato ferroso amoniacal, o qual foi preparado em balão volumétrico de 2000 mL, adicionando-se 156,8 g de $Fe(NH_4)_2 \cdot 6H_2O$ (Sal de Mohr), 100 mL de H_2SO_4 concentrado, e o volume completado com água destilada.

3.5. Análise mineralógica

Primeiramente foi realizada a dispersão, e separação das frações argila e silte por sedimentação e a fração areia por tamisação (Embrapa, 1997) a partir da TFSA.

Para o preparo das lâminas de argila e silte natural, utilizou-se a técnica do esfregão para orientação das partículas e, para a fração areia, as lâminas escavadas foram preenchidas com este material, e fixadas com cola branca sem que houvesse movimento horizontal de orientação das partículas.

Promoveu-se a desferrificação de argila com DC, conforme Coffin (1963) para o preparo de lâminas desferrificadas, com e sem tratamento. Para o tratamento, as amostras foram saturadas por duas soluções distintas: KCl e MgCl $1,0 \text{ mol L}^{-1}$, sendo que nas lâminas que receberam tratamento com KCl foram realizadas leituras antes e após aquecimento em mufla a $550 \text{ }^\circ\text{C}$, por um período de 3 horas; e as que receberam tratamento com a segunda solução a leitura foi realizada antes e após a adição de 1 gota de glicerol, o qual é preparado com 10 mL de glicerol e 90 mL de álcool.

A análise mineralógica foi realizada por difratometria de raios-X (DRX). Empregou-se radiação $\text{CoK}\alpha$ na faixa entre 4 a $45 \text{ }^\circ 2\theta$ (lâminas naturais) e 5 a $30 \text{ }^\circ 2\theta$ (lâminas de argila que receberam tratamentos), cujos intervalos foram de $0,02 \text{ }^\circ 2\theta$ a 1 passo s^{-1} , com tensão de 40 kV e corrente de 30 mA .

3.6. Análise Termogravimétrica

As determinações termogravimétricas foram realizadas na Embrapa Cerrados no equipamento TGA 50, da Shimadzu. As amostras foram acondicionadas em célula de alumina. A termobalança funcionou com fluxo constante de atmosfera de nitrogênio. O intervalo de temperatura de análise foi entre temperatura ambiente e 800°C , a uma taxa de aquecimento de 10°C por minuto.

3.7. Ensaio de Adsorção

A capacidade máxima de adsorção de arsênio foi calculada a partir da execução de um experimento de adsorção e ajuste dos dados à equação da isoterma de Langmuir, na forma: $x/m = abC/(1 + aC)$, em que x/m é a quantidade do elemento adsorvido em mmol/kg ; b é a capacidade máxima de adsorção (CMA) do elemento pelo solo, dada em mmol/kg ; C é a concentração do elemento na solução final ou de equilíbrio (sobrenadante), dada em mmol/L ; e a é uma constante relacionada com a energia de ligação do elemento ao solo, dada em $(\text{mmol/L})^{-1}$.

O experimento de adsorção foi realizado utilizando-se soluções de NaNO_3 $0,001 \text{ mol/L}$ contendo $\text{Na}_2\text{HAsO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ nas concentrações: 0 ; $0,08$; $0,16$; $0,24$; $0,40$; $0,56$;

0,72; 0,88; 1,12; 1,36 e 1,60 mmol/L de As(V), com pH ajustado para 5,5.

A escolha do sal para preparo da solução de fundo teve como objetivo evitar uma possível precipitação do arsenato na forma de arsenato de Ca, no caso da utilização de CaCl₂. As doses de As foram escolhidas baseando-se em trabalho de Campos et al. (2007), na qual foi observado, após análise de especiação no programa MINTEQ, que a maior dose de As que poderia ser utilizada sem que houvesse precipitação de sais de arsenato era de 1,5 mmol L⁻¹.

Para fins de comparação, foi realizado ajuste dos dados à equação da isoterma de Freundlich. O coeficiente de distribuição (K_d), calculado a partir da equação $q = K_d \cdot c^{1/n}$, é a relação entre o teor do elemento ligado ao solo pelo teor do elemento solúvel.

Para o ensaio, foram utilizados, em duplicata, 50 mL de cada solução e 0,5 g de solo em tubos de centrífuga, com capacidade para 50 mL. Os solos foram colocados em suspensão por meio de agitação vertical a 45 rpm por 24 horas. As suspensões foram centrifugadas e o sobrenadante filtrado para dosagem do As por espectrometria de emissão atômica em plasma indutivamente acoplado (ICP-AES).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Características físicas dos solos

Os solos estudados diferiram substancialmente quanto à textura, mesmo dentro da mesma classe de solos (Quadro 3). Constatou-se que entre os Latossolos estudados, 75 % das amostras possuem textura argilosa a muito argilosa. Os teores médios de argila foram de aproximadamente 47 % no horizonte A e 56 % no Bw, sendo os maiores teores, 83 %, foram encontrados nos horizontes diagnósticos subsuperficiais das amostras LVA6 e LV5. Em relação à proporção de silte/argila média, o valor de 0,29 é inferior ao valor máximo de 0,5 que permite o enquadramento do horizonte subsuperficial na definição de Bw pelo SiBCS (Embrapa, 2006). Esses solos possuem, portanto, pequena proporção de partículas do tamanho silte, mas proporções bastante diferenciadas de areia e argila, de forma a serem enquadrados em classes texturais desde franco-arenosos (LV23 e LVA15), até muito argilosos (LB25, LV5, LVA2 e LVA6).

Os menores teores de silte + argila se devem ao material de origem derivado de rochas graníticas, como ocorre em nos locais de coleta situados em Itacarambi (LVA15)

Quadro 3. Caracterização granulométrica dos perfis estudados

Horizonte	Areia grossa	Areia fina	Silte	Argila	ADA ^{1/}	GF ^{2/}	Silte	Classe textural
	-----%-----					%	Argila	
LVA2 – Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico								
A	13	10	13	64	16	75	0,20	Muito Argilosa
Bw	12	9	11	68	13	81	0,16	Muito Argilosa
LVA6 – Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico								
A	3	4	13	80	8	90	0,16	Muito Argilosa
Bw	2	3	12	83	13	84	0,14	Muito Argilosa
LVA15 – Latossolo Vermelho-Amarelo Eutrófico								
A	19	57	13	11	4	64	1,18	Franco-Arenosa
Bw	13	50	10	27	5	81	0,37	Franco-Argilo-Arenosa
LVA19 – Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico								
A	34	8	10	48	15	69	0,20	Argila
Bw	25	6	7	62	22	65	0,11	Muito Argilosa
LVA21 – Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico								
A	17	9	18	56	14	75	0,32	Argila
Bw	14	7	11	68	21	69	0,16	Muito Argilosa
LV5 – Latossolo Vermelho Distrófico								
A	7	5	23	65	6	91	0,35	Muito Argilosa
Bw	3	3	11	83	12	86	0,13	Muito Argilosa
LV7 – Latossolo Vermelho Distrófico								
A	5	37	29	29	6	79	1,00	Franco-Argilosa
Bw	4	32	24	40	6	85	0,60	Argilosa
LV14 – Latossolo Vermelho Eutroférico								
A	14	41	15	30	7	77	0,5	Franco-Argilo-Arenosa
Bw	10	36	12	42	8	81	0,28	Argilo-Arenosa
LV22 – Latossolo Vermelho Distroférico								
A	15	10	33	42	12	71	0,78	Argila
Bw	14	11	23	52	14	73	0,63	Argila
LV23 – Latossolo Vermelho Distrófico								
A	27	55	7	14	5	63	0,5	Franco-Arenosa
Bw	20	57	6	17	5	80	0,35	Franco-Arenosa
LV24 – Latossolo Vermelho Distrófico								
A	14	41	15	30	7	76	0,5	Franco-Argilo-Arenosa
Bw	10	36	12	42	8	81	0,28	Argilo-Arenosa
LB25 – Latossolo Bruno Distrófico								
A	9	6	21	64	6	91	0,33	Muito Argilosa
Bw	7	4	20	69	13	87	0,29	Muito Argilosa
PVA4 – Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico								
A	30	10	23	37	16	57	0,62	Franco-Argilosa
Bt	20	7	17	56	28	50	0,30	Argila

^{1/} Argila dispersa em água obtida a partir de agitação lenta; ^{2/} Grau de floculação.

Quadro 3. Caracterização granulométrica dos perfis estudados (cont.)

Horizonte	Areia grossa	Areia fina	Silte	Argila	ADA ^{1/}	GF ^{2/}	Silte	Classe textural
	------%-----					%	Argila	
PVA8 – Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico								
A	19	34	25	22	2	91	1,14	Franco-Argilo-Arenosa Argilo-Arenosa
Bt	20	28	12	40	9	78	0,30	
PVA11 – Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico								
A	32	22	23	23	8	84	1,00	Franco-Argilo-Arenosa Franco-Argilo-Arenosa
Bt	35	24	8	33	12	85	0,24	
PVA16 – Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico								
A	8	7	51	34	17	50	1,50	Franco-Argilo-Siltosa Argilo-Siltosa
Bt	3	3	44	50	23	54	0,88	
PVA17 – Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico								
A	23	20	14	43	7	84	0,33	Argila Muito Argilosa
Bt	15	11	8	66	10	85	0,12	
PVA18 – Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico								
A	48	20	7	25	6	65	0,28	Franco-Argilo-Arenosa Argilo-Arenosa
Bt	32	19	5	44	7	69	0,11	
CX1 – Cambissolo Háptico Tb Distrófico								
A	2	2	74	22	20	9	3,36	Franco-Siltosa Franco-Argilo-Siltosa
Bi	3	2	58	37	19	49	1,56	
CX9 – Cambissolo Háptico Tb Aluminico								
A	29	31	23	17	10	41	1,35	Franco-Arenosa Franco
Bi	28	11	42	19	12	37	2,21	
CX12 – Cambissolo Háptico Tb Distrófico								
A	8	11	48	33	21	36	1,45	Franco-Argilo-Siltosa Argilo-Siltosa
Bi	5	6	47	42	17	60	1,11	
CX13 – Cambissolo Háptico Ta Eutrófico								
A	10	3	52	35	13	63	1,48	Franco-Argilo-Siltosa Franco-Argilo-Siltosa
Bi	9	3	49	39	18	54	1,25	
RQ3 – Neossolo Quartzarênico								
A	51	37	5	7	5	63	0,71	Areia-Franca

^{1/} Argila dispersa em água obtida a partir de agitação lenta; ^{2/} Grau de floculação.

e Prata (LVA15), e os maiores teores (superior a 90 %) foram encontrados em amostra de Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA6), originalmente localizado entre os municípios de Capão e Capelinha-MG, derivado de rochas de granulometria mais fina do Grupo Macaúbas.

Os Argissolos, por definição, apresentam relação textural B/A entre os horizontes sub e superficiais, de acordo com requisitos previstos para a classe no SiBCS

(Embrapa, 2006). Assim, relações menores que 1,5 foram encontradas nas amostras PVA11 e PVA16, ambas de solos originalmente situados na porção norte do Estado de Minas Gerais. Entretanto, estes solos apresentaram características adicionais de campo, como cerosidade no mínimo moderada e comum, que permitiram o enquadramento na classe dos Argissolos.

Os teores de argila médios foram aproximadamente de 31 % no horizonte superficial e de 48 % no Bt, sendo que os maiores teores encontrados, 66 %, correspondem ao horizonte Bt da amostra PVA17, que, dentre os Argissolos estudados, é a única amostra enquadrada na classe textural muito argilosa (Quadro 3). Quanto aos teores de silte + argila, a média no horizonte Bt dos Argissolos estudados foi de 63 %, enquanto no horizonte superficial esta média foi de 55 %, indicando a maior participação de partículas de granulometria mais fina no horizonte diagnóstico. A relação silte/argila média no horizonte Bt dos Argissolos foi similar ao valor médio encontrado para os Latossolos, evidenciando que os solos de ambas as classes encontram-se em avançado estágio de intemperização.

Para a classe dos Cambissolos, os maiores teores de argila, 42 %, correspondem ao horizonte Bi da amostra CX12. Os teores médios para esta fração são de aproximadamente 27 % (horizonte A) e de 34 % (Bi), valores inferiores aos correspondentes dos Latossolos e Argissolos. Resultados de silte + argila apresentaram teores máximos de 96 %, com grande participação da primeira fração, inclusive no horizonte diagnóstico. Teores elevados de argila dispersa em água (ADA), associados ao baixo grau de floculação (GF) e elevada relação silte/argila (Quadro 3), sugerem, para os Cambissolos estudados, menor pedogênese e menor capacidade de percolação de água devido à descontinuidade do sistema poroso, tanto por questões texturais, quanto pela mineralogia da fração argila, predominantemente caulínica e micácea.

Na amostra CX9, diferentemente de outros Cambissolos estudados, as frações silte e argila, somadas, alcançaram percentual de 40 % (Quadro 3), o que se deve ao material de origem advindo de rochas mais areníticas do Grupo Araxá. Solos desenvolvidos dessa geologia são normalmente cascalhentos, por vezes pedregosos, de textura média e com argila de atividade baixa. Nessa amostra, maiores teores de argila encontrados no Bi possivelmente foram favorecidos pela textura mais grosseira do material de origem, com eventual iluviação de materiais finos, no entanto, não permitindo o enquadramento como Bt pelo atual SiBCS (Embrapa, 2006).

A amostra CX13, correspondente de solo derivado de rochas calcárias da formação Lagoa do Jacaré (Grupo Bambuí), possui, por essa razão, granulometria mais fina comparado ao solo anterior. A relação silte/argila é da ordem de 1,6, refletindo o material de origem e a pouca intemperização desses solos, possivelmente em decorrência de uma maior resistência do material (macividade) e menor capacidade de infiltração de água. Na região de Montes Claros, local de coleta do CX12, há grande influência de material pelítico do Grupo Bambuí, com os solos tendendo a apresentar características relacionadas à sub-horizontalidade do material de origem.

A amostra de Neossolo Quartzarênico apresentou 7 % de argila, e 5 % de silte (Quadro 3), indicando grande participação de areia grossa e areia fina no solo, como esperado para a classe, tendo como principais influências negativas as baixas capacidade de retenção de água desses solos e de reserva de nutrientes às plantas.

4.2. Características químicas dos solos

Em todos os solos estudados, os valores de pH em água foram sempre maiores que os valores de pH em KCl (Quadro 4), indicando balanço de cargas negativo na superfície dos colóides do solo. Nos Latossolos, o menor déficit de cargas negativas em relação às demais classes de solos indica estágio mais avançado de intemperismo, pela maior presença óxidos de Fe e Al na fração argila desses solos (vide mineralogia).

Em relação aos Latossolos Vermelho-Amarelos, conforme critérios de avaliação da fertilidade do solo estabelecidos pela CFSEMG - 5ª aproximação (Alvarez V. et al., 1999), estes são, em sua maioria, distróficos e ácidos, com exceção do LVA15, cuja eutrofia se estende por todo o perfil. Este Latossolo Vermelho-Amarelo eutrófico se localiza nas proximidades de Itacarambi-MG, o que sugere participação de material carbonático da Formação Sete Lagoas (Grupo Bambuí). A saturação por bases elevada, superior a 80 %, se deve aos teores relativamente elevados de Mg^{2+} e Ca^{2+} e, principalmente aos teores de K^+ (Quadro 4), considerados muito bons, conforme critérios estabelecidos pela 5ª aproximação (Alvarez V. et al., 1999).

Os demais Latossolos Vermelho-Amarelos (LVA2, LVA6, LVA19 e LVA21) além de distróficos, apresentam, com exceção do último, alta a muito alta saturação por alumínio, mas acidez trocável inferior a $4 \text{ cmol}_c / \text{dm}^3$ (Quadro 4), não suficiente para o

Quadro 4: Características químicas dos perfis estudados

Hor.	pH		PCZ ^{1/}	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Al ³⁺	H ⁺ Al	Valor S	CTCr	Valor T	V	m	CO	P	P _{rem}	Zn	Fe	Mn	Cu	B	S
	H ₂ O	KCl																					
-----cmol _c dm ⁻³ -----										-----%-----		dag kg ⁻¹		mg L ⁻¹		-----mg dm ⁻¹ -----							
LVA2 – Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico																							
A	4.94	4.29	3.64	0.86	0.26	0.15	0.00	0.51	3.66	1.27	7.71	4.93	25.70	28.40	2.73	0.56	10.06	2.48	139.93	4.94	4.29	5.10	0.21
Bw	4.98	4.83	4.68	0.00	0.04	0.02	0.00	0.11	2.08	0.06	3.15	2.14	2.70	65.60	0.91	0.25	4.91	0.16	38.38	4.98	4.83	0.00	0.16
LVA6 – Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico																							
A	4.94	4.25	3.56	0.02	0.09	0.12	0.00	0.51	4.42	0.23	5.81	4.65	4.90	68.8	2.99	4.33	6.61	0.69	234.21	4.94	4.25	0.00	0.08
Bw	5.07	4.86	4.65	0.00	0.00	0.04	0.00	0.04	2.81	0.04	3.43	2.85	1.30	49.0	1.66	0.40	4.41	0.21	46.15	5.07	4.86	0.00	0.21
LVA15 – Latossolo Vermelho-Amarelo Eutrófico																							
A	6.71	5.55	4.39	2.56	0.78	0.46	0.00	0.01	0.84	3.79	42.12	4.63	81.80	0.10	1.05	2.47	38.60	1.57	18.31	88.36	0.14	3.04	0.39
Bw	5.85	4.62	3.39	2.77	0.42	0.46	0.00	0.04	0.93	3.33	15.81	4.27	78.10	1.00	0.55	0.98	35.34	1.14	14.30	36.00	0.91	7.40	0.08
LVA19 – Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico																							
A	5.06	4.01	2.96	0.80	0.36	0.32	0.00	0.75	2.63	1.48	2.23	8.57	36.0	33.5	1.55	1.63	25.95	0.63	119.68	3.36	0.09	12.67	0.44
Bw	5.07	3.98	2.89	0.51	0.22	0.03	0.00	1.20	2.08	0.76	1.97	4.59	26.7	61.2	0.73	1.55	19.99	0.35	121.38	2.35	0.00	35.16	0.20
LVA21 – Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico																							
A	5.70	4.60	3.5	1.43	0.66	0.10	0.00	0.14	3.27	2.19	2.33	9.74	40.10	6.10	2.20	1.22	12.83	0.66	60.14	114.00	0.68	0.00	0.3
Bw	4.87	4.70	4.53	0.17	0.13	0.03	0.00	0.14	1.93	0.34	0.48	3.34	14.70	29.80	0.79	2.10	7.04	0.40	72.14	18.34	1.04	4.18	0.02
LV5 – Latossolo Vermelho Distrófico																							
A	4.50	4.05	3.60	0.66	0.15	0.14	0.00	2.23	9.96	0.95	3.19	16.79	8.70	70.1	8.22	2.13	3.88	1.12	80.55	11.35	0.26	0.00	0.34
Bw	4.81	4.34	3.87	0.23	0.06	0.10	0.00	0.84	6.33	0.38	1.22	8.09	5.70	68.6	3.29	0.52	2.91	0.29	85.10	4.43	0.60	0.00	0.38
LV7 – Latossolo Vermelho Distrófico																							
A	4.87	3.96	3.05	0.24	0.18	0.19	0.00	1.17	2.87	0.61	1.78	12.00	17.40	65.90	1.55	0.81	18.65	1.18	136.96	4.89	0.76	0.74	0.02
Bw	5.32	4.29	3.26	0.04	0.06	0.19	0.00	0.45	2.08	0.52	0.96	6.50	19.80	46.30	0.95	0.33	10.53	0.60	72.48	1.00	0.82	2.35	0.19

^{1/} PCZ estimado, calculado segundo equação: $2 \text{pH}_{\text{H}_2\text{O}} - \text{pH}_{\text{KCl}}$ (Keng e Uehara, 1974)

Quadro 4: Características químicas dos perfis estudados (Cont.)

Hor.	pH		PCZ ^{1/}	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Al ³⁺	H+Al	Valor S	CTCr	Valor T	V	m	CO	P	P _{rem}	Zn	Fe	Mn	Cu	B	S
	H ₂ O	KCl																					
PVA16 – Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico																							
A	6.05	4.90	3.75	2.33	1.99	0.64	0.0	0.08	2.02	4.95	5.03	20.52	70.9	1.60	2.60	1.80	32.20	4.64	27.32	68.08	0.21	3.72	0.37
Bt	4.26	3.73	3.2	0.71	1.09	0.36	0.0	1.54	2.99	2.16	3.69	10.30	41.8	41.6	0.90	1.06	22.43	1.26	24.79	26.75	0.18	9.92	0.11
PVA17 – Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico																							
A	5.61	4.80	3.99	1.13	0.50	0.15	0.0	0.05	1.45	1.78	1.83	7.50	55.1	2.80	1.50	0.62	19.55	0.66	125.05	120.27	3.07	4.64	0.21
Bt	5.47	5.18	4.89	0.86	0.53	0.03	0.0	0.05	1.08	1.42	1.47	3.80	56.70	3.50	0.50	0.89	8.06	0.47	45.93	11.06	1.91	22.77	0.02
PVA18 – Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico																							
A	5.19	4.21	3.23	1.40	0.55	0.24	0.0	0.51	3.90	2.19	2.69	24.37	35.90	18.70	2.90	7.30	19.14	4.19	62.28	149.65	0.07	15.43	0.53
Bt	4.60	3.86	3.12	0.41	0.29	0.10	0.0	1.05	2.05	0.81	1.86	6.51	28.30	56.40	0.80	2.20	28.60	0.67	105.61	9.38	0.00	16.34	0.17
CX1 – Cambissolo Háplico Tb Distrófico																							
A	5.36	4.20	3.04	0.71	0.51	0.41	0.00	0.35	1.48	1.63	14.15	3.11	52.4	17.8	1.75	1.18	33.51	1.82	276.27	119.05	1.03	5.10	0.17
Bi	4.95	3.84	2.73	0.33	0.09	0.07	0.00	2.57	2.54	0.49	8.18	3.03	16.1	84.0	0.91	0.58	14.06	0.49	162.79	2.84	0.79	1.66	0.23
CX9 – Cambissolo Háplico Tb Aluminico																							
A	5.19	3.95	2.71	0.74	0.18	0.20	0.00	1.57	2.08	1.12	18.86	3.21	34.9	58.2	1.05	1.54	26.06	1.39	180.05	5.19	3.95	20.48	0.09
Bi	5.22	3.87	2.52	0.43	0.08	0.10	0.00	4.93	3.54	0.62	21.88	4.16	14.8	88.8	0.49	0.36	14.60	0.77	59.36	5.22	3.87	14.97	0.2
CX12 – Cambissolo Háplico Tb Distrófico																							
A	5.46	3.84	2.22	0.86	0.60	0.40	0.00	1.84	3.75	1.86	17.01	5.61	33.10	49.60	1.80	1.31	18.93	1.55	239.04	5.46	3.84	2.35	0.41
Bi	4.71	3.81	2.91	0.43	0.10	0.12	0.00	3.75	3.81	0.65	10.62	4.46	14.50	85.20	1.14	0.81	14.38	1.35	143.72	4.71	3.81	3.72	0.4
CX13 – Cambissolo Háplico Ta Eutrófico																							
A	5.73	5.06	4.39	7.75	1.20	0.41	0.00	0.08	1.90	9.36	32.18	11.26	83.1	0.80	1.83	2.28	31.60	4.80	21.92	5.73	5.06	2.12	0.21
Bi	6.12	5.12	4.12	8.83	0.99	0.31	0.00	0.02	1.60	10.13	30.09	11.73	86.3	0.20	2.25	1.87	29.19	4.63	16.13	6.12	5.12	6.25	0.19
RQ3 – Neossolo Quartzarênico Órtico																							
A	4.96	4.10	3.24	0.15	0.13	0.05	0.0	0.75	1.45	0.32	1.07	25.32	18.20	69.7	0.70	3.24	38.68	1.86	22.69	5.49	0.86	40.67	0.09

^{1/} PCZ estimado, calculado segundo equação: $2 \text{pH}_{\text{H}_2\text{O}} - \text{pH}_{\text{KCl}}$ (Keng e Uehara, 1974)

Quadro 4: Características químicas dos perfis estudados (Cont.)

Hor.	pH		PCZ ^{1/}	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	Al ³⁺	H+Al	Valor S	CTCr	Valor T	V	M	CO	P	P _{rem}	Zn	Fe	Mn	Cu	B	S
	H ₂ O	KCl																					
										-----cmol _c dm ⁻³ -----													
										-----%-----													
										dag kg ⁻¹													
										-----mg L ⁻¹ -----													
										-----mg dm ⁻³ -----													
LV14 – Latossolo Vermelho Eutroférico																							
A	6.17	5.49	4.81	8.21	1.09	0.25	0.00	0.04	1.81	9.56	9.59	37.89	84.0	0.30	2.20	5.66	28.05	6.44	10.69	390.23	0.40	0.00	0.45
Bw	6.19	5.03	3.87	6.96	0.33	0.15	0.00	0.02	1.51	7.44	7.46	21.31	83.1	0.20	0.94	4.39	28.31	4.21	14.31	168.47	0.94	8.08	0.09
LV22 – Latossolo Vermelho Distroférico																							
A	6.27	6.08	5.89	12.3	1.22	0.50	0.00	0.04	1.36	14.01	14.04	36.58	91.1	0.20	2.87	19.43	24.06	96.39	13.29	107.50	0.22	11.98	0.24
Bw	5.26	4.59	3.92	0.09	0.09	0.04	0.00	0.14	2.02	0.21	0.36	4.30	9.5	39.9	0.69	1.42	6.66	2.61	64.91	144.27	1.08	0.97	0.04
LV23 – Latossolo Vermelho Distrófico																							
A	5.97	4.38	2.79	1.13	1.21	0.33	0.00	0.23	2.21	2.67	2.90	34.82	54.7	8.00	1.15	1.58	26.52	1.68	127.62	85.05	0.97	1.89	0.23
Bw	4.84	4.06	3.28	0.07	0.07	0.00	0.00	1.54	2.08	0.17	1.71	13.29	7.70	89.8	0.43	0.92	14.39	0.35	98.93	12.82	0.71	13.36	0.04
LV24 – Latossolo Vermelho Distrófico																							
A	4.89	3.82	2.75	0.37	0.11	0.15	0.00	1.42	6.57	0.63	2.05	12.20	8.7	69.10	4.04	3.11	9.86	1.41	161.36	3.59	2.02	0.00	0.43
Bw	5.28	5.59	5.9	0.07	0.02	0.00	0.00	0.05	1.60	0.09	0.14	2.64	5.4	36.00	0.77	2.64	0.37	0.23	34.40	4.64	2.13	0.28	0.09
LB25 – Latossolo Bruno Distrófico																							
A	4.83	3.96	3.09	1.37	0.41	0.29	0.0	2.32	4.39	2.07	4.39	10.09	32.0	52.80	1.87	0.59	5.16	1.86	64.44	107.86	0.23	1.20	0.17
Bi	5.13	4.04	2.95	0.24	0.13	0.26	0.0	2.29	3.93	0.63	2.93	6.62	13.8	78.30	0.77	2.09	2.17	0.44	29.21	26.34	0.04	2.58	0.02
PVA4 – Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico																							
A	5.33	4.38	3.43	3.16	1.21	0.66	0.0	0.17	3.60	5.03	5.21	23.33	58.3	3.30	3.25	3.91	26.76	4.42	150.70	69.80	1.41	0.00	0.28
Bt	5.15	4.38	3.61	0.86	0.17	0.10	0.0	0.35	1.51	1.12	1.48	4.70	42.6	24.00	0.80	0.67	6.67	0.50	46.95	2.64	0.60	10.15	0.22
PVA8 – Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico																							
A	7.19	6.46	5.73	13.20	3.00	0.83	0.0	0.05	0.69	17.12	17.17	80.94	96.1	0.30	6.40	5.69	37.18	7.63	23.87	228.97	0.25	0.00	0.82
Bt	5.66	4.65	3.64	2.30	0.55	0.20	0.0	0.11	2.21	3.04	3.16	13.13	57.9	3.50	1.20	0.52	13.34	1.03	119.01	85.37	3.09	1.89	0.17
PVA11 – Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico																							
A	6.56	5.46	4.36	2.53	0.91	0.49	0.0	0.04	0.93	3.93	3.96	21.13	80.8	0.90	1.20	3.38	38.94	4.64	27.32	68.08	0.21	3.27	0.31
Bt	5.96	5.01	4.06	1.56	0.32	0.12	0.0	0.03	0.93	2.00	2.03	8.90	68.2	1.40	0.70	1.69	38.00	1.26	24.79	26.75	0.18	6.02	0.20

^{1/} PCZ estimado, calculado segundo equação: $2 \text{pH}_{\text{H}_2\text{O}} - \text{pH}_{\text{KCl}}$ (Keng e Uehara, 1974)

enquadramento no critério alumínico ou alítico pelo SiBCS (Embrapa, 2006).

Os teores de P extraídos pelo Mehlich-1, bem como teores de P-rem, mostraram-se baixos ou muito baixos em todos os perfis dos Latossolos (Alvarez V. et al., 1999) (Quadro 4). Nos Latossolos Vermelhos, o comportamento do fósforo reflete ainda a mineralogia do solo. Conforme Fontes e Weed (1996), óxidos de ferro cristalinos são os principais adsorvedores de fósforo, sendo que a goethita aparentemente adsorve mais do que a hematita, e a gibbsita, tem seu papel fundamental na adsorção principalmente relacionado à abundância do mineral. É possível observar nos resultados que os Latossolos Vermelhos de textura muito argilosa, correspondendo às amostras LV5 e LV24 (Quadro 3), e que apresentaram pronunciados picos desses três minerais no difratogramas (vide mineralogia), exibiram também menores teores de P-rem em relação aos demais solos estudados. Semelhantemente a esse solo, o Latossolo Bruno estudado, apresentou teores muito baixos de P-rem em função da mineralogia goethítica e com grande presença de gibbsita (vide mineralogia), além da textura muito argilosa desse solo.

Outro aspecto a ser salientado que envolve os Latossolos Vermelhos é a alta afinidade entre os micronutrientes e os óxidos de Fe e Mn. Os teores de Fe e Mn foram, de modo geral, altos, e os Cu e Zn foram considerados mais elevados nas amostras LV7 e LV22, respectivamente. Estes dois elementos tendem a se concentrar em solos derivados de rochas ígneas básicas, enquanto o boro tende a predominar em rochas sedimentares (Abreu et al., 2007), motivo pelo qual os teores deste elemento foram muito baixos.

Para a classe dos Argissolos, valores variáveis de saturação por bases e de saturação por alumínio ocorrem em razão de estes solos serem, parte deles, eutróficos (PVA8 e PVA17), e os demais (PVA4, PVA11, PVA16, PVA18), distróficos ou álicos (Quadro 4). Porém, uma das características mais marcantes está relacionada aos teores de micronutrientes nos horizontes superficiais desses solos, estando entre os maiores dentre todos os solos estudados. A ciclagem de nutrientes no horizonte A, assim como a afinidade de alguns elementos pela matéria orgânica possivelmente são os responsáveis por esse acúmulo.

Nos solos eutróficos são elevados também os teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} em todo perfil, principalmente no horizonte superficial. Mesmo nos solos distróficos desta classe, é comum o horizonte superficial possuir elevada saturação por bases, conferindo

caráter epieutrófico a esses solos (PVA4 e PVA16). Isso influencia nos valores de pH dos solos, que tendem a ser mais elevados do que nos Latossolos, destacando-se o PVA8, classificado como sendo de alcalinidade fraca pela 5ª aproximação.

Em relação aos Cambissolos, estes apresentaram acidez fraca a elevada pela 5ª aproximação (Alvarez V. et al., 1999), com valor médio de pH dos perfis em torno de 5,5. Esses valores encontram-se acima dos valores estimados do PCZ dos solos, havendo, portanto, maior predominância de cargas negativas nesses solos na faixa de pH em que se encontram, comparado com as demais classes de solos, provavelmente devido à maior presença de minerais com cargas negativas decorrentes de substituição isomórfica, como as micas (vide mineralogia). Os teores elevados de P-rem nesses solos podem estar relacionados, entre outros fatores, com este balanço de cargas negativas existente.

Os solos distróficos dentre os Cambissolos, representados pelas amostras CX1, CX9 e CX12, apresentaram teores de Al^{3+} elevados, principalmente nesta segunda amostra, cujos valores superiores a $4\text{ cmol}_c\text{ dm}^{-3}$, somados a uma saturação por alumínio superior a 50 %, foram suficientes para seu enquadramento no caráter aluminico, segundo Embrapa (2006). Os teores de alumínio elevados nem sempre se devem à intemperização intensa do solo, mas ao material pelítico. Ou seja, os baixos teores de bases e a presença de muito Al na estrutura da muscovita e do feldspato fazem com que solos jovens, desenvolvidos de rochas pelíticas, tenham altos teores de Al trocável, enquanto que nos solos mais velhos os teores de Al em solução tendem a ser menores, pois há a formação de gibbsita (Resende et al., 2007). Dessa forma, esses solos apresentaram baixa soma de bases, com resultados de Ca^{2+} e Mg^{2+} sendo considerados de muito baixos a médios em todos os perfis. Por outro lado, elevados teores de K^+ foram encontrados, sendo que este elemento é considerado o mais comum em solos derivados de rochas pelíticas, consequência da mineralogia composta, principalmente, de materiais micáceos, e provavelmente de uma maior substituição de Al pelo Si, permitindo a manutenção do K na estrutura das micas.

A amostra CX13, que representa um Cambissolo Háplico Ta Eutrófico, foi a única a apresentar elevada saturação por bases, com média de 84 %, o que se deve aos teores de magnésio e cálcio trocáveis bastante elevados, em decorrência do material de origem calcário, como foi anteriormente abordado. De um modo geral, portanto, os Cambissolos em relação aos macroelementos de maior interesse, são ricos somente em

potássio, sendo pobres em cálcio, magnésio e fósforo. Como pode ser observado no Quadro 4, os teores de P extraído pelo Mehlich-1 foram muito baixos, bem como os teores de enxofre, de acordo com a 5ª aproximação.

Em relação aos teores de micronutrientes desses solos, destacam-se os teores de manganês e ferro disponíveis bastante elevados, principalmente no CX1, em decorrência do material de origem ferrífero (Quadro 4). A presença de óxidos no solo é de fundamental importância, pois são eles que praticamente controlam a solubilidade do elemento, que é muito influenciada pelo pH e pelo potencial de oxirredução no solo (Lindsay, 1979; Abreu et al., 2007). Por outro lado, na amostra CX13, os teores de ferro disponível são considerados muito baixos pela 5ª aproximação, devido a pouca presença do elemento no material de origem, o que também pode ser observado pela ausência de picos indicativos de óxidos nos difratogramas desse solo (vide mineralogia). Quanto aos teores de boro, Resende et al. (2007) afirma que em solos derivados de rochas pelíticas estes tendem a serem maiores, sendo mais concentrados em sedimentos de origem marinha. Entretanto, essa tendência não pôde ser observada, uma vez que os teores de boro foram, de modo geral, baixos ou muito baixos em todos os perfis. Na faixa de pH da maioria dos solos, o boro ocorre na solução do solo na forma de ácido bórico não dissociado (H_3BO_3), sendo por isso muito susceptível a perdas por lixiviação (Furtini Neto et al., 2001).

As características químicas do Neossolo Quartzarênico estudado envolvem valores muito baixos de macro e micronutrientes, conferindo baixa saturação por bases e alta saturação por alumínio, apesar dos teores de acidez trocável e acidez potencial também serem baixos. A acidez desses solos, tida como elevada pela 5ª aproximação (Alvarez V. et al., 1999) possivelmente ocorre em função da alta concentração de H_4SiO_4 , advindo do intemperismo do quartzo.

4.3. Características mineralógicas dos solos

4.3.1. Fração argila

Os minerais constituintes da fração argila dos solos estudados, apresentados nos

difratogramas de raios-X (DRX) (Figuras 8 a 21), são minerais secundários característicos de solos intemperizados, sendo que a presença da caulinita prevalece nesta fração. Além desta, hematita, goethita, gibbsita, micas, magnetita, VHE, foram encontrados, além de quartzo na fração argila do Neossolo Quartzarênico.

Em todos os solos são comuns picos em 0,71, 0,43, 0,35, 0,24 e 0,23 nm, devidos à caulinita.

A goethita parece ser a forma mais estável e abundante de óxido de ferro nos Latossolos (Resende, 1976), o é confirmado pela presença de picos em 0,41 e 0,26 nm em todas as amostras desta classe. Os fatores que favorecem a formação de goethita em detrimento da hematita, são temperaturas menos elevadas, alta atividade de H₂O, altos conteúdos de matéria orgânica e menor liberação de ferro pelo material de origem (Schwertmann e Taylor, 1989). Associação entre goethita e hematita é característica muito comum para a maioria dos solos de regiões tropicais.

A hematita muitas vezes aparece em pequenas quantidades, como ocorre nos Latossolos Vermelho-Amarelos. Sabe-se que apenas 1 % de hematita de tamanho pequeno é capaz de dar a cor vermelha aos solos (Scheffer, 1957; Resende, 1976; Fontes e Carvalho, 2005). Nos Latossolos Vermelhos, picos em 0,26 e 0,25 nm (Hm) são mais pronunciados. Picos característicos de maghemita/magnetita foram constatados nas amostras LV7 e LV24 (Figuras 11 e 12). Esses dois minerais, em razão da coincidência de seus picos, são de difícil distinção apenas por meio de difratograma de raios-X. Porém, por se tratar da fração argila, muitos autores pressupõem tratar-se de maghemita, a qual teria sua origem ligada à oxidação total ou parcial da magnetita herdada do material de origem (Fontes e Weed, 1991) ou mesmo pela transformação de outros óxidos de ferro pedogenéticos por aquecimento (Schwertmann e Fechter, 1984).

Micas na fração argila de Latossolos de um modo geral são comuns, mas em muitos casos são encontradas apenas em pequenas quantidades. Diversos autores referem-se a micas na fração argila, como illita. Trata-se de minerais micáceos cujas camadas são consideradas não-expansivas, e cujas lamina octaédricas são dioctaédricas. Algumas micas dioctaédricas parecem resistir na fração argila até mesmo em solos altamente alterados, ao menos como camadas de micas interestratificadas (Fanning et al., 1989).

No Latossolo Bruno, as micas estão presentes em quantidade bastante considerável, mas a caulinita ainda é o argilomineral predominante (Figura 13). Muitos

Latossolos Brunos do Sul do Brasil apresentam mineralogia composta de vermiculita com hidróxi nas entrecamadas (Ker, 1998), e ausência de gibbsita, provavelmente em razão do efeito anti gibbsitítico da VHE (Jackson, 1964). Porém, semelhantemente a outros Latossolos Brunos de Minas Gerais, foi observado pico expressivo de gibbsita, em detrimento de ilhas de Al-hidróxi. Possivelmente por serem os solos de Minas Gerais mais alterados quimicamente, apresentam maior propensão à formação e estabilidade de um componente oxidico. A cor bruno-amarelada do solo é conferida pela goethita, óxido de ferro hidratado comumente encontrado em solos de regiões altimontanas e de climas frios.

Nos demais Latossolos, a presença de gibbsita é variável, sendo que nos solos mais intemperizados e ácidos, os picos em 0,48, 0,43 e 0,24 nm são bastante pronunciados, como pode se observar nas amostras LVA6, LV5 e LV7 (Figuras 8, 10 e 11). A formação deste mineral está relacionada com ambientes de pH ligeiramente ácido e baixa atividade de sílica no sistema. Caulinita e gibbsita podem coexistir no solo quando a atividade de sílica encontra-se em torno de 10^{-3} ou 10^{-5} mol/L e pH em torno de 6 (Lindsay, 1979). Em condições diferentes dessas, isso ainda é possível devido à cinética lenta da reação, sendo ainda que elevados teores de ferro favorecem a formação da gibbsita em solos (Resende et al., 2005).

Na presença de gibbsita, a ocorrência de VHE em amostra de Latossolo Vermelho (LV7) é fato pouco esperado, mas é corroborado por trabalho desenvolvido por Pereira (2008), onde a presença do mineral em solo de mesma classe é justificada pela capacidade das ilhas de Al-hidroxi de conferirem maior estabilidade aos argilominerais 2:1, que seriam termodinamicamente instáveis nas condições do meio. Além disso, existe a possibilidade de um intemperismo mais avançado promover a dissolução de minerais primários, como plagioclásios, diretamente para gibbsita, justificando sua coexistência.

Os difratogramas da figura 22, demonstram os picos referentes à VHE em argila natural, desferrificada, e após tratamento com KCl com e sem aquecimento a 500° C. A diminuição da distância dos planos interatômicos (d), somente após tratamentos com KCl aquecido a 550° C, confirma a presença desses minerais, devido à grande estabilidade das ilhas de alumínio na estrutura, resistindo ao colapso estrutural em temperatura ambiente.

A mineralogia dos Argissolos Vermelho-Amarelos estudados apresentou

similaridade com a mineralogia dos Latossolos. Os picos de caulinita estão presentes em todos os solos, bem como os de goethita, e, em menor proporção, os de hematita. Picos característicos de micas foram encontrados em todos os solos, em intensidade, de modo geral, superior a dos Latossolos. A grande proporção desses minerais em algumas amostras é evidenciada pela existência de picos de maior intensidade do que os da caulinita, como nas amostras PVA8 e PVA16 (Figuras 15 e 16). Essa intensidade é um pouco menor no PVA11 (Figura 15), e, nas amostras PVA4 e PVA17 (Figuras 14 e 16), apresentam-se apenas como traços deste mineral.

Na classe dos Cambissolos Háplicos, além da caulinita, todas as amostras apresentaram picos em 1,00, 0,50, 0,45, 0,33 nm, indicando a presença de mica (Figuras 18 a 20). Esses picos têm a característica de não se alterarem em tratamentos com magnésio ou potássio, com ou sem aquecimento (Resende et al., 2005), como pode ser observado na figura 22 A origem desses minerais na fração argila da maioria dos solos está relacionada ao material parental, possuindo a tendência de se alterarem para outros minerais com o tempo, sendo mais prevalentes em solos menos alterados (Fanning et al., 1989).

Uma característica química desses solos é teor relativamente elevado de K trocável (Quadro 4). Provavelmente isso tem relação com a presença de micas, as quais são fonte de potássio à medida que são intemperizadas. Com a degradação das micas, em condições geoquímicas favoráveis, essas tenderiam a se transformar em argilominerais 2:1 do grupo das esmectitas e vermiculitas, ou minerais interestratificados, no caso de uma transformação parcial. Para tanto, a presença de bases, tais como Ca e Mg, além de sílica no sistema, são condições para a estabilidade desses minerais expansivos. Assim, a ausência destes minerais nessa classe de solo se deve ou ao menor grau de evolução desses solos, daí a forte presença desses minerais na fração argila, ou a pobreza em bases do material de origem não permite a transformação desses minerais em 2:1 expansivos ou mesmo interestratificados (Lindsay, 1979).

Os óxidos de ferro estão presentes nos difratogramas dos Cambissolos apenas nas amostras CX1 e CX12 (Figuras 18 e 19, respectivamente), podendo ser encontrados picos de goethita (0,41 e 0,26 nm) e hematita (0,26 e 0,25 nm) que conferem coloração mais vermelho-amarelada a estes solos em relação aos demais Cambissolos.

Amostra de Neossolo Quartzarênico apresentou picos em 0,42, 0,33 e 0,24 nm referentes ao quartzo (Figura 21). Este mineral primário apesar de ser extremamente

resistente ao intemperismo quando de tamanho maior do que cerca de 0,05 mm de diâmetro é, no entanto, pouco resistente se ocorre nas frações argila e silte (Resende, 2007). É bem possível que a existência de quartzo do tamanho de silte, com formas mais laminares do que esféricas, tenha aumentando o tempo de sedimentação, levando à superestimação da fração argila.

Além dos difratogramas relativos à fração argila dos solos (Figuras 8 a 35), análises complementares foram realizadas para esta fração para obtenção de teores de Fe livre e amorfo no sistema, e porcentagem de caulinita e gibbsita nos solos estudados.

Na Análise Termodiferencial (ATD), a quantificação de caulinita e gibbsita é realizada em função da redução de massa da amostra (ATG), à medida que ocorre perda de hidroxilas adsorvidas e estruturais, sendo que a temperatura exata quando isso ocorre é variável para cada mineral (Tan e Hajek, 1977). Como pode ser observado nos termogramas (Fig. 2 a 7), próximo de 300 e 550° C, encontram-se as curvas referentes, respectivamente, à gibbsita e à caulinita, a partir das quais são calculados os teores desses minerais.

Os maiores teores de gibbsita foram encontrados nos Latossolos, o que, qualitativamente, também pode ser observado nos difratogramas da fração argila natural desses solos. Quanto aos teores de caulinita, algumas amostras apresentaram teor deste mineral superior a 80%, como nas amostras PVA18 e LVA19 (Quadro 5). Nos Cambissolos, de modo geral, teores relativamente elevados deste mineral puderam ser encontrados, com exceção da amostra CX13, que apresentou baixos teores tanto de gibbsita quanto de caulinita, em função da presença predominante de micas nesse solo, como pode ser observado no difratograma relativo a esta amostra (Figura 20).

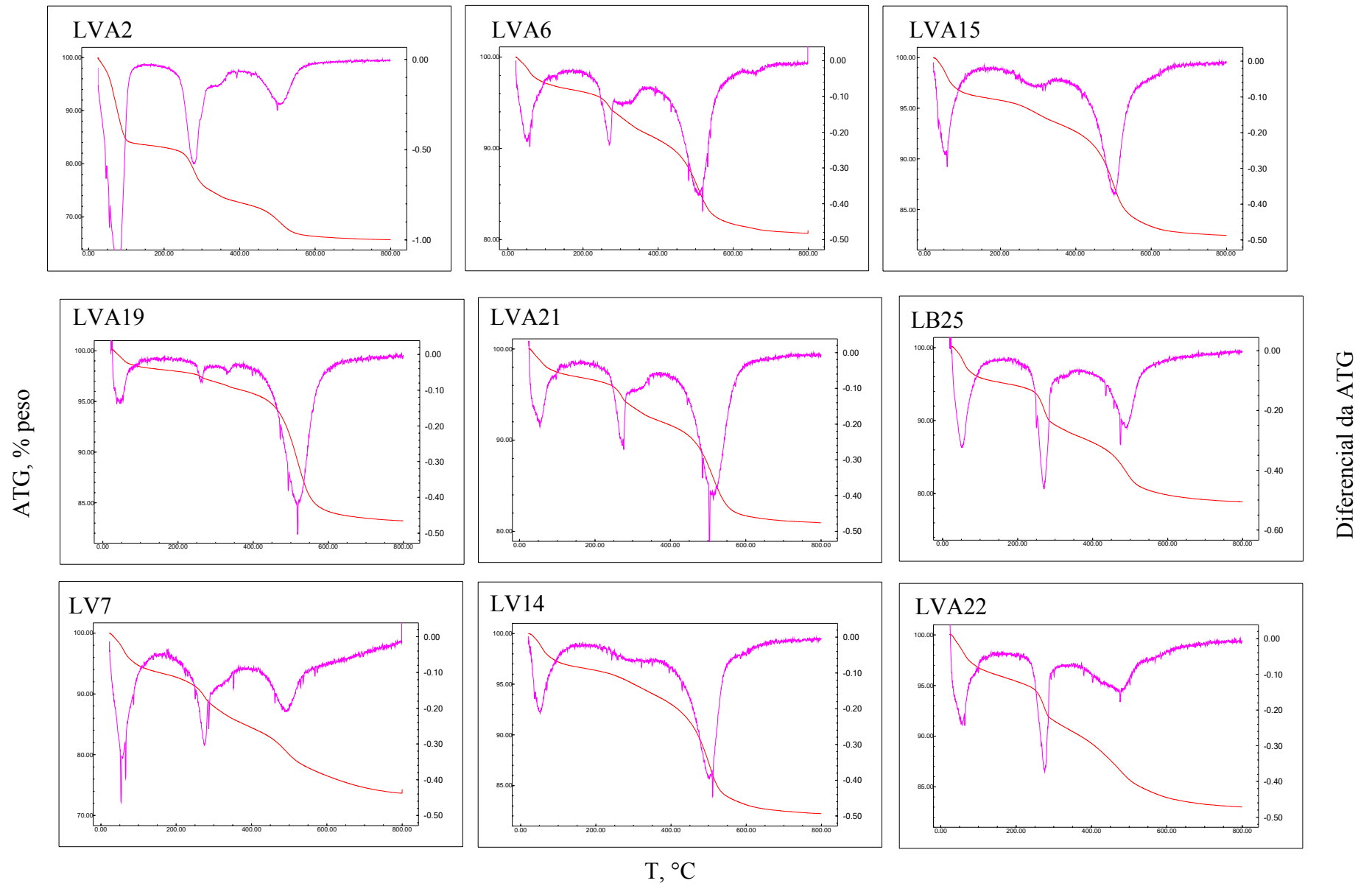


Figura 2: Termogramas diferenciais da fração argila do horizonte A dos solos estudados.

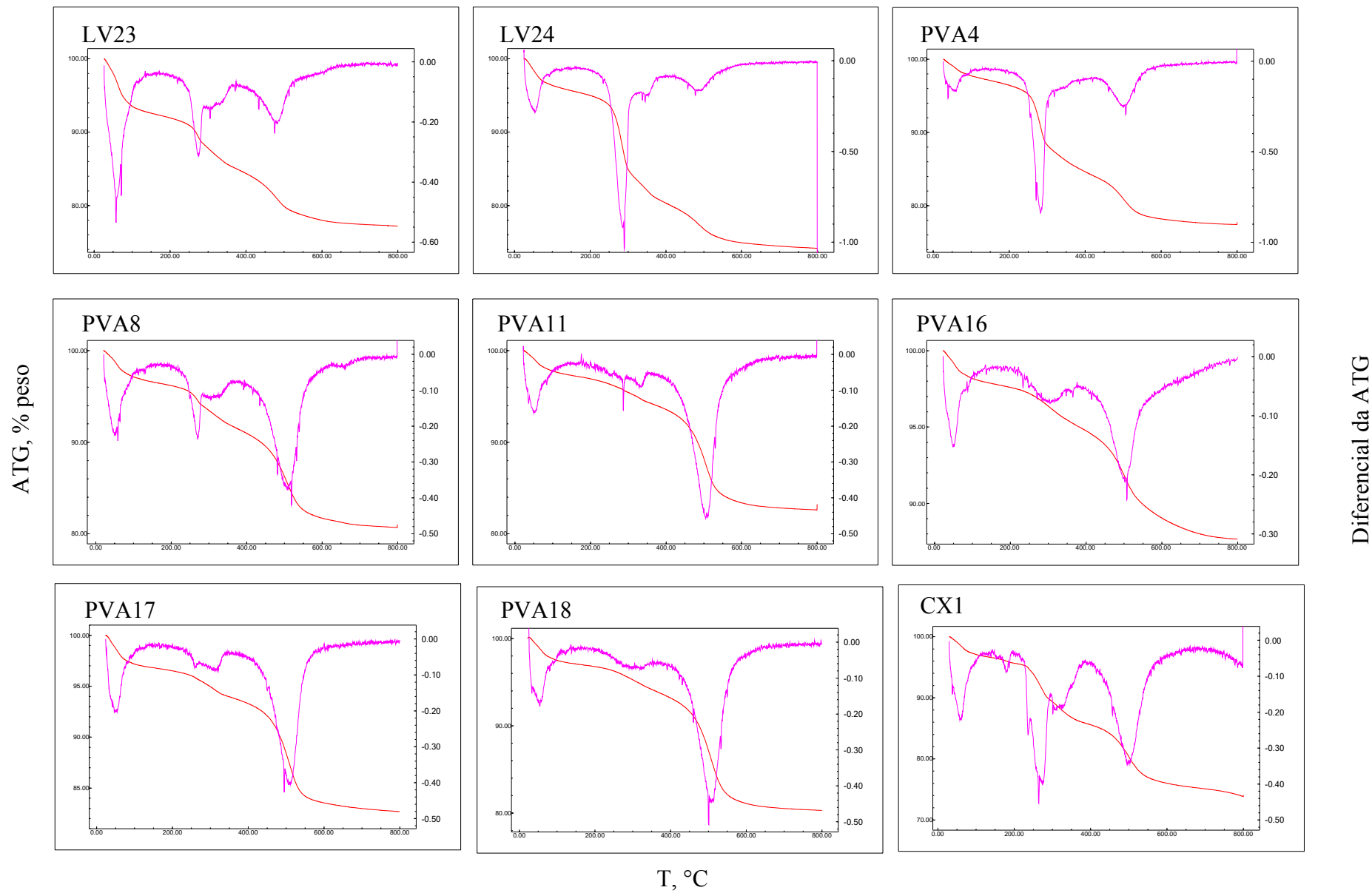


Figura 3: Termogramas diferenciais da fração argila do horizonte A dos solos estudados.

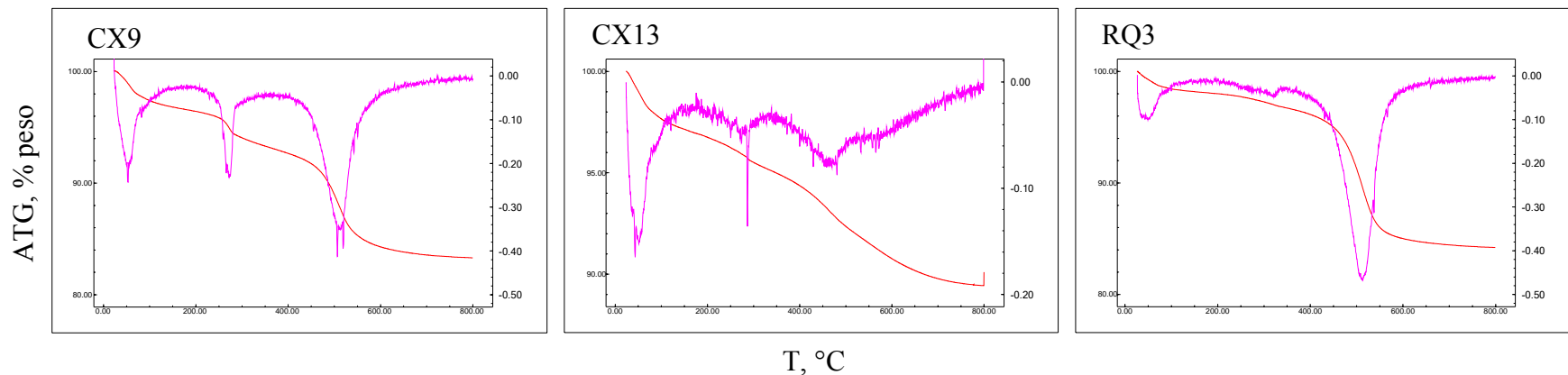


Figura 4: Termogramas diferenciais da fração argila do horizonte A dos solos estudados.

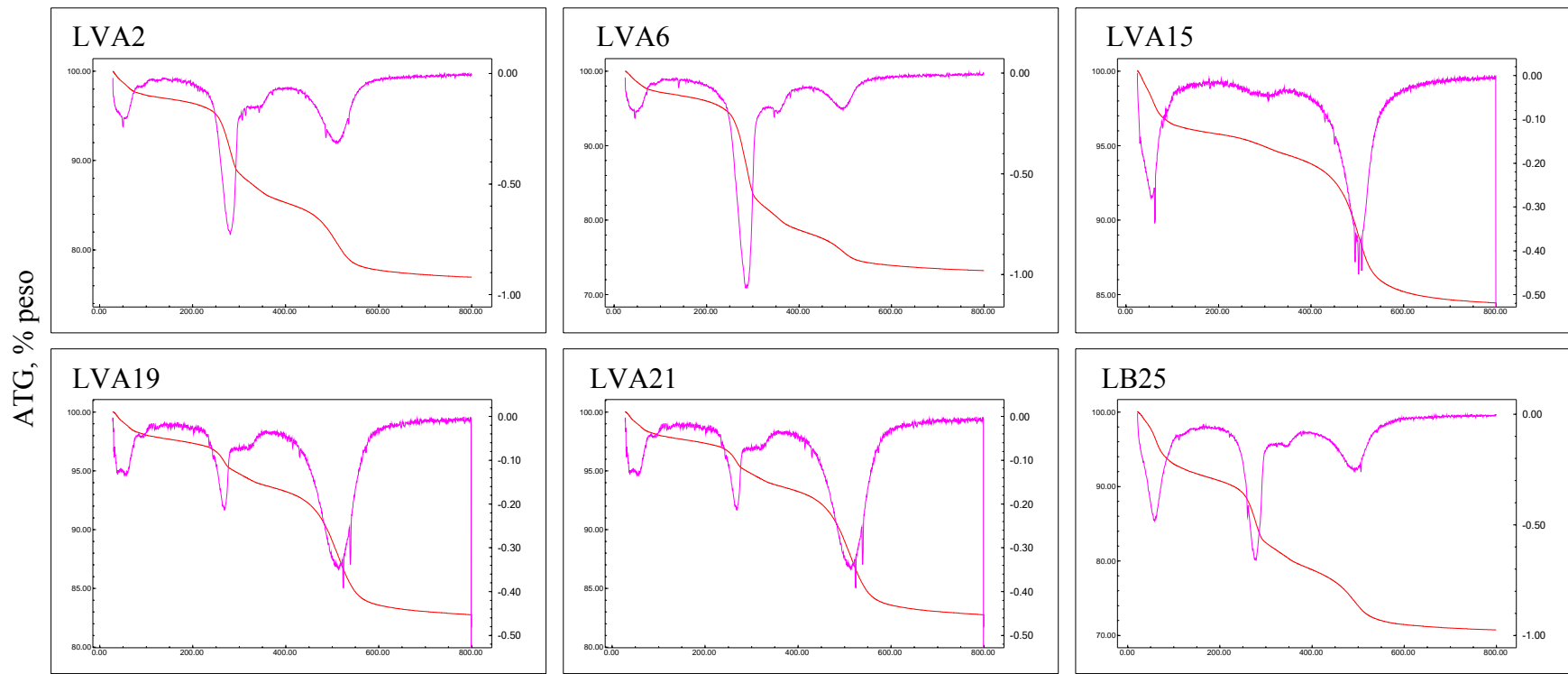


Figura 5: Termogramas diferenciais da fração argila do horizonte B dos solos estudados.

Diferencial da ATG

Diferencial da ATG

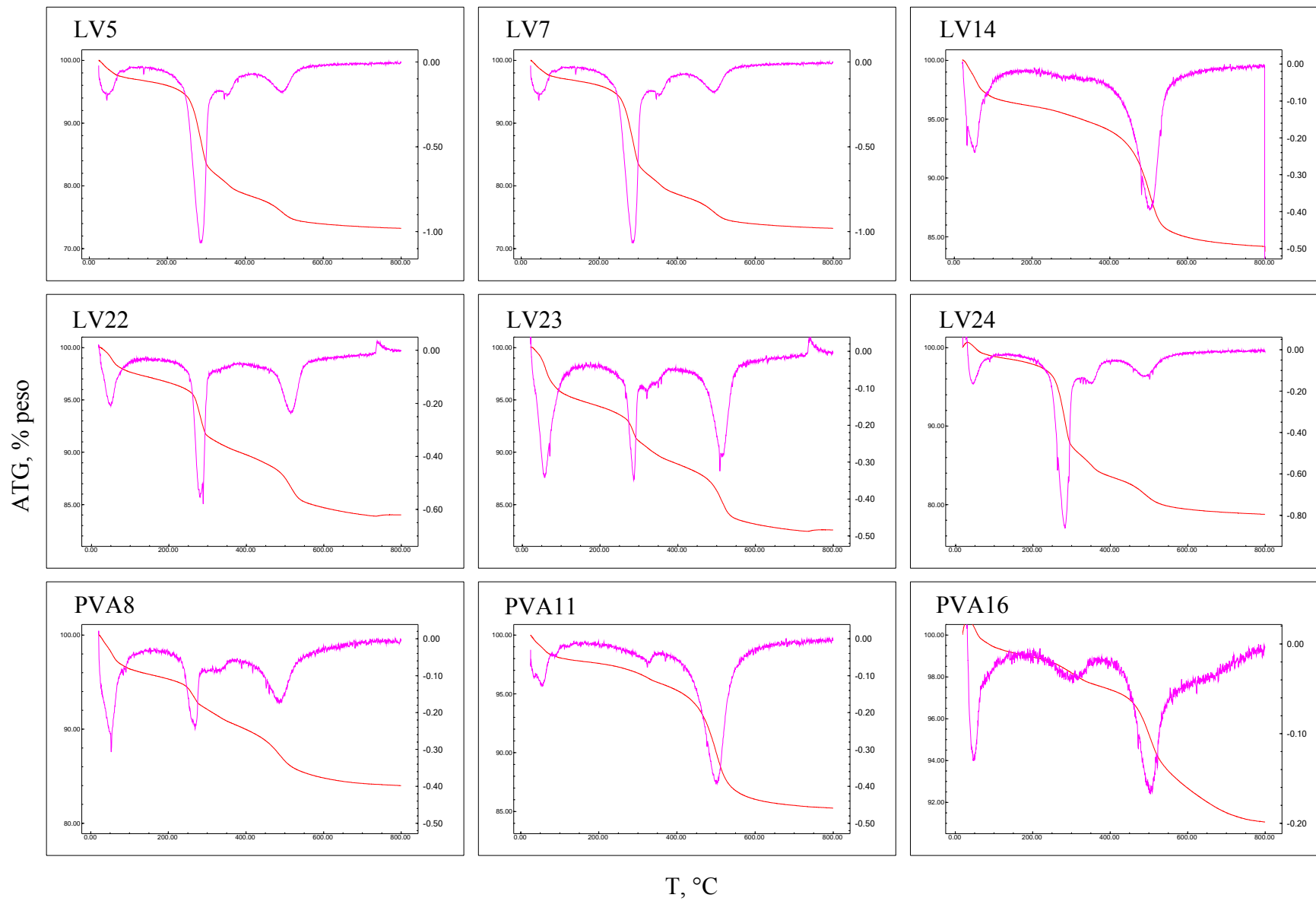


Figura 6: Termogramas diferenciais da fração argila do horizonte B dos solos estudados.

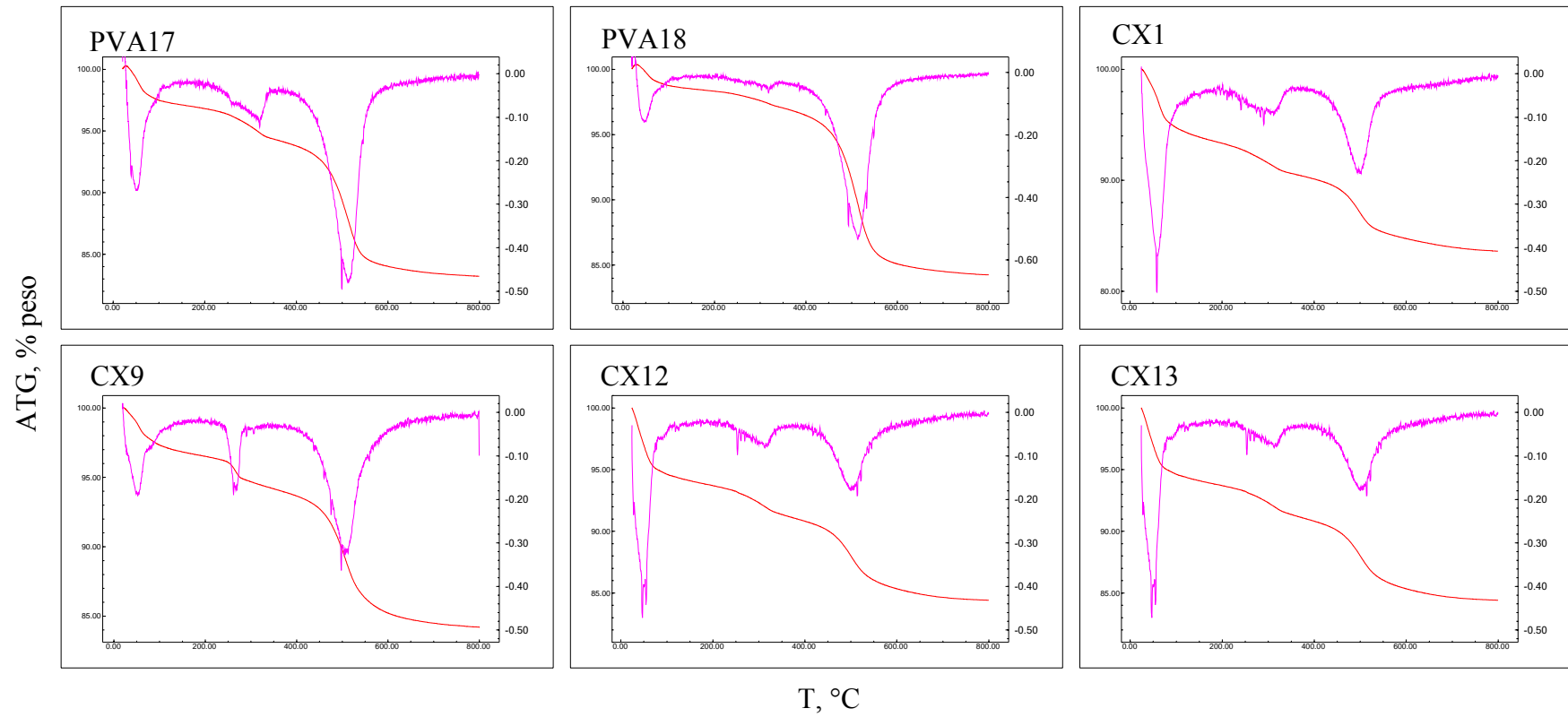


Figura 7: Termogramas diferenciais da fração argila do horizonte B dos solos estudados (Cont.).

Quadro 5: Porcentagem de caulinita e gibbsita obtida da Análise Termogravimétrica (ATG) da fração argila dos solos estudados

Amostra Hor. A	Gibbsita %	Caulinita %	Amostra Hor. B	Gibbsita %	Caulinita %
LVA2	24.4	38.6	LVA2	22.6	48.9
LVA6	41.9	24.0	LVA6	40.3	26.0
LVA15	5.7	62.4	LVA15	2.9	62.6
LVA19	2.2	85.3	LVA19	1.4	78.5
LVA21	6.5	70.4	LVA21	6.0	68.4
LB25	15.2	40.9	LB25	12.2	46.4
LV5	33.9	53.6	LV5	33.9	49.3
LV7	26.0	35.1	LV7	23.8	31.2
LV14	6.0	70.1	LV14	0	66.7
LV22	11.1	32.4	LV22	15.2	26.4
LV23	10.1	39.8	LV23	9.4	36.8
LV24	32.7	29.3	LV24	32.9	24.1
PVA4	6.9	62.3	PVA4	11.64	57.7
PVA8	15.6	40.8	PVA8	7.9	33.8
PVA11	0.7	67.7	PVA11	2.1	66.0
PVA16	6.7	44.2	PVA16	3.0	32.2
PVA17	4.2	67.7	PVA17	2.0	70.4
PVA18	3.0	80.8	PVA18	1.3	79.3
CX1	19.9	68.6	CX1	7.0	34.6
CX9	5.7	56.5	CX9	4.0	59.7
CX12	9.25	43.0	CX12	0.9	34.3
CX13	0.7	18.3	CX13	2.0	17.4
RQ3	1.6	80.6			

As formas cristalinas de Fe associadas à fração argila dos solos, quantificadas a partir de análise ditonito-citrato (DC) (Coffin, 1963), e as de menor cristalinidade, obtida da leitura de extração única com oxalato ácido de amônio (McKeague, 1978), tem seus teores apresentados no quadro 6.

Quadro 6: Teores de Fe obtidos da fração argila por três extrações sucessivas de ditionito-citrato (DC) e extração única de oxalato de amônio

Horizonte	DC (Fe ³⁺)	Oxalato (Fe ³⁺)	Fe _o
	Σ		Fe _d
-----dag kg ⁻¹ -----			
LVA2 – Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico			
A	7.43	0.10	0.01
Bw	4.16	0.59	0.14
LVA6 – Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico			
A	6.34	0.13	0.02
Bw	5.41	0.73	0.13
LVA15 – Latossolo Vermelho-Amarelo Eutrófico			
A	3.46	0.29	0.08
Bw	2.95	1.45	0.49
LVA19 – Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico			
A	1.74	0.11	0.06
Bw	1.61	1.20	0.74
LVA21 – Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico			
A	5.55	1.31	0.23
Bw	5.70	1.14	0.20
LV5 – Latossolo Vermelho Distrófico			
A	4.09	2.02	0.49
Bw	5.42	3.22	0.59
LV7 – Latossolo Vermelho Distrófico			
A	5.03	0.17	0.03
Bw	4.27	0.99	0.23
LV14 – Latossolo Vermelho Eutroférico			
A	7.37	0.19	0.02
Bw	6.31	1.25	0.19
LV22 – Latossolo Vermelho Distroférico			
A	5.61	1.99	0.35
Bw	10.38	2.03	0.19
LV23 – Latossolo Vermelho Distrófico			
A	9.69	0.56	0.05
Bw	10.47	0.44	0.04
LV24 – Latossolo Vermelho Distrófico			
A	6.37	1.96	0.30
Bw	8.48	1.12	0.13
LB25 – Latossolo Bruno Distrófico			
A	2.47	0.18	0.07
Bw	1.74	0.98	0.56
PVA4 – Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico			
A	4.54	0.25	0.05
Bt	4.22	0.95	0.22
PVA8 – Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico			
A	4.83	0.47	0.09
Bt	5.41	2.34	0.43
PVA11 – Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico			
A	1.86	0.14	0.07
Bt	0.75	0.19	0.25
PVA16 – Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico			
A	4.08	0.31	0.07
Bt	3.38	2.12	0.05

Quadro 6: Teores de Fe obtidos da fração argila por três extrações sucessivas de ditionito-citrato (DC) e extração única de oxalato de amônio (Cont.)

Horizonte	DC (Fe ³⁺)	Oxalato (Fe ³⁺)	Fe _o
	Σ		Fe _d
-----dag kg ⁻¹ -----			
PVA17 – Argissolo Vermelho-Amarelo Eutrófico			
A	6.05	0.26	0.04
Bw	6.01	0.85	0.14
PVA18 – Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico			
A	1.52	0.21	0.13
Bw	1.34	1.00	0.74
CX1 – Cambissolo Háplico Tb Distrófico			
A	6.37	0.28	0.04
Bw	4.66	4.95	1.06
CX9 – Cambissolo Háplico Tb Alumínico			
A	1.07	0.23	0.21
Bw	0.86	1.29	1.50
CX12 – Cambissolo Háplico Tb Distrófico			
A	6.39	0.22	0.03
Bw	3.97	1.57	0.39
CX13 – Cambissolo Háplico Tb Eutrófico			
A	3.38	0.23	0.06
Bw	3.20	1.70	0.53
RQ3 – Neossolo Quartzarênico			
A	0.36	0.16	0.44

De acordo com os resultados, os teores de ferro extraídos por ditionito-citrato foram variáveis, sendo que os maiores valores, em torno de 10 dag/kg, foram encontrados em dois Latossolos Vermelhos (LV22 e LV23) (Quadro 6). Por outro lado, valores elevados obtidos da extração de Fe-oxalato (Fe_o) também corresponderam à amostra dessa mesma classe (LV5).

Os valores de Fe_o/Fe_D revelaram, de modo geral, predomínio de formas de ferro de melhor cristalinidade para os Argissolos e Latossolos, e de menor para o Neossolo Quartzarênico e os Cambissolos, sendo que as relações Fe_o/Fe_D foram mais elevadas no horizonte Bi de dois Cambissolos (CX1 e CX9). Schwertmann (1966) destaca o efeito da matéria orgânica na inibição da cristalização do ferro. Entretanto, para a maioria dos solos, menor proporção de material amorfo foi encontrada no horizonte superficial, demonstrando, para os solos estudados, haver pouca influência da matéria orgânica no incremento de Fe_o.

A presença de sílica no sistema também pode inibir a formação de óxidos de ferro de melhor cristalinidade, de acordo com Schwertmann e Taylor (1989). Por essa razão, a amostra LVA19, que apresentou teores elevados de caulinita (78 % no Bw), foi também a que apresentou maior relação Fe_o/Fe_D no horizonte subsuperficial.

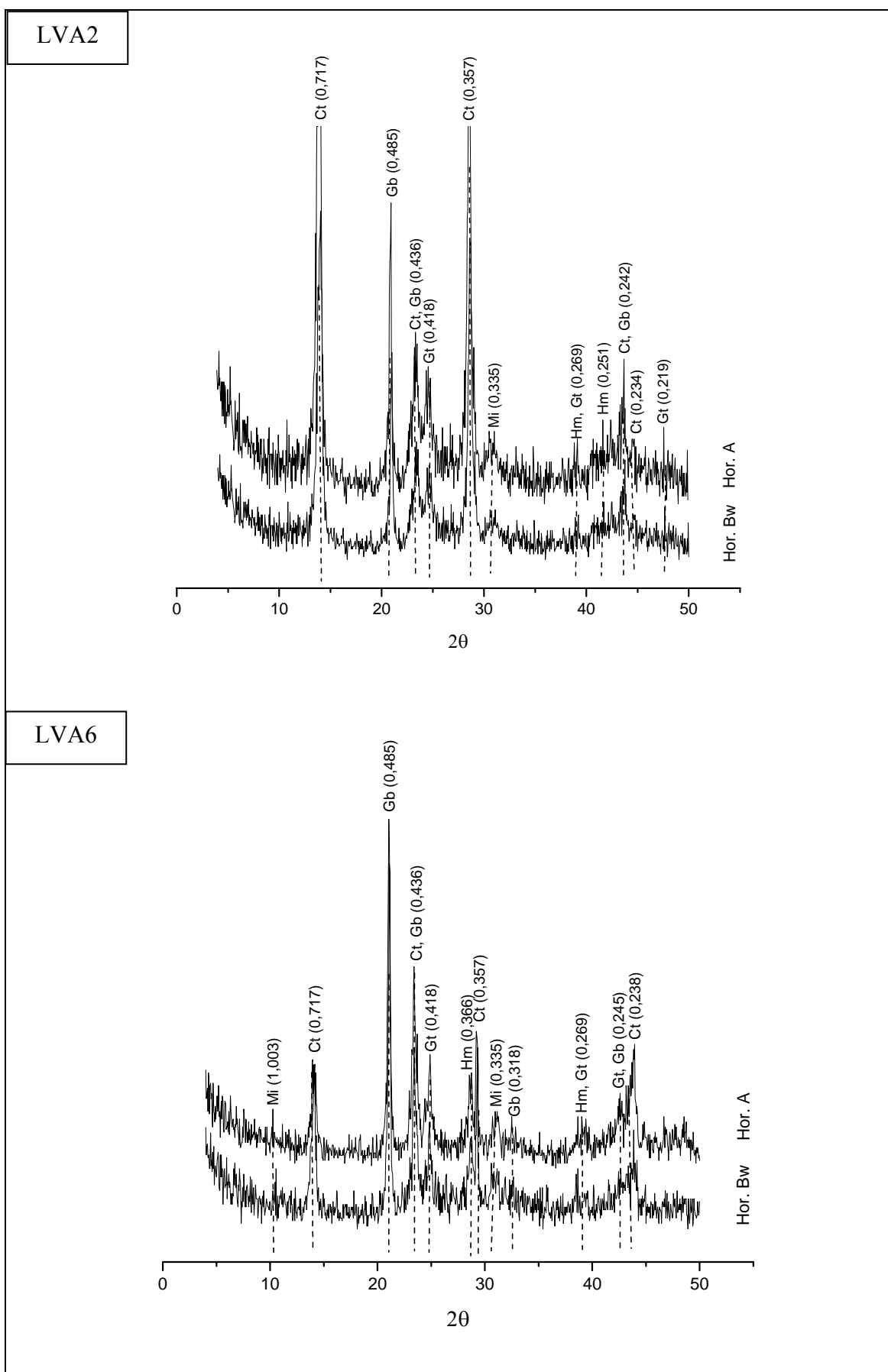


Figura 8: DRX da fração argila natural dos Latossolos Vermelho-Amarelos. Ct: caulinita; Gb: gibbsita; Gt: goethita; Hm: hematita; Mi: mica.

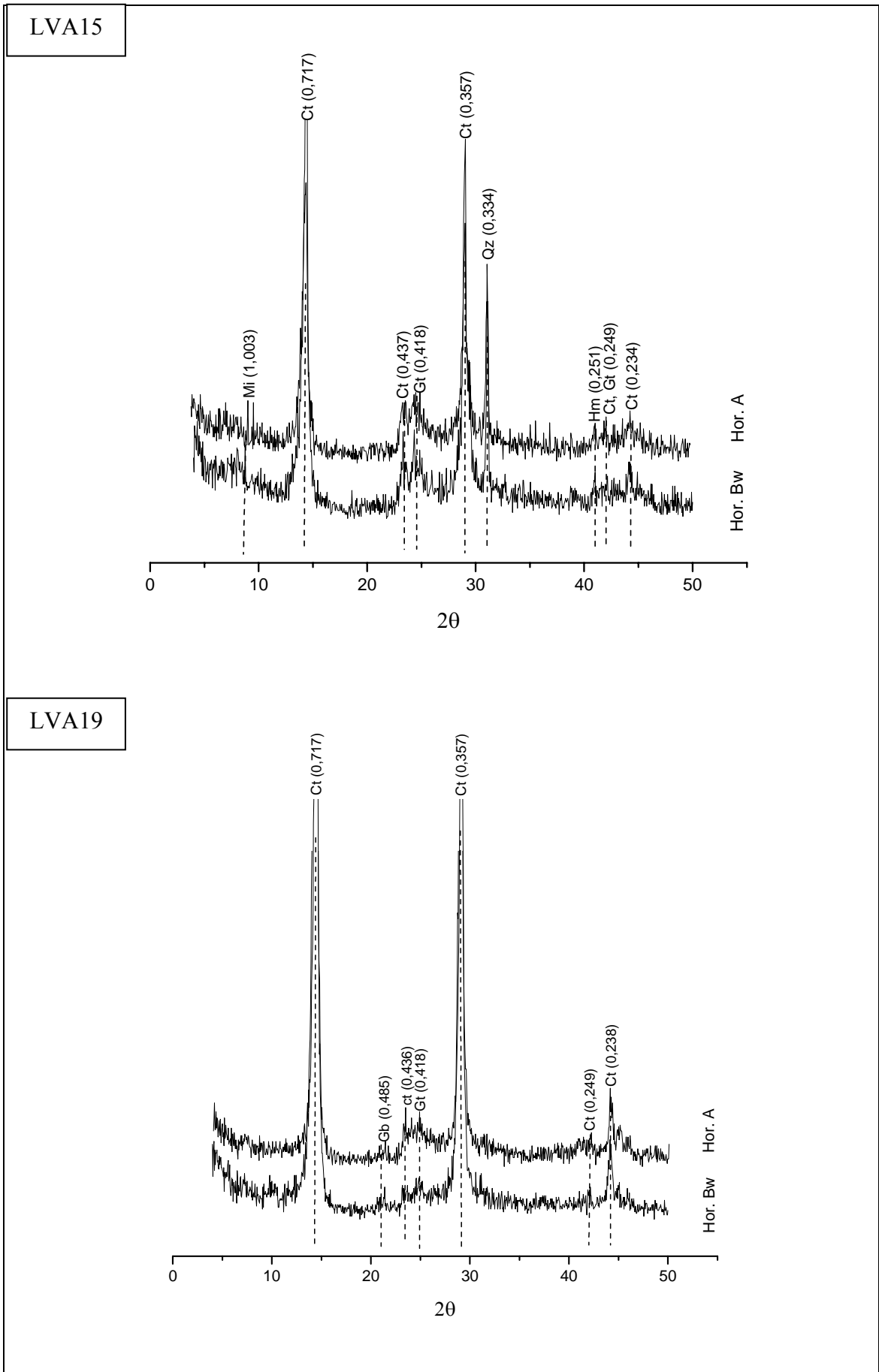


Figura 9: DRX da fração argila natural dos Latossolos Vermelho-Amarelos. Ct: caulinita; Gb: gibbsita; Gt: goethita; Hm: hematita; Mi: mica (Cont.).

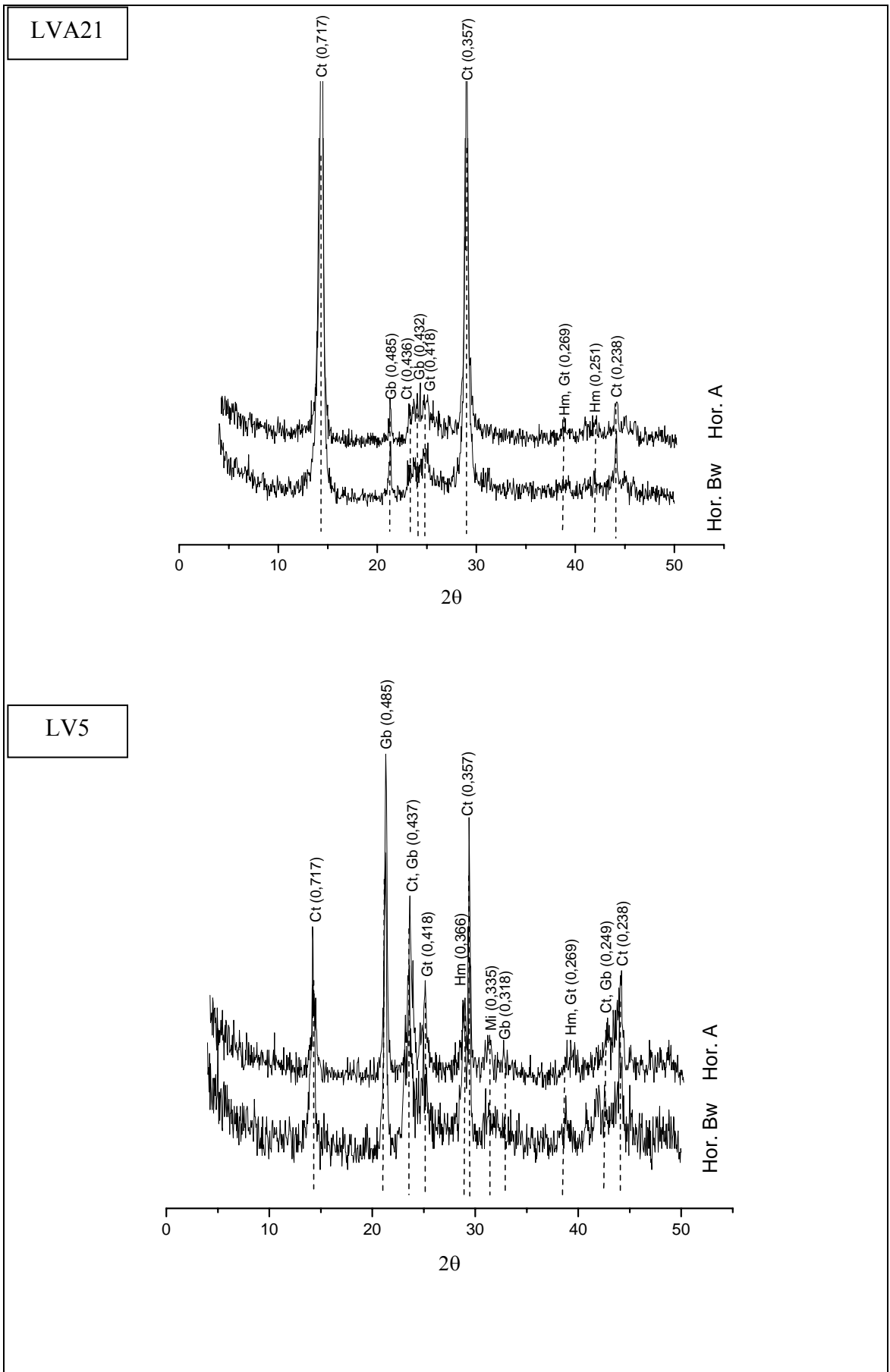


Figura 10: DRX da fração argila natural de amostras de Latossolo Vermelho-Amarelo e Latossolo Vermelho. Ct: caulinita; Gb: gibbsita; Gt: goethita; Hm: hematita; Mi: mica.

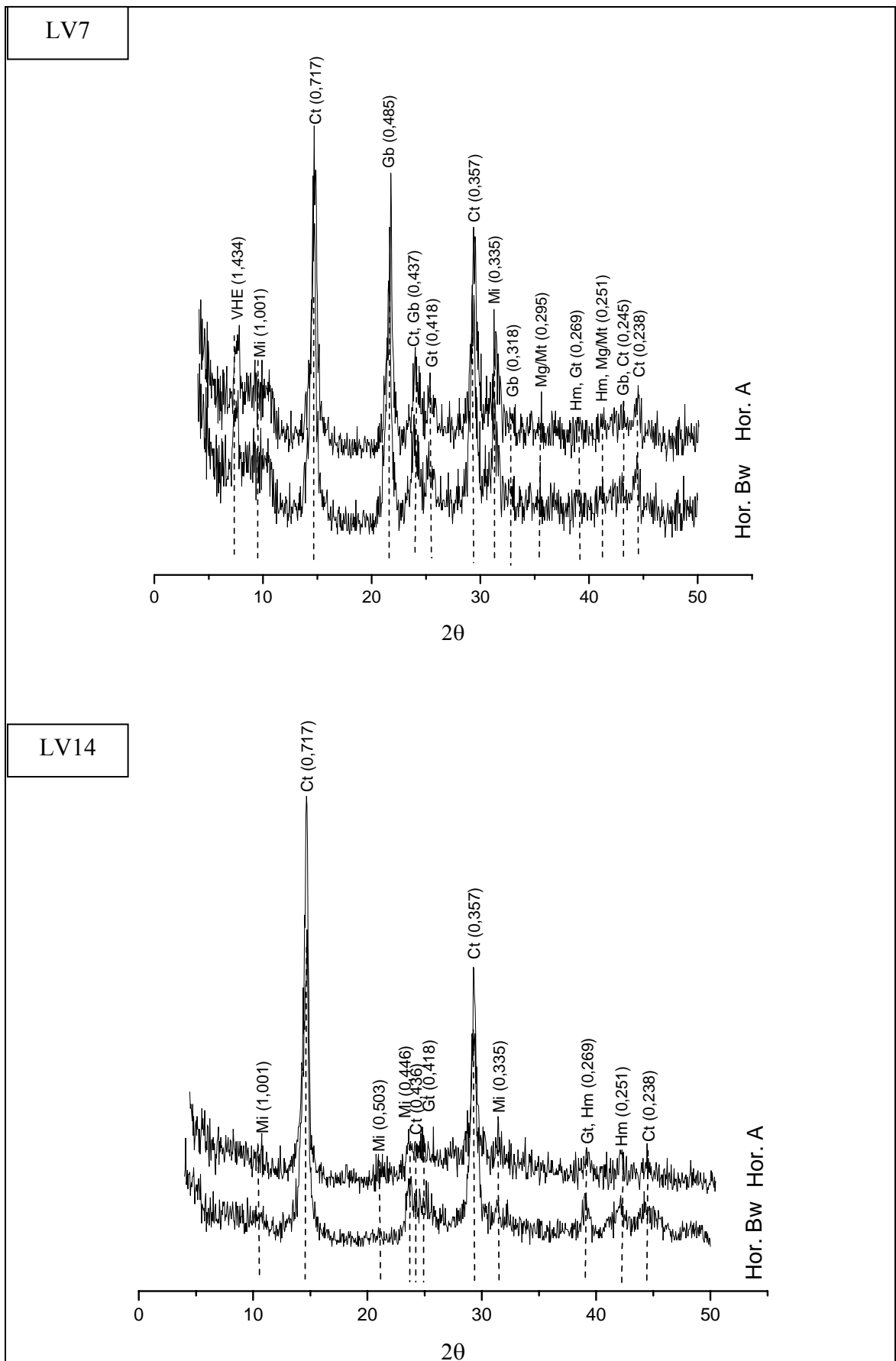


Figura 11: DRX da fração argila natural dos Latossolos Vermelhos. Ct: caulinita; Gb: gibbsita; Gt: goethita; Mt/Mg: magnetita/maghemita; Mi: mica; VHE: vermiculita com hidróxi nas entre camadas.

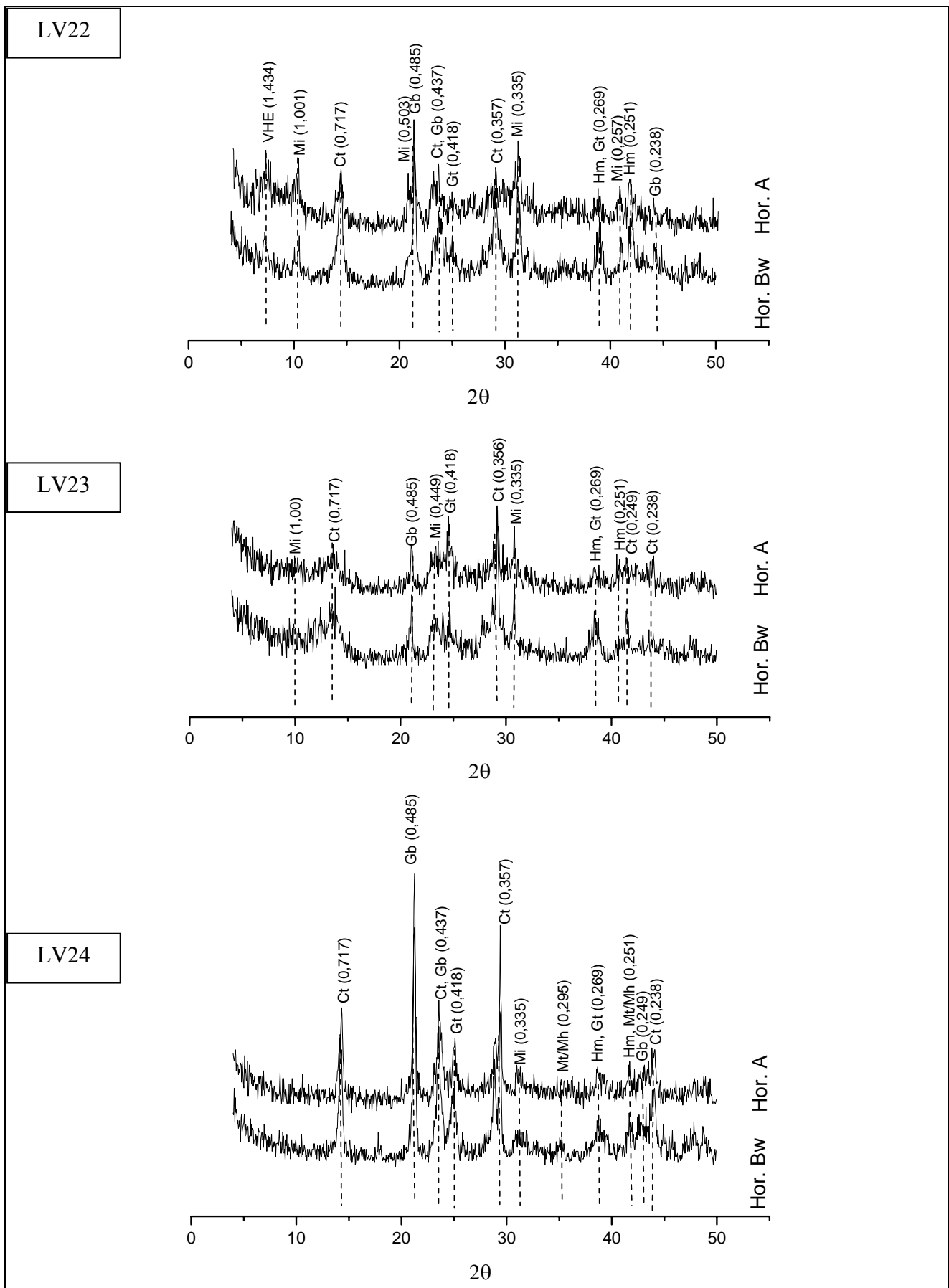


Figura 12: DRX da fração argila natural dos Latossolos Vermelhos. Ct: caulinita; Gb: gibbsita; Gt: goethita; Hm: hematita; Mi: mica; Mt/Mg: magnetita/maghemita; VHE: vermiculita com hidróxi entre camadas (Cont.).

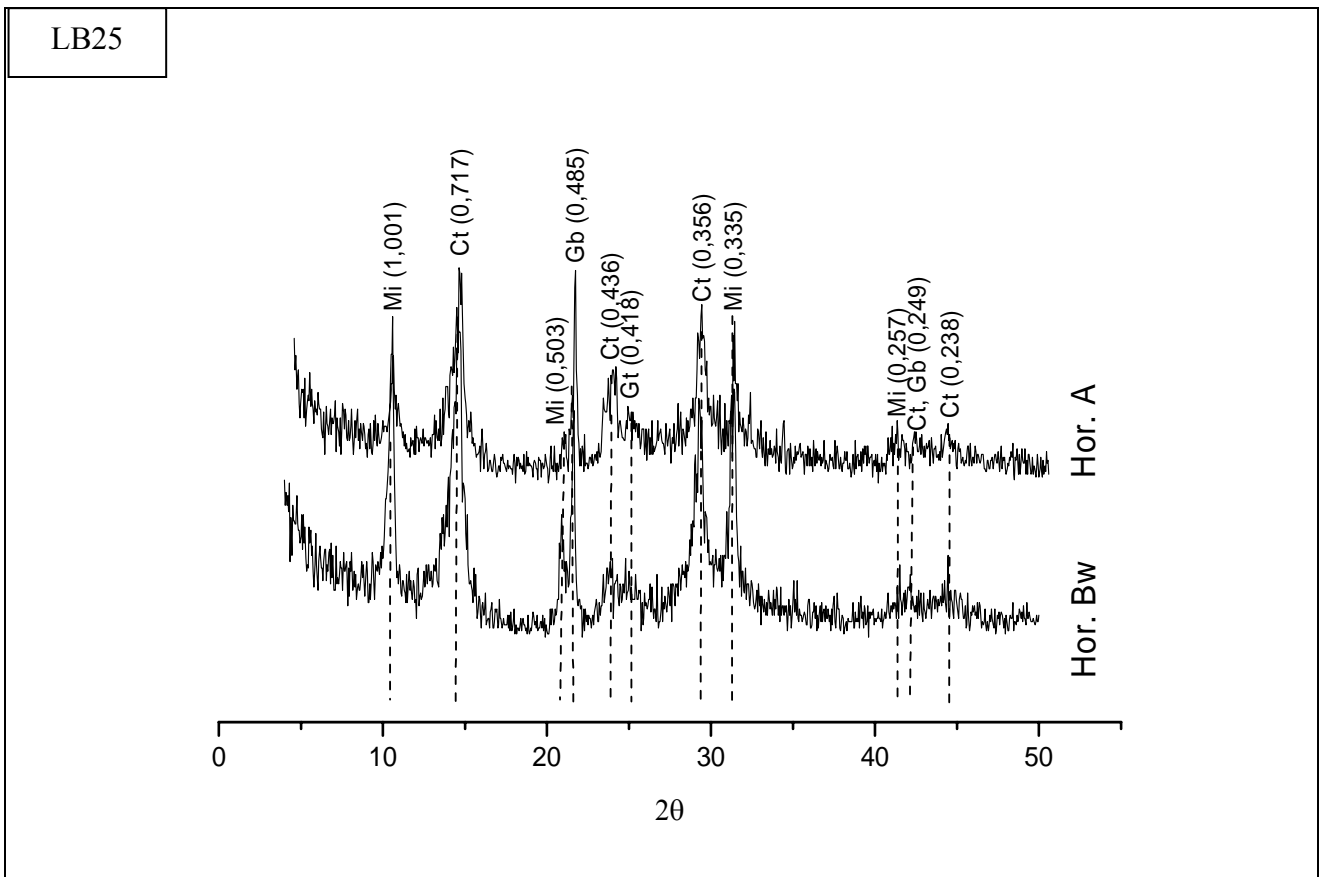


Figura 13: DRX da fração argila natural do Latossolo Bruno.; Ct: caulinita; Gb: gibbsita; Gt: goethita; Hm: hematita; Mi: mica.

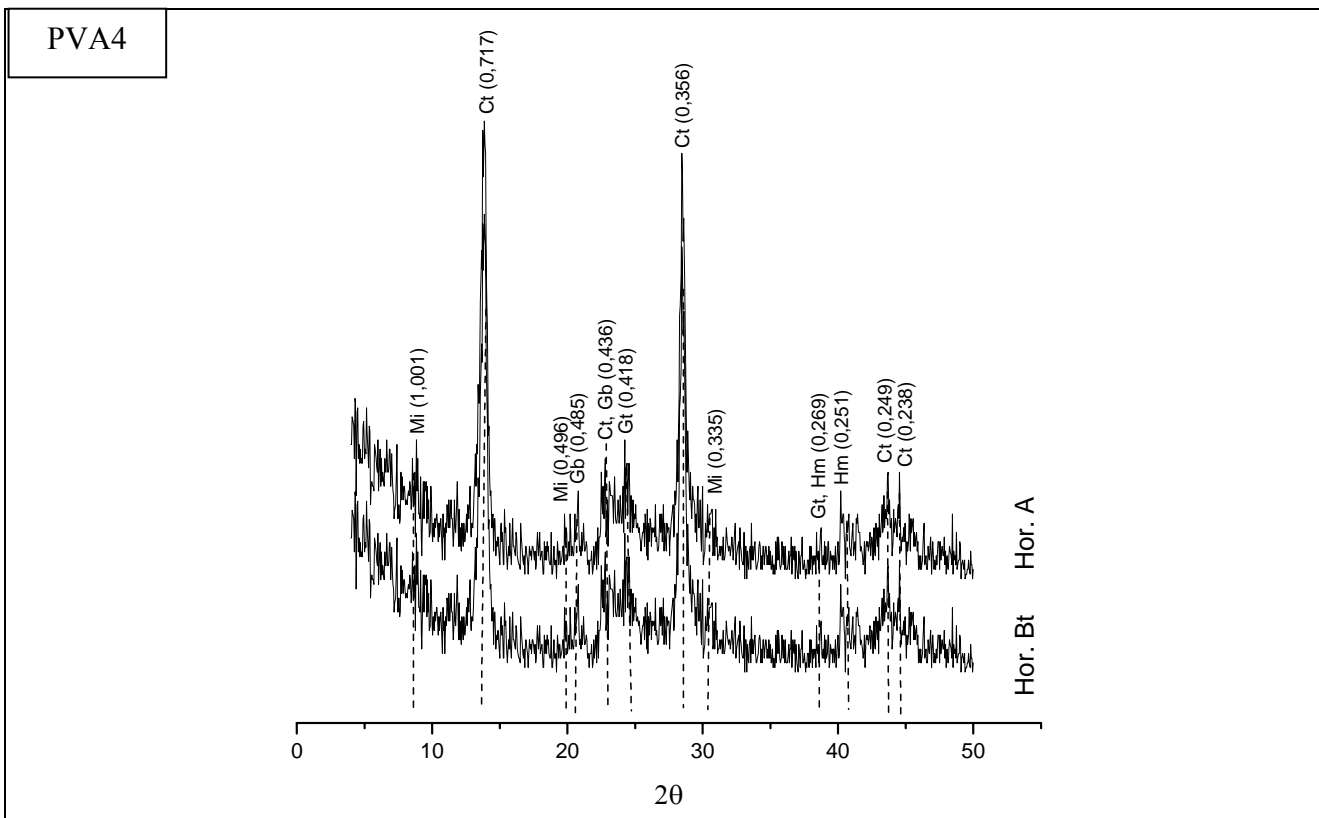
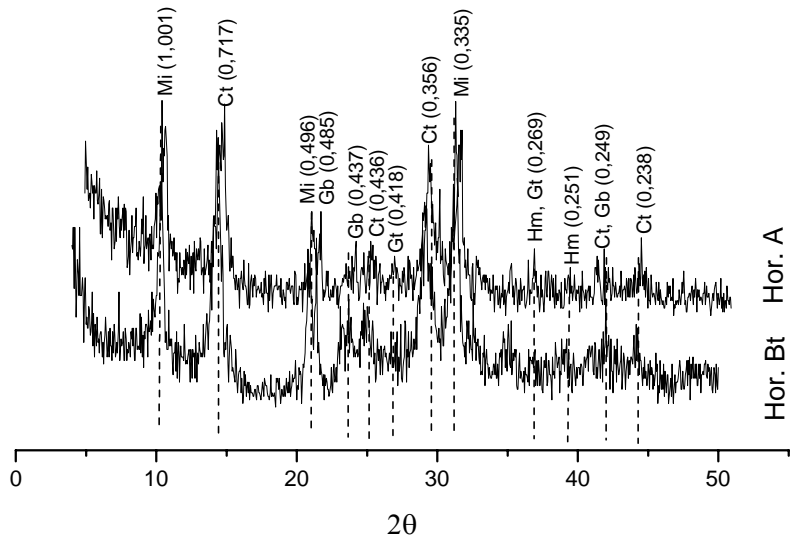


Figura 14: DRX da fração argila natural dos Argissolos Vermelho-Amarelos. Ct: caulinita; Gb: gibbsita; Gt: goethita; Hm: hematita; Mi: mica.

PVA8



PVA11

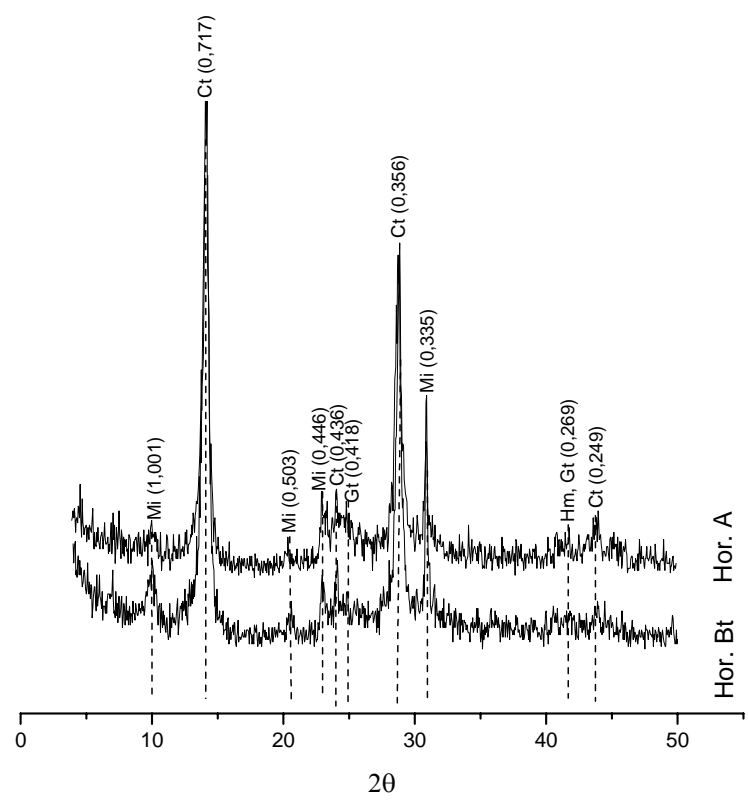
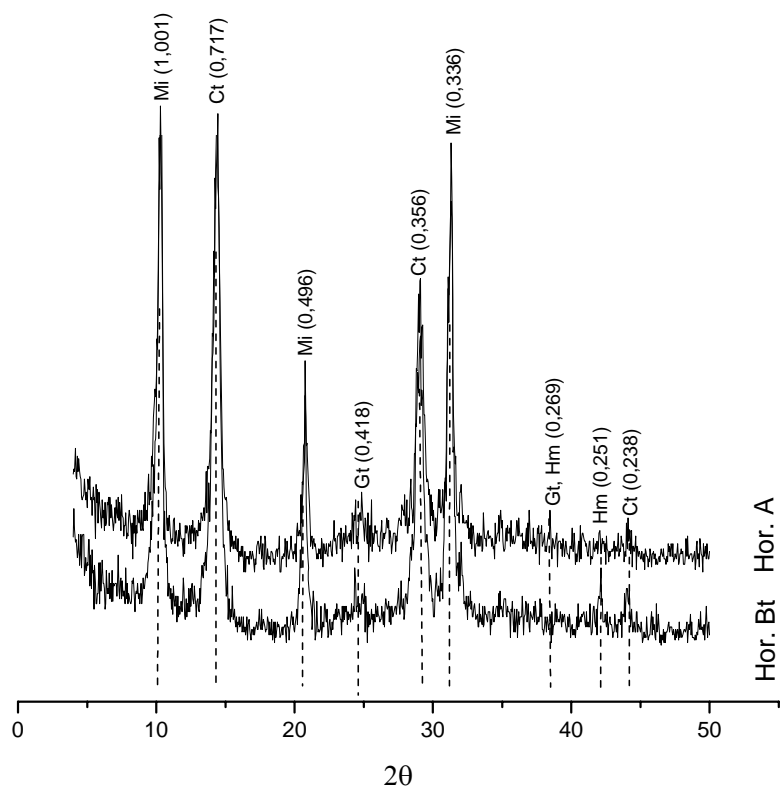


Figura 15: DRX da fração argila natural dos Argissolos Vermelho-Amarelos. Ct: caulinita; Gb: gibbsita; Gt: goethita; Hm: hematita; Mi: mica (Cont.).

PVA16



PVA17

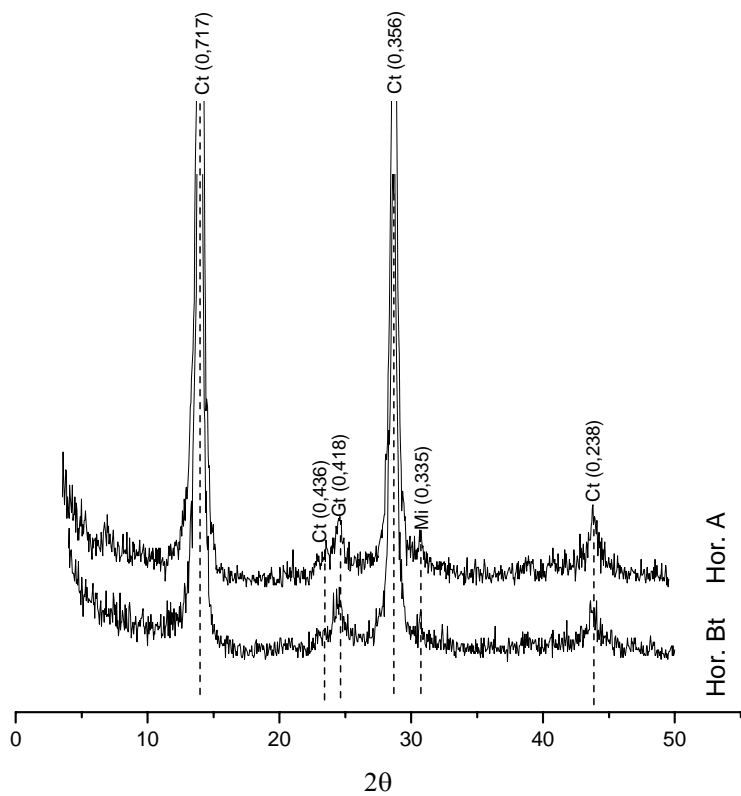


Figura 16: DRX da fração argila natural dos Argissolos Vermelho-Amarelos. Ct: caulinita; Gt: goethita; Hm: hematita; Mi: mica (Cont.).

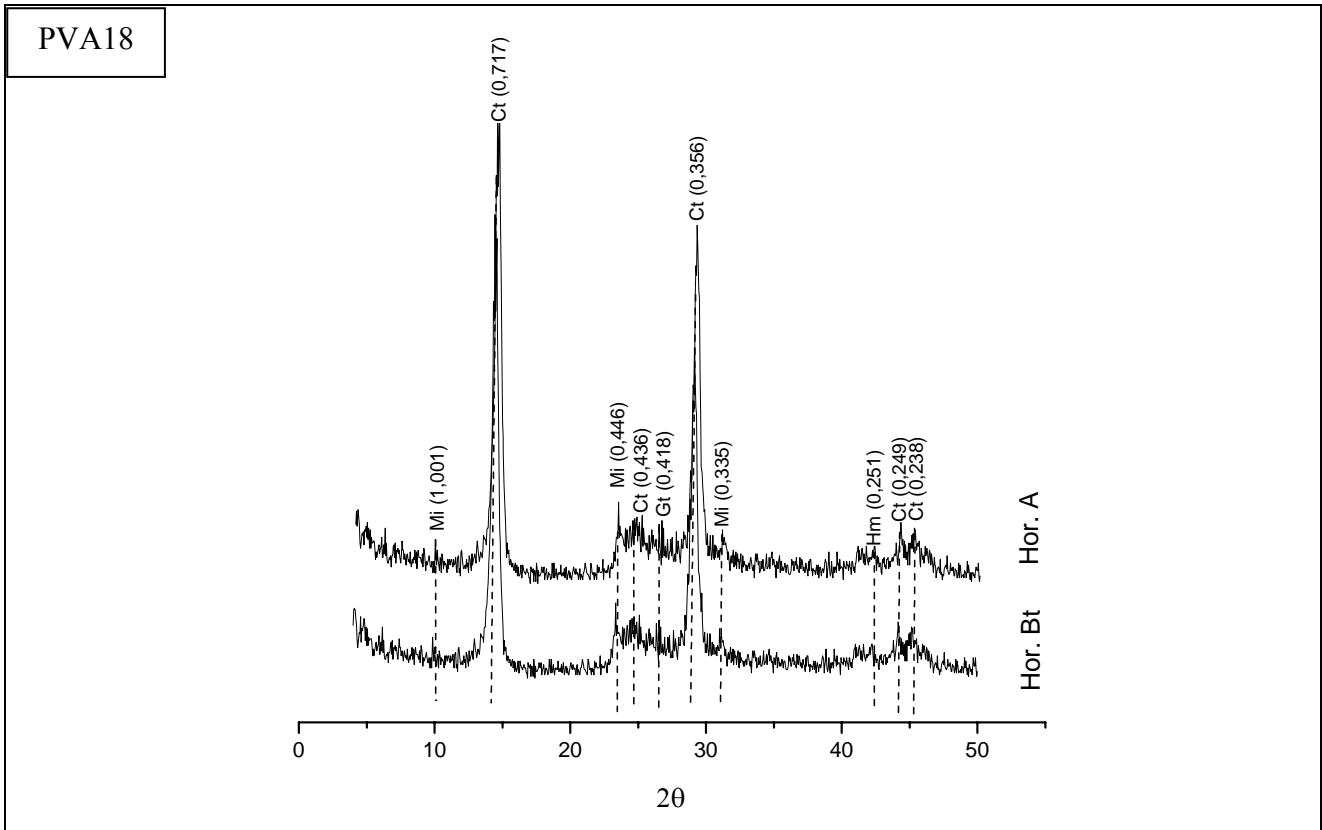


Figura 17: DRX da fração argila natural dos Argissolos Vermelho-Amarelos. Ct: caulinita; Gt: goethita; Hm: hematita; Mi: mica (Cont.).

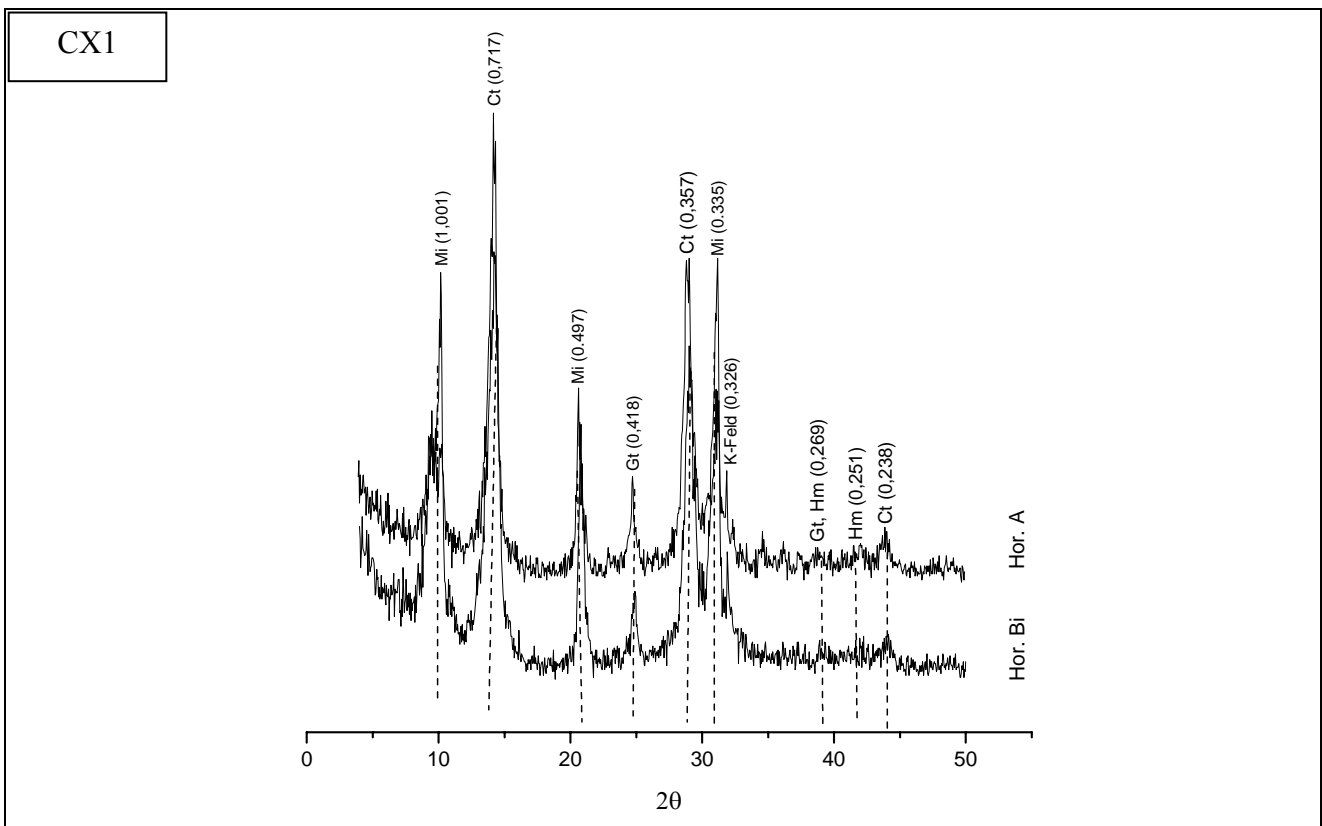
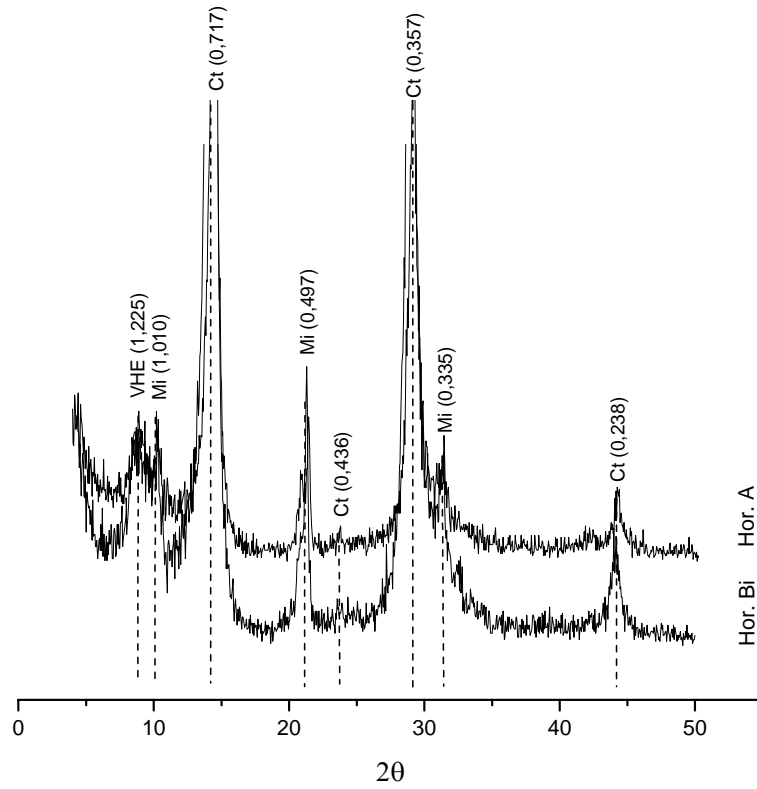


Figura 18: DRX da fração argila natural dos Cambissolos Háplicos. Ct: caulinita; Gt: goethita; Hm: hematita; K-Feld: feldspato potássico; Mi: mica.

CX9



CX12

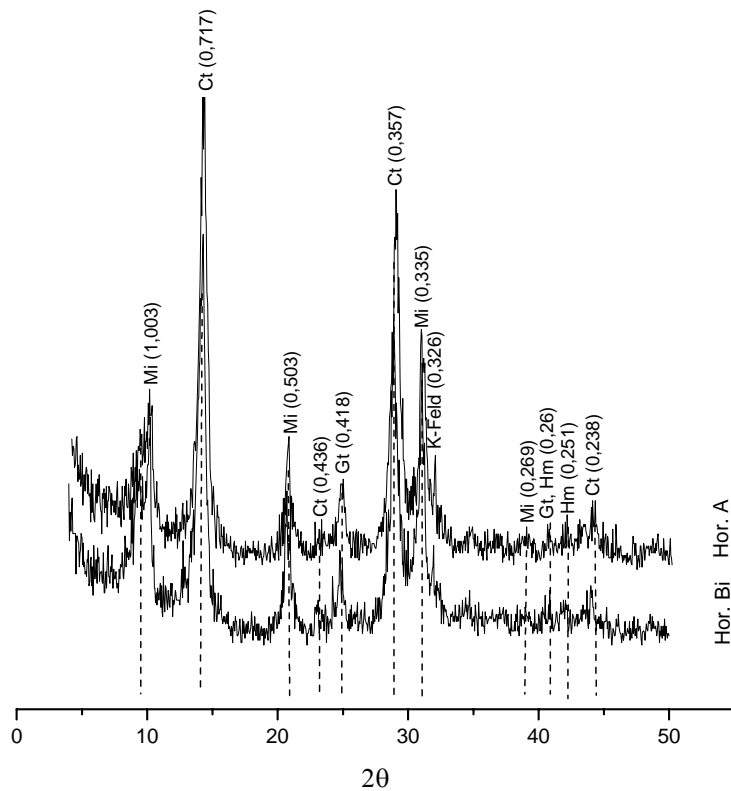


Figura 19: DRX da fração argila natural dos Cambissolos Háplicos. Ct: caulinita; Gt: goethita; Hm: hematita; K-Feld: feldspato potássico; Mi: mica (Cont.)

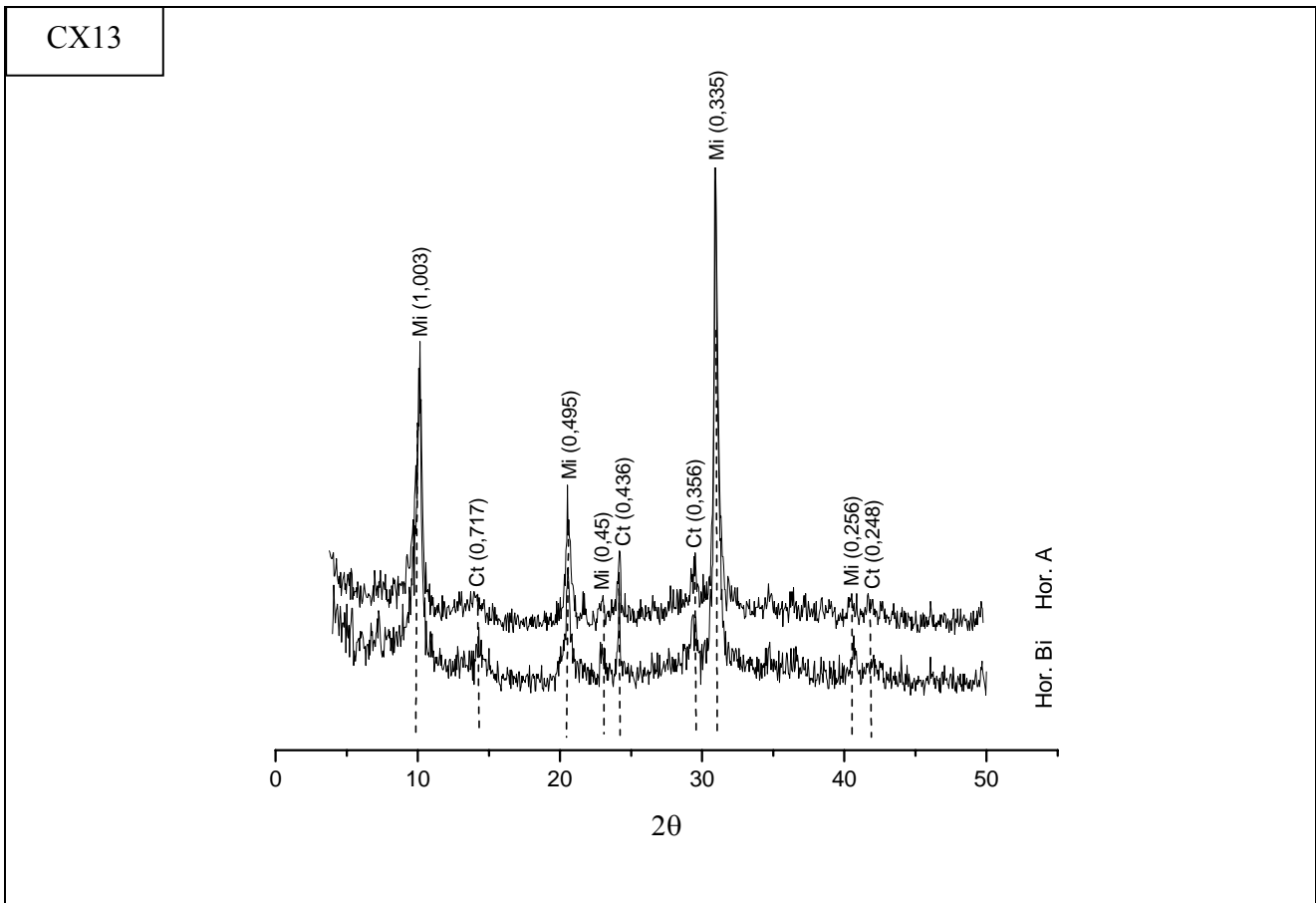


Figura 20: DRX da fração argila natural dos Cambissolos Háplicos. Ct: caulinite; Gt: goethita; Hm: hematita; K-Feld: feldspato potássico; Mi: mica (Cont.).

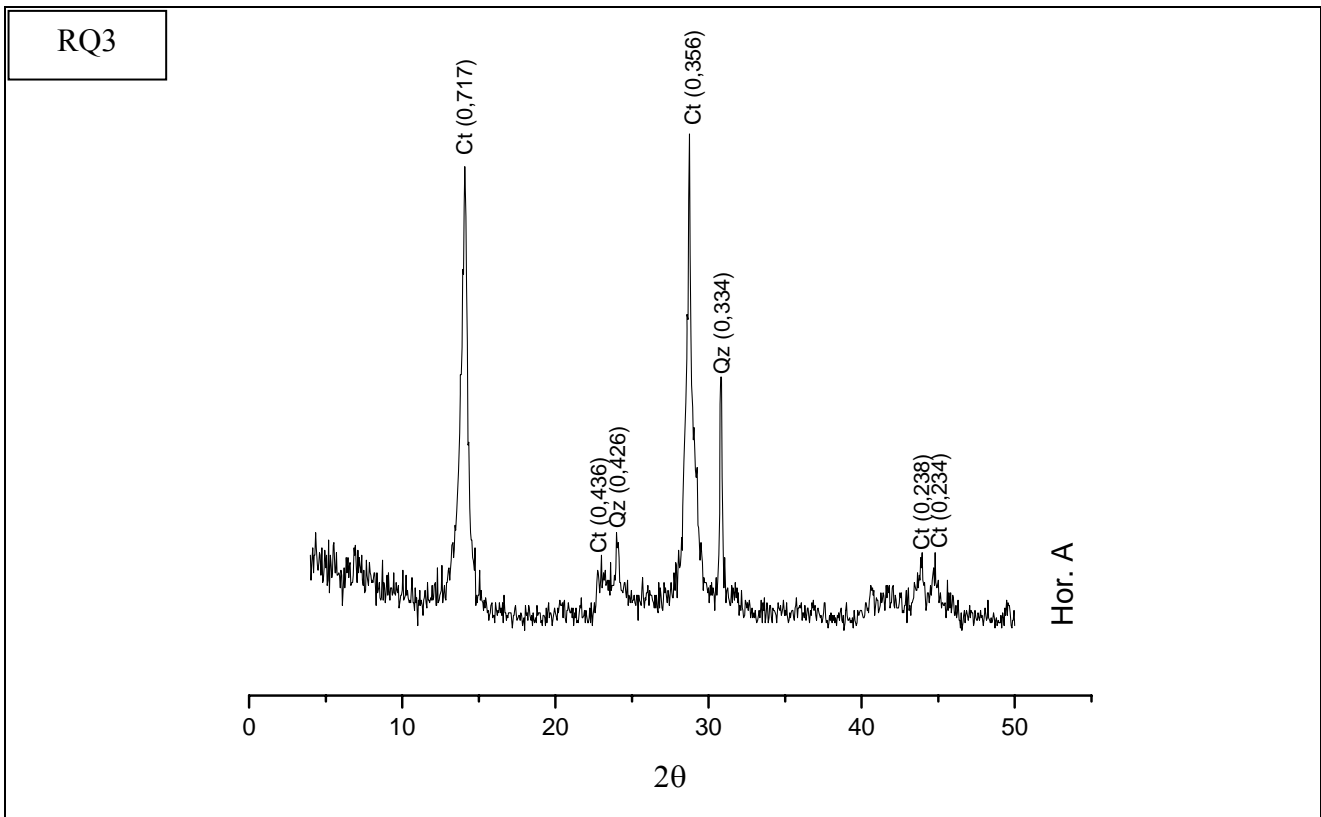


Figura 21: DRX da fração argila natural do Neossolo Quartzarênico; Ct: caulinite; Qz: quartzo.

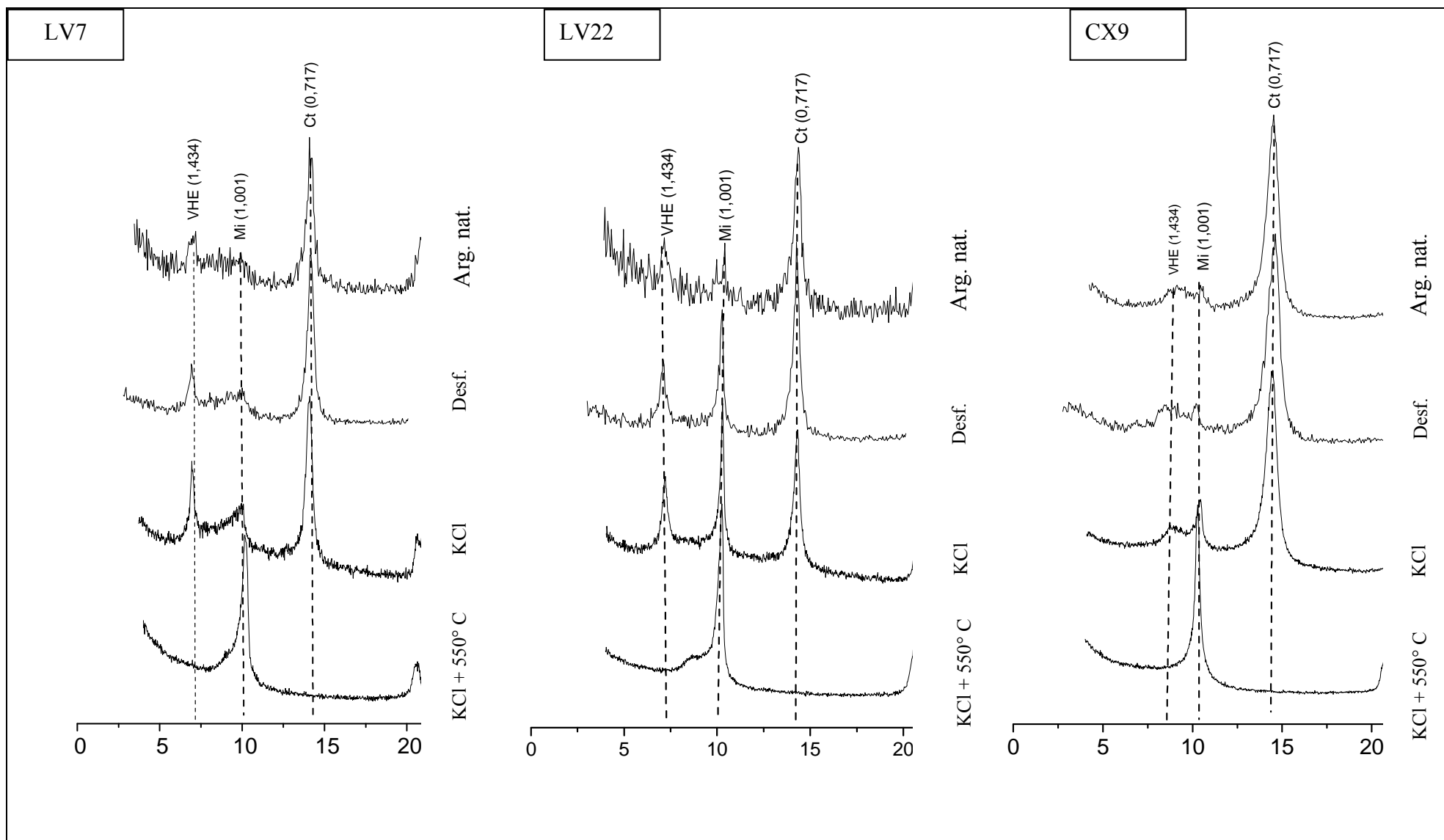


Figura 22: DRX da fração argila com tratamento de amostras de Latossolo Vermelho e Cambissolo Háplico.; Ct: caulinita; Mi: mica; VHE: Vermiculita com hidróxi nas entrecamadas.

4.3.2. Frações silte e areia

Na fração silte dos Latossolos Vermelho-Amarelos, os difratogramas das figuras 23 a 24 demonstraram haver presença de caulinita e quartzo nas amostras dessa classe, e ainda micas em grande proporção. A presença de gibbsita nas frações silte e areia foi constatada naquelas amostras mais gibbsíticas (LVA6 e LVA2), provavelmente demonstrando ter havido problemas relacionados à dispersão desses solos. É muito comum nos Latossolos a presença de pseudo-componentes de tamanho maior do que 0,002 mm. Em solos mais oxidicos ou com elevado conteúdo de matéria orgânica, principalmente, esses agentes cimentantes dificultam a dispersão podendo superestimar proporção de silte e/ou areia no solo (Donagemma et al., 2003).

Nos Latossolos Vermelhos, confirmou-se a presença de mineral magnético na fração silte do LV5 e LV24 (Figuras 25 e 26), bem como picos referentes à gibbsita e hematita.

Para a classe dos Argissolos, foi constatada, predominantemente, a presença de quartzo e caulinita, além de feldspato potássico (0,32 e 0,28 nm) e plagioclásios calcosódicos (0,30 nm) em menor proporção devido à baixa resistência destes últimos ao intemperismo.

Nos Cambissolos estudados, o quartzo é um dos minerais predominantes da fração silte, comprovado pelos picos em 0,42, 0,33, 0,24, 0,22 e 0,21 nm referentes ao mineral. A tendência de o quartzo desaparecer em granulometria mais fina, ocorre em razão de que a sílica, na partícula com superfície específica muito grande, desestabilizar-se-ia, sendo então atacada até a sua dissolução. Entretanto, nos Cambissolos é muito comum a restrição à infiltração de água e lixiviação ao longo do perfil (Resende et al., 2005), o que manteria elevada a atividade da sílica em solução.

Picos referentes à caulinita também podem ser observados nos difratograma da fração silte dessa classe de solo (Figura 29), provavelmente como resultado da alteração da mica. A muscovita é o filossilicato mais freqüente nessa fração, apresentando picos em 1,00, 0,50, 0,45 e 0,26 nm. Este mineral, apesar de ser primário, tende a resistir ao intemperismo até o ponto de sofrer rupturas físicas acompanhada da perda do potássio entre camadas e dar origem a outros minerais, como a illita na fração argila (termo este

nem sempre usado). Os plagioclásios calco-sódicos e os feldspatos potássicos, podem também ser encontrados, mas apenas na forma de traços.

Nos Neossolos Quartzarênicos, foram observados unicamente picos referentes ao quartzo, nas frações silte e areia, e à caulinita na fração silte, sendo que esta se encontra apenas como traço (Figuras 30 e 31). A ausência de minerais para atuarem como fontes de nutrientes é responsável pela distrofia do solo, baixas CTC e capacidade de armazenamento de água, como anteriormente abordado em discussão sobre as características físicas e químicas dos solos.

Na fração areia dos solos estudados, há o predomínio do quartzo, mas, comumente, puderam ser encontrados picos referentes a feldspato, plagioclásio e mica, principalmente nos Cambissolos (Figura 35). Nos Latossolos Vermelhos e Vermelho-Amarelos (Figuras 32 e 33) e Argissolos Vermelho-Amarelos (Figura 34) a presença de gibbsita e caulinita encontradas na fração areia desses solos provavelmente se deve à existência de agregados não dispersos que estariam superestimando esta fração do solo.

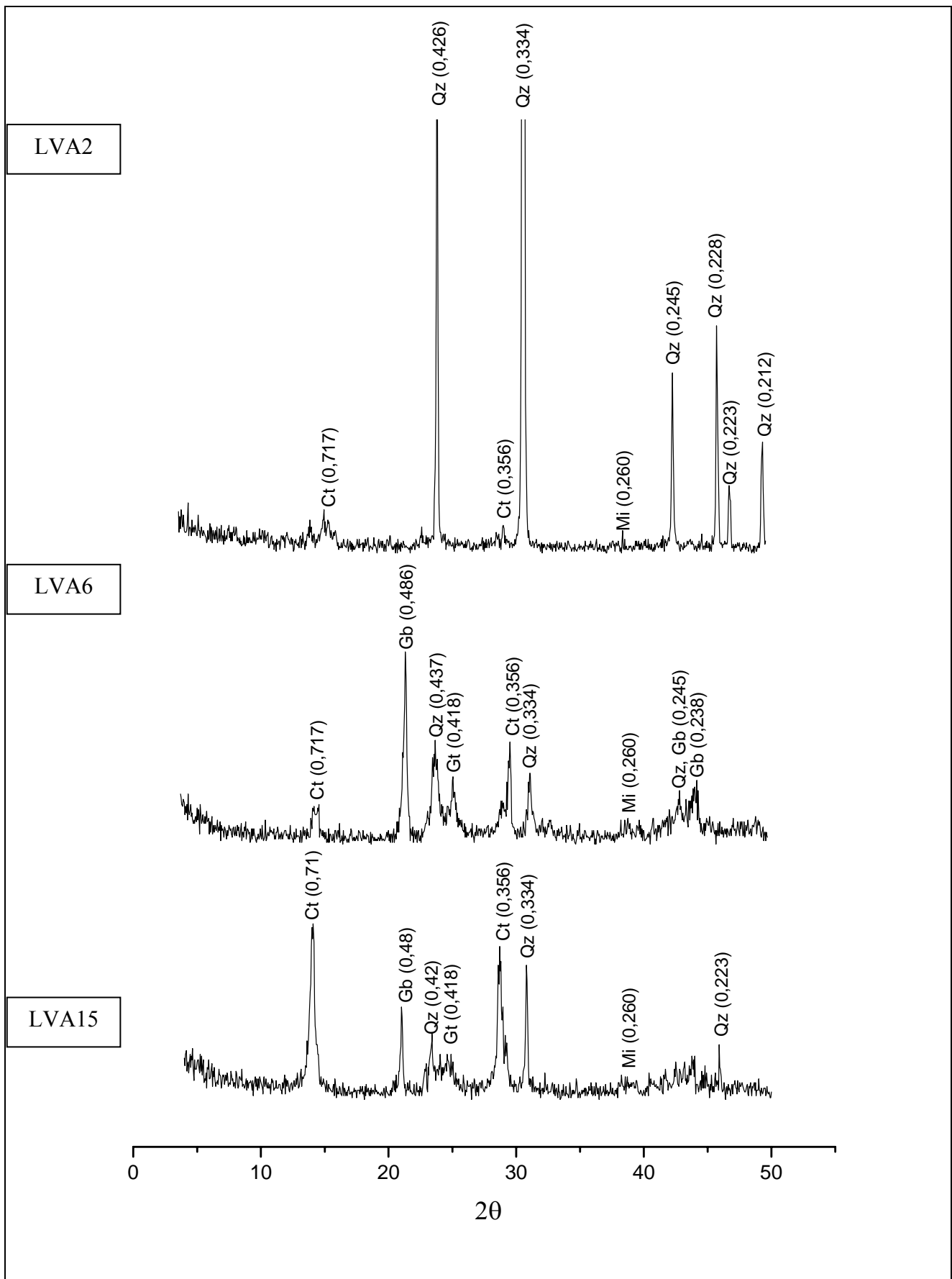


Figura 23: DRX representativos da fração silte do horizonte Bw dos LVA. Ct: caulinita; Gb: gibbsita; Gt: goethita; Mi: mica; Qz: quartzo.

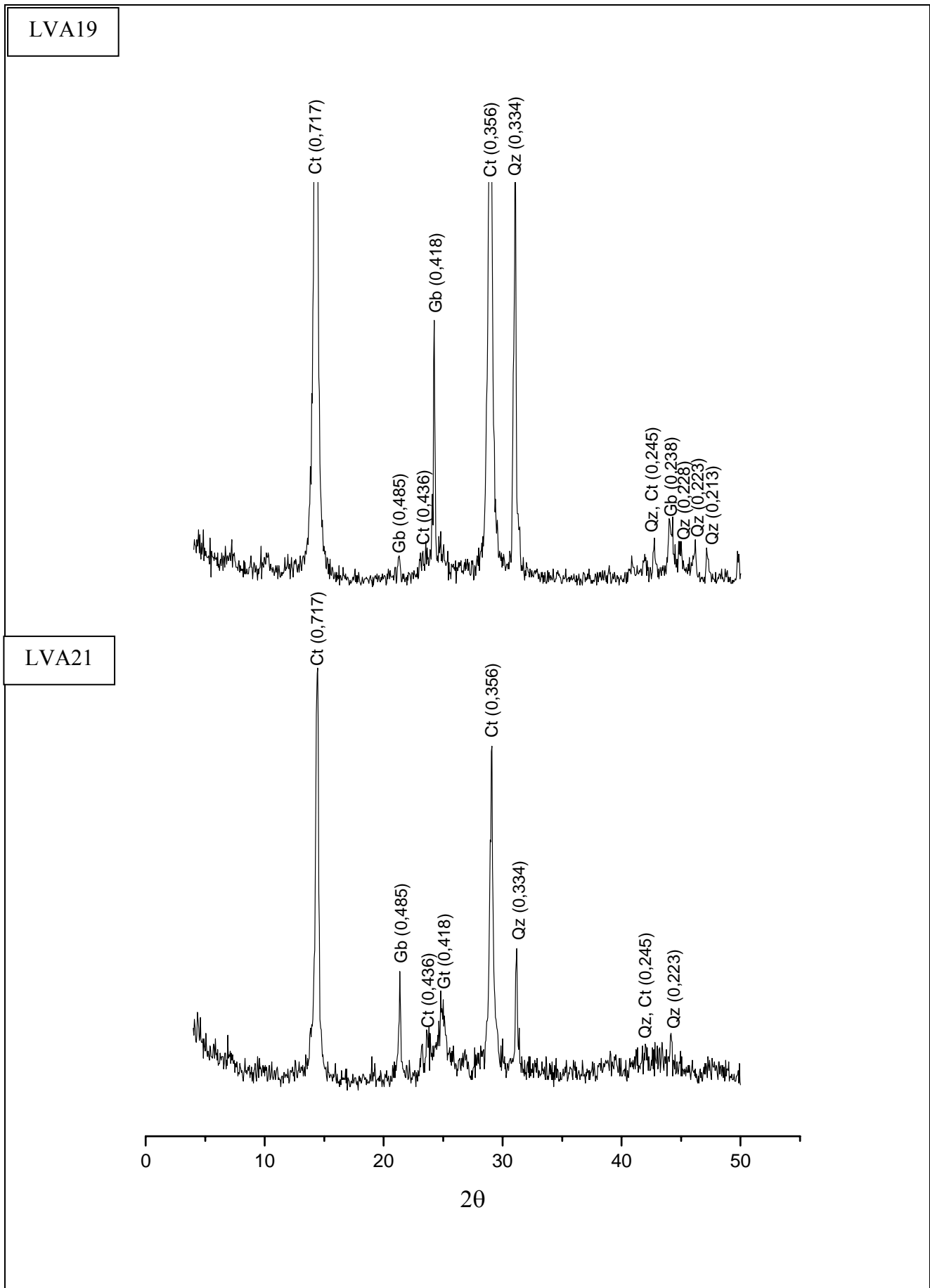


Figura 24: DRX representativos da fração silte do horizonte Bw dos LVA. Ct: caulinita; Gb: gibbsita; Gt: goethita; Mi: mica; Qz: quartzo.

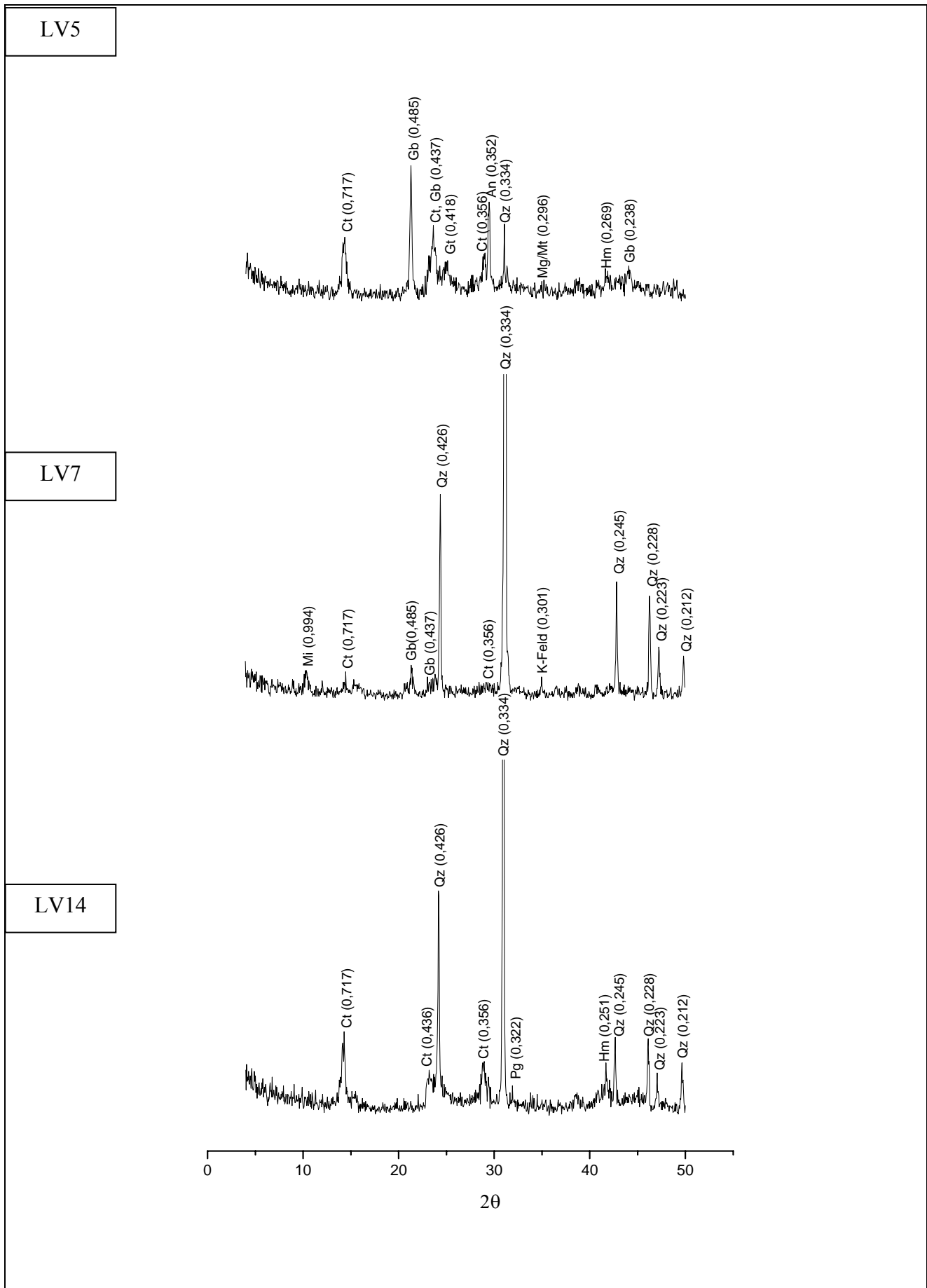


Figura 25: DRX representativos da fração silte do horizonte Bw dos LV. Qz: quartzo; Mi: mica; Ct: caulinita; Pg: plagioclásio; K-Feld: feldspato potássico; Gb: gibbsita.

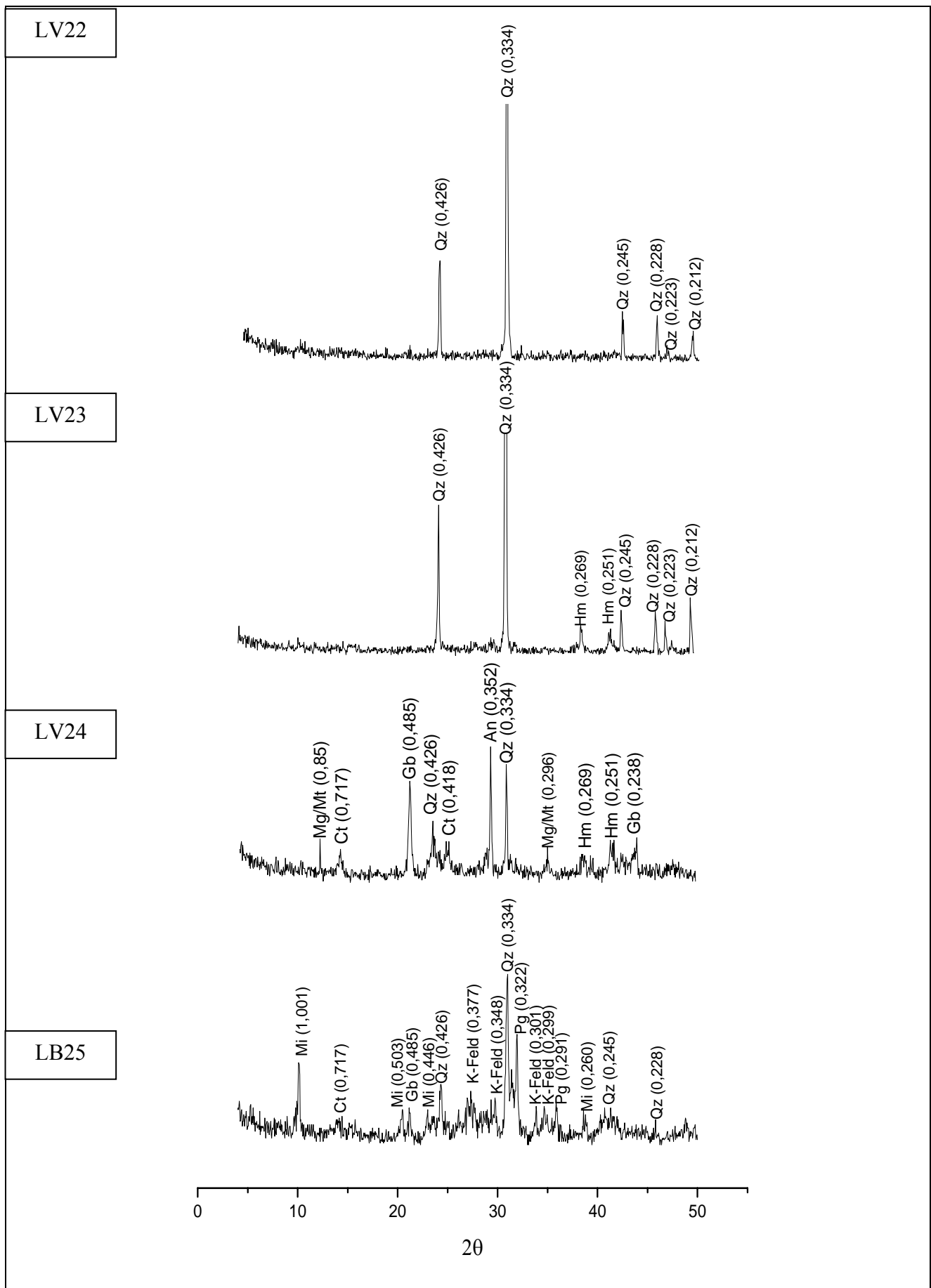


Figura 26: DRX da fração silte do horizonte Bw dos LV. An: anatásio; Ct: caulinita; Gb: gibbsita; Mi: mica; Mt/Mg: magnetita/maghemita; Pg: plagioclásio; Qz: quartzo.

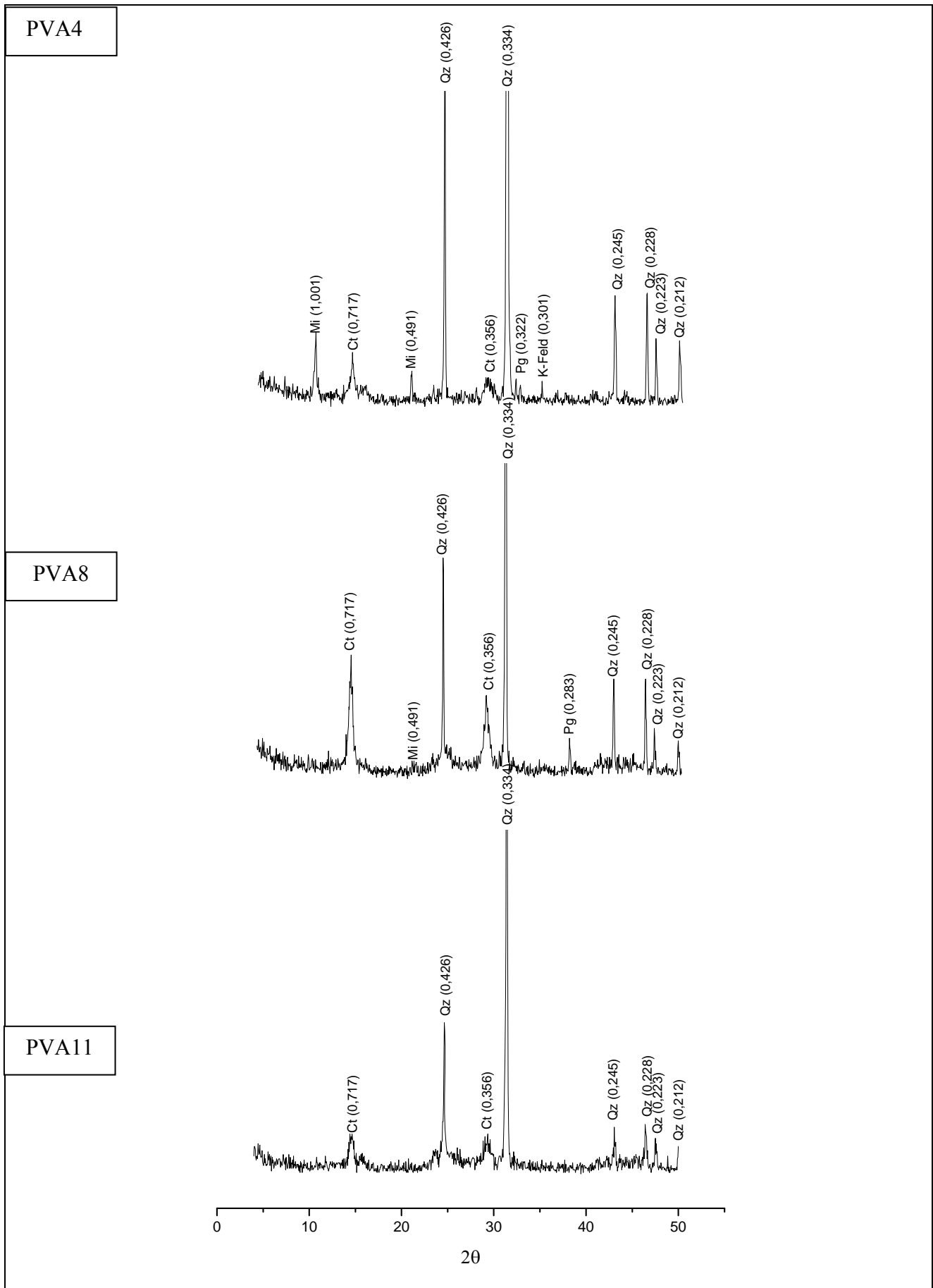


Figura 27: DRX da fração silte do horizonte Bt dos PVA. Ct: caulinita; K-Feld: feldspato potássico; Mi: mica; Pg: plagioclásio; Qz: quartzo.

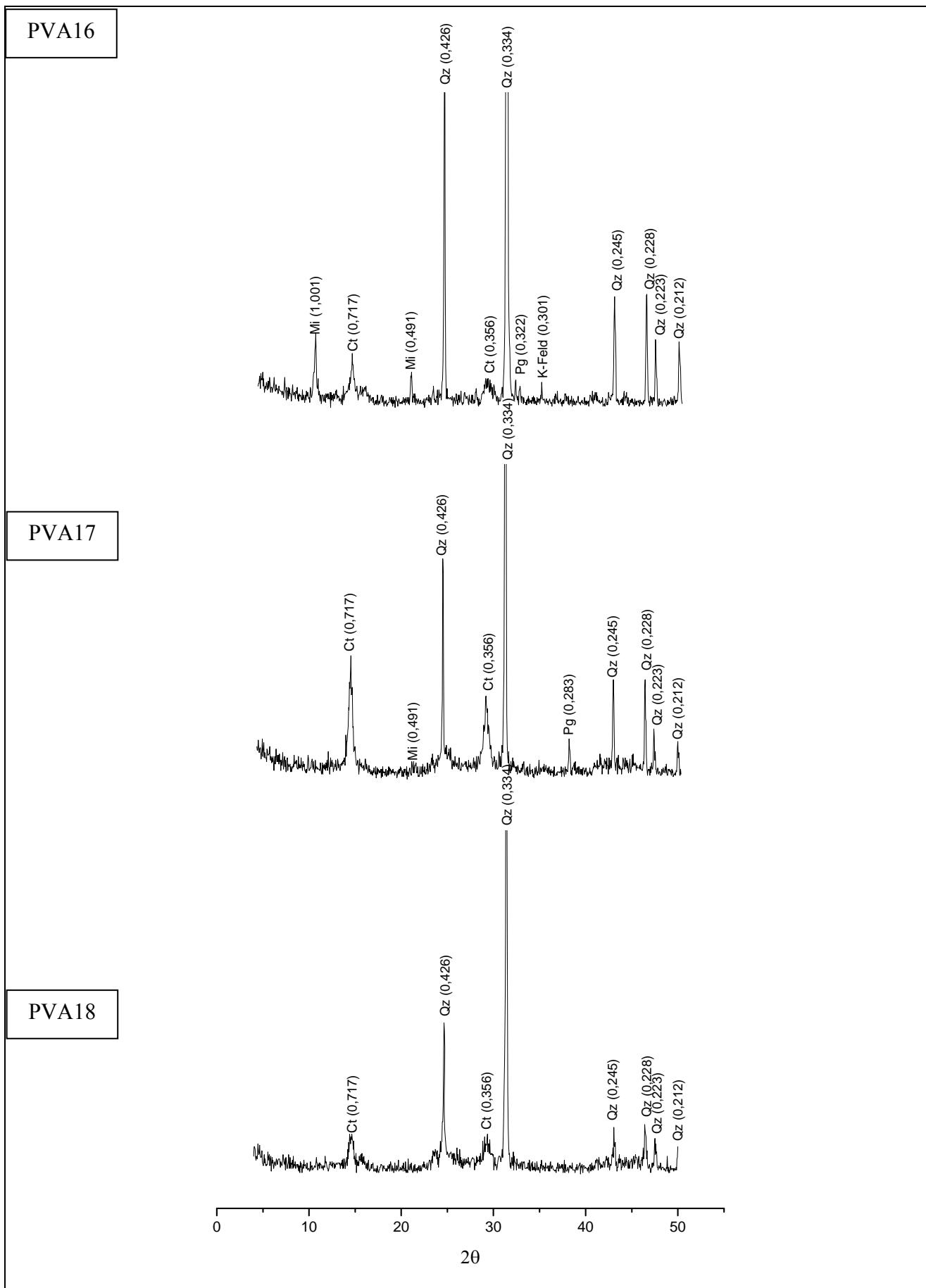


Figura 28: DRX da fração silte do horizonte Bt dos PVA. Ct: caulinita; K-Feld: feldspato potássico; Mi: mica; Pg: plagioclásio; Qz: quartzo

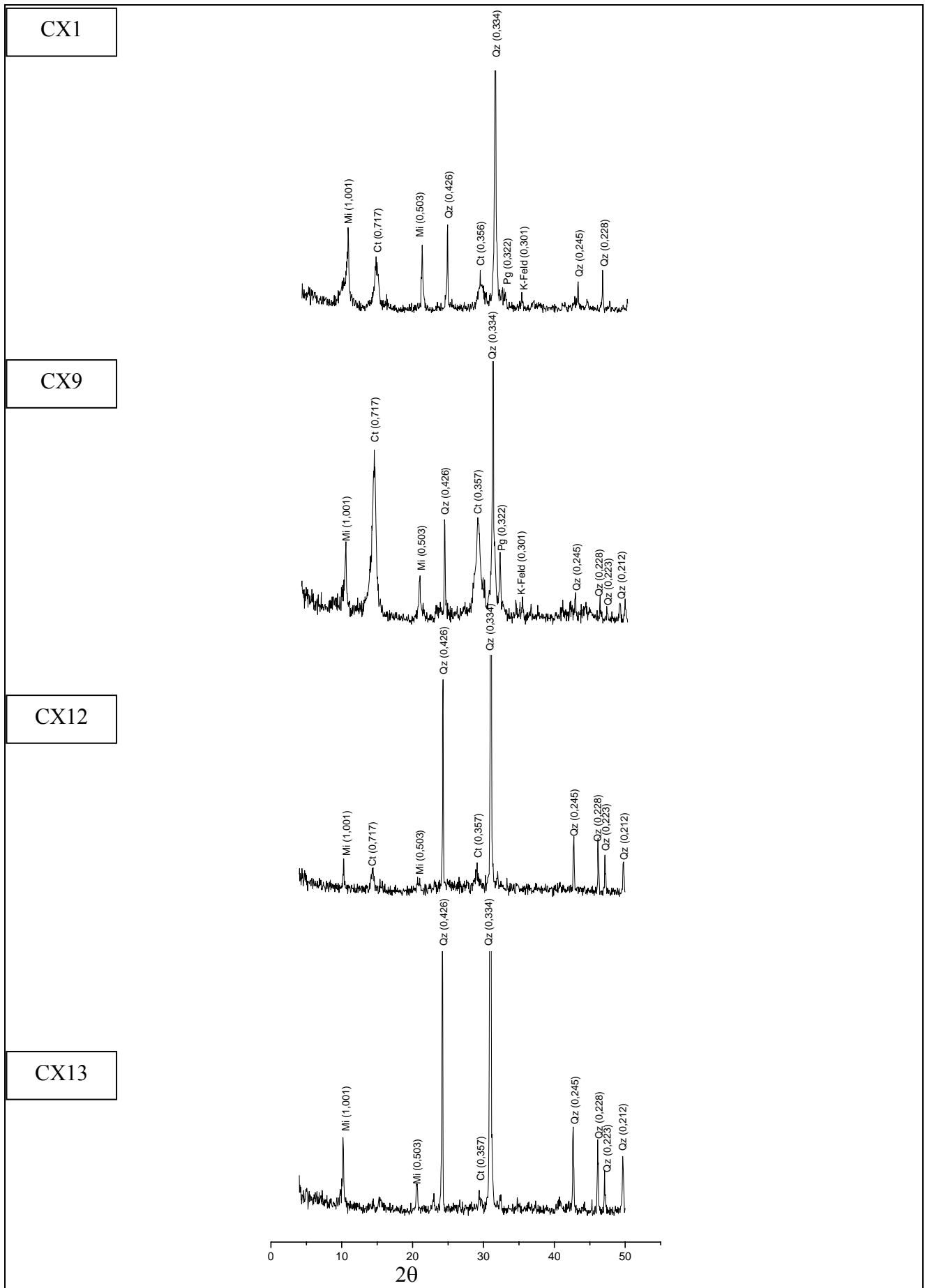


Figura 29: DRX representivos da fração silte do horizonte Bi dos CX. Ct: caulinita; K-Feld: feldspato potássico; Mi: mica; Pg: plagioclásio; Qz: quartzo.

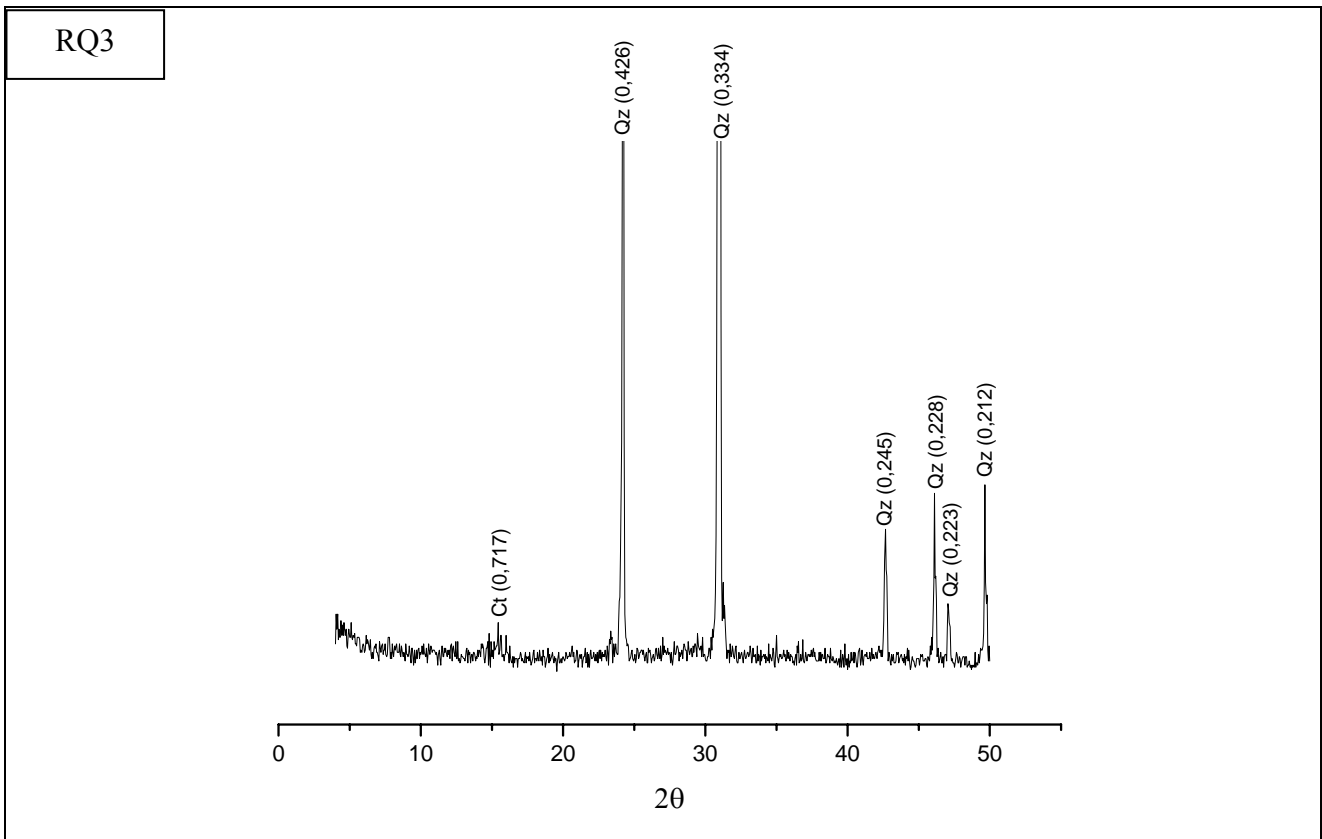


Figura 30: DRX da fração silte do RQ. Ct: caulinita; Qz: quartzo.

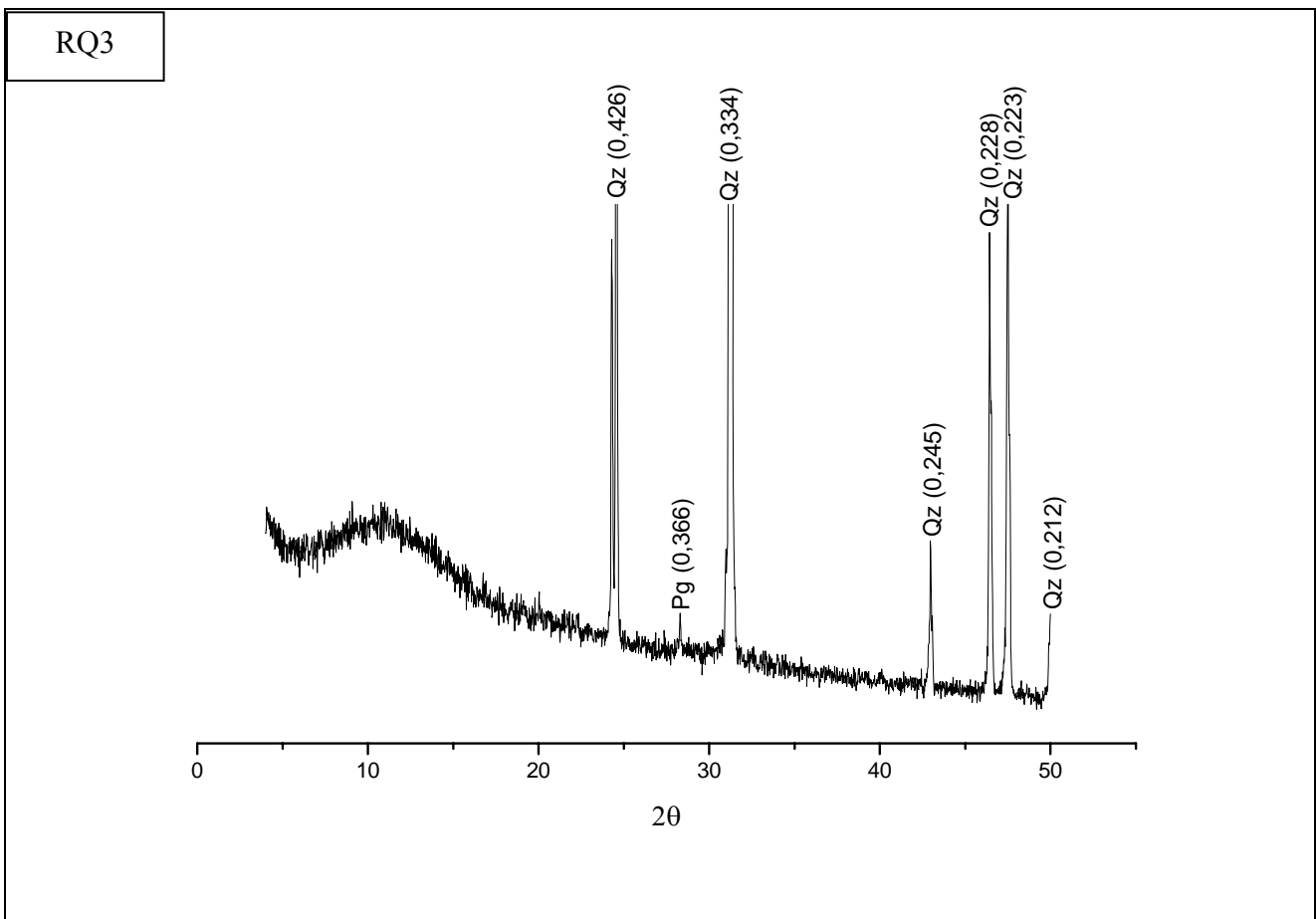


Figura 31: DRX da fração areia do RQ. Ct: caulinita; Qz: quartzo.

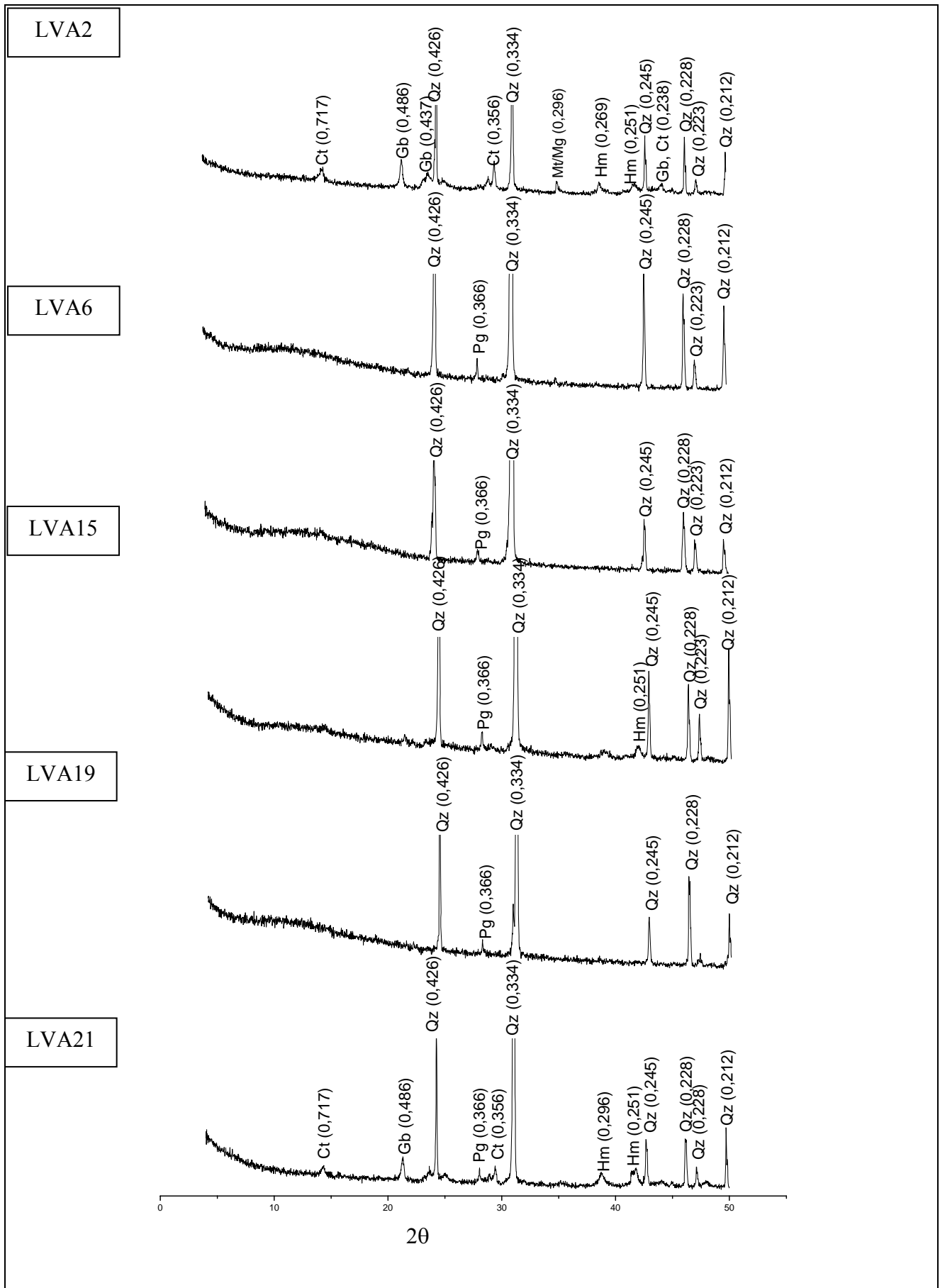


Figura 32: DRX da fração areia do horizonte Bw dos LVA. Ct: caulinita; Gb: gibbsita; K-Feld: feldspato potássico; Mi: mica; Pg: plagioclásio; Qz: quartzo.

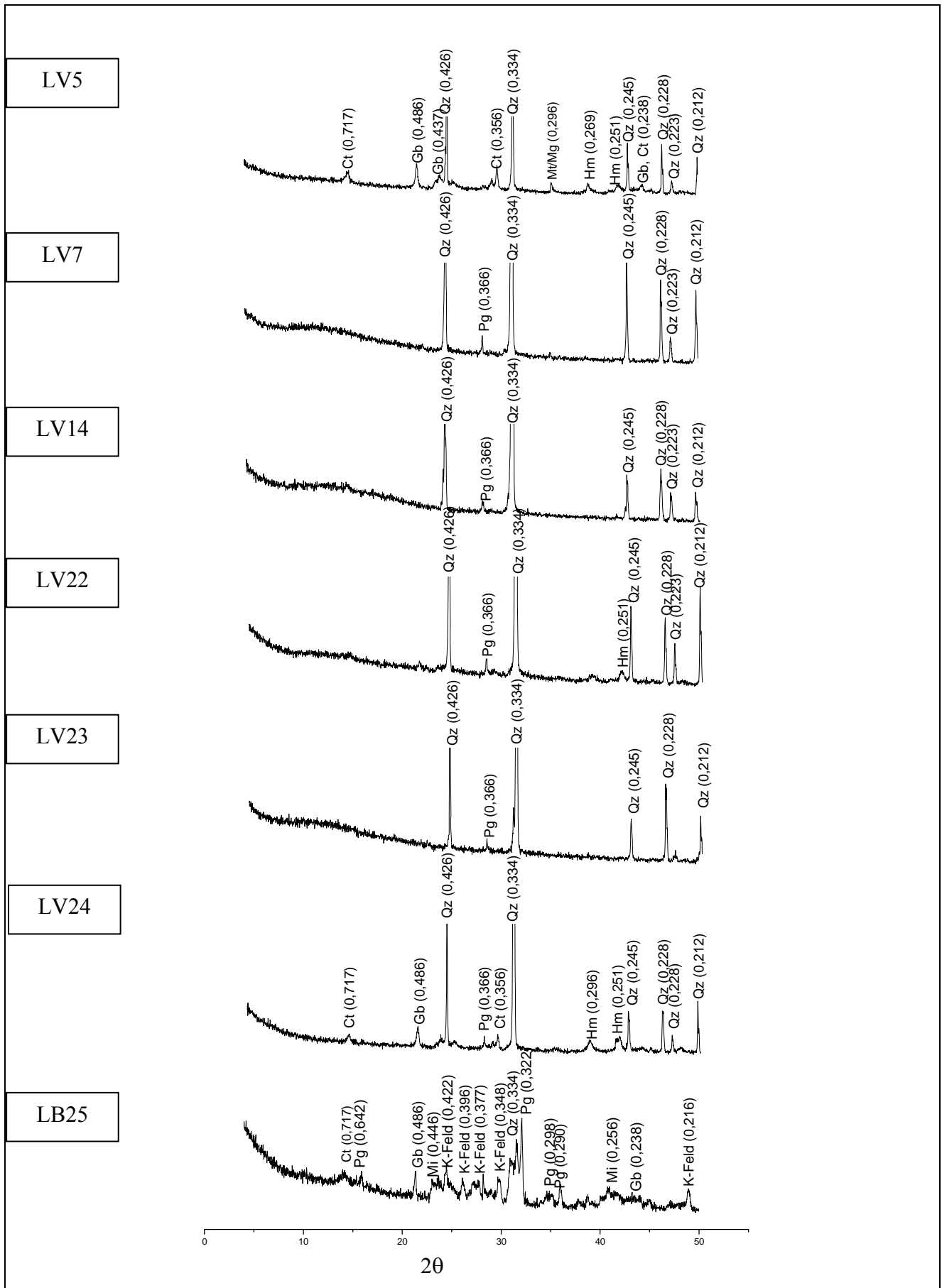


Figura 33: DRX da fração areia do horizonte Bw dos LV e LB. Ct: caulinita; Gt: goethita; K-Feld: feldspato potássico; Mi: mica; Pg: plagioclásio; Qz: quartzo (Cont.).

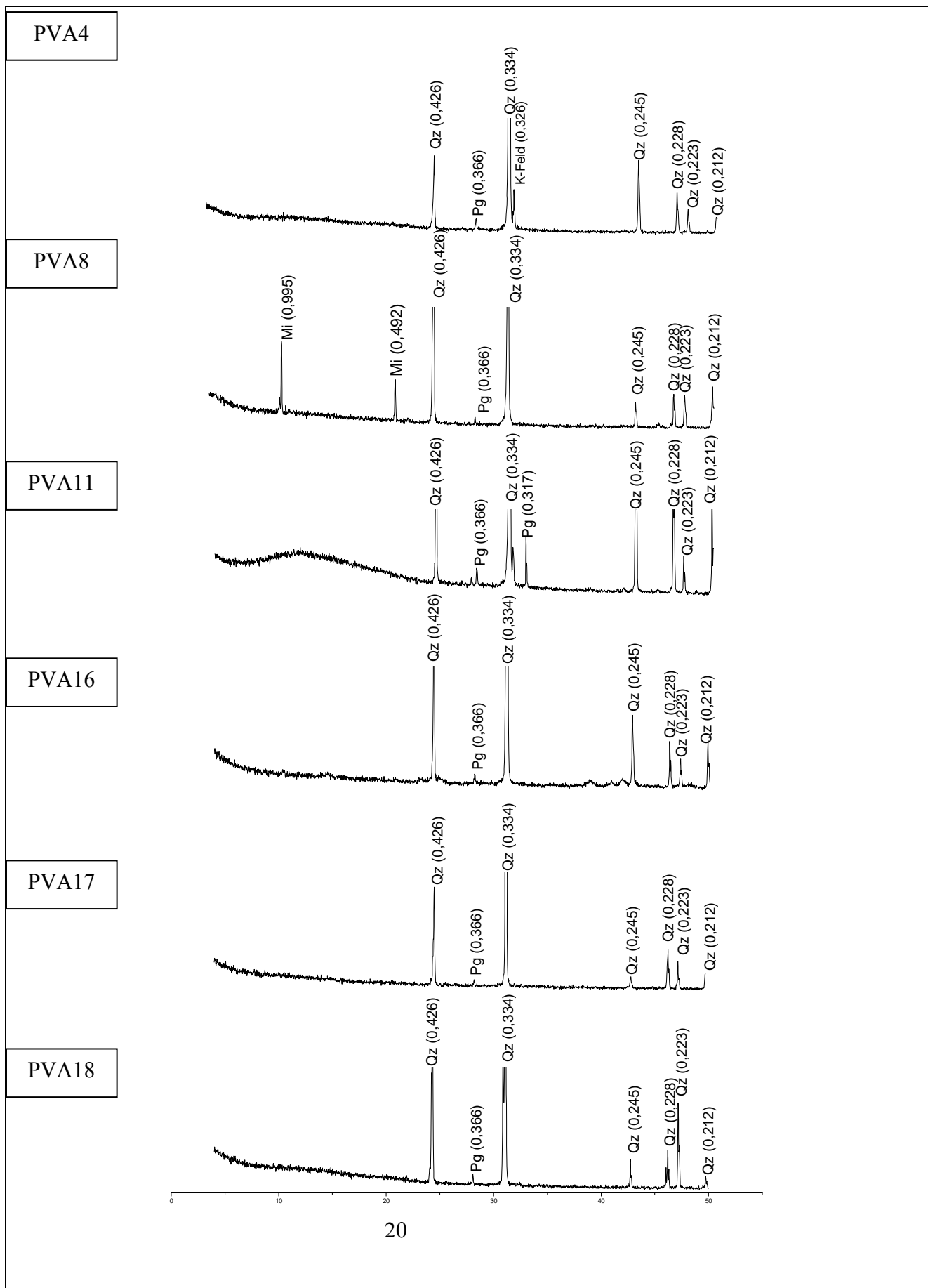


Figura 34: DRX da fração areia do horizonte Bt dos PVA. Ct: caulinita; Gt: goethita; K-Feld: feldspato potássico; Mi: mica; Pg: plagioclásio; Qz: quartzo (Cont.).

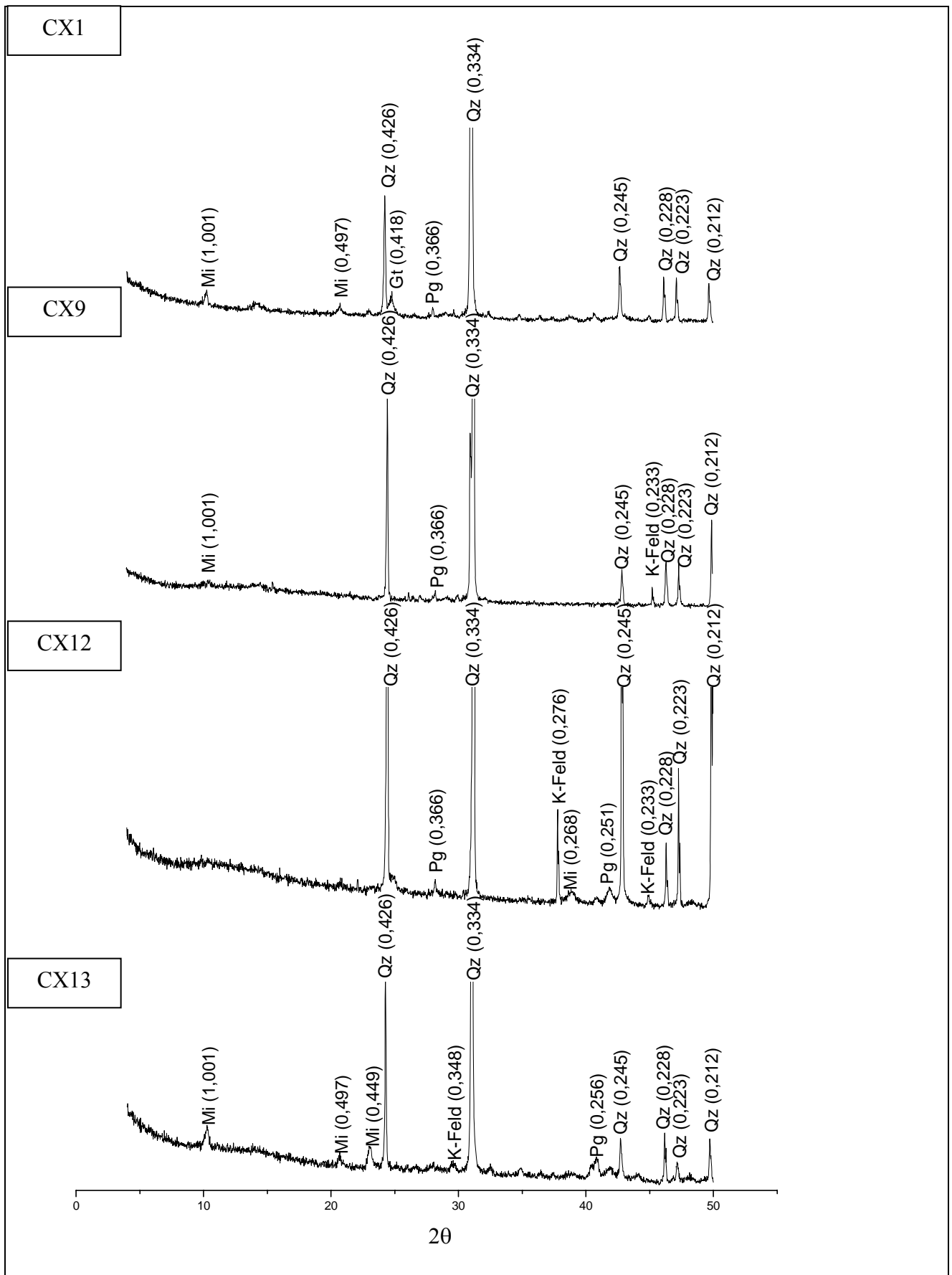


Figura 35: DRX da fração areia do horizonte Bi dos CX. Ct: caulinita; Gt: goethita; K-Feld: feldspato potássico; Mi: mica; Pg: plagioclásio; Qz: quartzo.

4.4. Adsorção de Arsênio em Solos

De acordo com os resultados, houve diferença numérica na capacidade máxima de adsorção de arsênio entre as amostras estudadas, o que se deve ao conjunto de características químicas, físicas e mineralógicas dos solos que conferem a esses uma específica CMAAs.

Em relação aos horizontes A e Bw das classes de solos estudados, não houve diferença estatística entre a média das CMAAs, o mesmo ocorrendo entre uma classe e outra (Quadro 7).

Quadro 7: CMAAs dos Latossolos Vermelho-Amarelos, Latossolos Vermelhos, Argissolos Vermelho-Amarelos e Cambissolos Háplicos ⁽¹⁾

Classe de Solo	LVA	LV	PVA	CX	LVA	LV	PVA	CX
	Horizonte A				Horizonte B			
Média	2.26a	2.37a	1.97a	1.63a	2.51a	2.53a	2.17a	1.68a
Variância	0.20	0.36	0.22	0.01	0.30	0.37	0.33	0.01

⁽¹⁾ Médias seguidas da mesma letra não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5 %

Para uma mesma classe, as diferenças observadas podem ser atribuídas principalmente à textura das amostras como sendo o principal fator que determinou a maior ou menor capacidade do solo em atuar como superfície adsorvente de arsênio, como pode ser observado nos quadros 8 e 9. O teor de argila apresentou correlação significativa positiva a 1% de 0,76 no horizonte A, e 0,79 no horizonte B dos solos estudados. Além da classe textural, o teor de gibbsita nos solos mostrou-se significativo a 10% em ambos os horizontes, demonstrando o papel da mineralogia no que se refere à adsorção de arsênio pelos solos.

Os horizontes B dos solos foram os que, numericamente, mais adsorveram o metalóide (Quadros 10 e 11), provavelmente devido aos mais baixos teores de matéria orgânica em relação ao horizonte superficial, ocasionando menor competição pelos sítios de adsorção (Grafe et al., 2001), embora estatisticamente o carbono orgânico não tenha apresentado correlação significativa nesses horizontes (Quadros 8 e 9).

Quadro 8: Matriz de correlação entre a CMAAs e alguns atributos físicos, químicos e mineralógicos do horizonte A dos solos estudados

Atributo	CMAAs	CTC	CO	Argila	Fed	Feo	$\frac{\text{Feo}}{\text{Fed}}$	pH	Prem	Gibbsita	Caulinita	Ct + Gb
CMAAs	1.00											
CTC	-0.22 ^{ns}	1.00										
CO	0.44**	0.43**	1.00									
Argila	0.76*	-0.30 ^{ns}	0.37 ^o	1.00								
Fed	0.26 ^{ns}	0.10 ^{ns}	0.13 ^{ns}	0.20 ^{ns}	1.00							
Feo	0.41 ^o	0.13 ^{ns}	0.57*	0.20 ^{ns}	0.22 ^{ns}	1.00						
Feo/Fed	0.14 ^{ns}	0.10 ^{ns}	0.40 ^o	-0.03 ^{ns}	-0.31 ^{ns}	0.73*	1.00					
pH	-0.49**	0.60*	-0.06 ^{ns}	-0.45**	0.12 ^{ns}	-0.07 ^{ns}	-0.25 ^{ns}	1.00				
Prem	-0.86*	0.37 ^o	-0.36 ^o	-0.79*	-0.28 ^{ns}	-0.38 ^o	-0.14 ^{ns}	0.68*	1.00			
Gibbsita	0.36 ^o	-0.07 ^{ns}	0.16 ^{ns}	0.50**	0.40 ^o	-0.14 ^{ns}	-0.31 ^{ns}	-0.31 ^{ns}	-0.51**	1.00		
Caulinita	-0.18 ^{ns}	-0.07 ^{ns}	-0.27 ^{ns}	-0.33 ^{ns}	-0.46**	-0.01 ^{ns}	0.25 ^{ns}	0.03 ^{ns}	0.34 ^{ns}	-0.54*	1.00	
Ct + Gb	0.04 ^{ns}	-0.13 ^{ns}	-0.20 ^{ns}	-0.02 ^{ns}	-0.25 ^{ns}	-0.11 ^{ns}	0.08 ^{ns}	-0.19 ^{ns}	0.03 ^{ns}	0.09 ^{ns}	0.80*	1.00

*, **, ^o e ns: Significativo a 1%, 5%, 10% e não-significativo.

Quadro 9: Matriz de correlação entre a CMAAs e alguns atributos físicos, químicos e mineralógicos do horizonte B dos solos estudados

Atributo	CMAAs	CTC	CO	Argila	Fed	Feo	$\frac{\text{Feo}}{\text{Fed}}$	pH	Prem	Gibbsita	Caulinita	Ct +Gb
CMAAs	1.00											
CTC	-0.28 ^{ns}	1.00										
CO	0.27 ^{ns}	0.15 ^{ns}	1.00									
Argila	0.79*	-0.31 ^{ns}	0.46*	1.00								
Fed	0.27 ^{ns}	0.13 ^{ns}	-0.01 ^{ns}	0.02 ^{ns}	1.00							
Feo	-0.06 ^{ns}	-0.03 ^{ns}	0.38 ^o	0.02 ^{ns}	0.08 ^{ns}	1.00						
Feo/Fed	-0.23 ^{ns}	-0.20 ^{ns}	0.04 ^{ns}	-0.26 ^{ns}	-0.55**	0.42 ^o	1.00					
pH	-0.34 ^{ns}	0.40 ^o	0.00 ^{ns}	-0.29 ^{ns}	-0.04 ^{ns}	-0.18 ^{ns}	-0.03 ^{ns}	1.00				
Prem	-0.67**	0.44*	-0.16 ^{ns}	-0.55**	-0.46*	-0.11 ^{ns}	0.14 ^{ns}	0.43 ^o	1.00			
Gibbsita	0.41 ^o	-0.35 ^{ns}	0.34 ^{ns}	0.46*	0.38 ^o	-0.05 ^{ns}	-0.30 ^{ns}	-0.17 ^{ns}	-0.68**	1.00		
Caulinita	0.16 ^{ns}	-0.01 ^{ns}	-0.31 ^{ns}	0.07 ^{ns}	-0.44*	-0.28 ^{ns}	0.25 ^{ns}	0.05 ^{ns}	0.36 ^{ns}	-0.50*	1.00	
Ct + Gb	0.46*	-0.25 ^{ns}	-0.12 ^{ns}	0.39 ^o	-0.25 ^{ns}	-0.36 ^{ns}	0.08 ^{ns}	-0.06 ^{ns}	-0.06 ^{ns}	0.12 ^{ns}	0.80**	1.00

*, **, ° e ns: Significativo a 1%, 5%, 10% e não-significativo.

Os resultados demonstraram que a maior capacidade de adsorção, 3.56 mg/g de As foi determinada na amostra de Latossolo Vermelho (LV5), cujo valor assemelha-se aos maiores valores encontrados em solos semelhantes nos trabalhos de Campos et al. (2007) e Ladeira e Ciminelli (2004). Essa amostra, além de enquadrar-se na classe textural dos solos muito argilosos, apresentou picos muito pronunciados de gibbsita, hematita e goethita, com teores de 25% do primeiro mineral.

Quadro 10: Coeficientes de determinação e valores referentes aos parâmetros a e b da Equação de Langmuir.

Amostra (Hor. A)	b	a	r	Amostra (Hor. B)	b	a	r
LVA2	2.49	1.40	0.9929	LVA2	2.55	1.53	0.9853
LVA6	2.45	1.04	0.9875	LVA6	2.67	1.12	0.9940
LVA15	1.49	1.36	0.9947	LVA15	1.56	1.33	0.9942
LVA19	2.24	1.38	0.9833	LVA19	2.85	1.16	0.9952
LVA21	2.64	1.18	0.9925	LVA21	2.91	1.21	0.9863
LV5	3.56	1.32	0.9872	LV5	3.58	1.37	0.9850
LV7	2.19	1.18	0.9900	LV7	2.46	1.26	0.9749
LV23	1.81	0.73	0.9891	LV23	1.78	1.33	0.9900
LV24	2.20	1.20	0.9867	LV24	2.77	1.34	0.9908
LV14	2.35	1.14	0.9857	LV14	2.34	1.12	0.9901
LV22	2.13	1.02	0.9914	LV22	2.22	1.05	0.9696
LB25	3.03	1.17	0.9843	LB25	3.08	1.51	0.9771
PVA4	1.98	1.40	0.9822	PVA4	1.93	1.34	0.9881
PVA8	1.46	0.91	0.9860	PVA8	1.98	0.82	0.9739
PVA11	1.52	0.85	0.9856	PVA11	1.63	0.98	0.9852
PVA16	1.84	1.16	0.9967	PVA16	1.88	1.12	0.9778
PVA17	2.62	0.91	0.9913	PVA17	3.25	0.94	0.9646
PVA18	2.44	1.07	0.9948	PVA18	2.33	1.34	0.9732
CX1	1.65	1.11	0.9839	CX1	1.81	0.73	0.9855
CX9	1.51	1.09	0.9913	CX9	1.55	1.16	0.9622
CX12	1.82	0.86	0.9855	CX12	1.7	0.75	0.9830
CX13	1.54	0.69	0.9960	CX13	1.67	0.85	0.9884
RQ3	0.99	1.01	0.9643				

Quadro 11: Coeficientes de determinação e valores referentes ao parâmetro K da Equação de Freundlich.

Amostra (Hor. A)	K	n	r	Amostra (Hor. B)	K	n	r
LVA2	1,39	0,29	0,97	LVA2	1,46	0,28	0,97
LVA6	1,19	0,35	0,97	LVA6	1,34	0,34	0,97
LVA15	0,84	0,28	0,98	LVA15	0,83	0,31	0,96
LVA19	1,31	0,27	0,98	LVA19	1,50	0,26	0,96
LVA21	1,19	0,31	0,97	LVA21	1,46	0,28	0,95
LB25	1,30	0,37	0,97	LB25	1,70	0,28	0,97
LV5	1,66	0,36	0,97	LV5	1,88	0,32	0,96
LV7	1,07	0,35	0,97	LV7	1,25	0,30	0,96
LV14	1,17	0,32	0,97	LV14	1,20	0,32	0,97
LV22	1,03	0,35	0,97	LV22	1,04	0,34	0,97
LV23	0,78	0,39	0,98	LV23	0,97	0,30	0,96
LV24	1,10	0,34	0,97	LV24	1,44	0,29	0,97
PVA4	0,99	0,34	0,98	PVA4	0,96	0,36	0,94
PVA8	0,68	0,33	0,97	PVA8	0,88	0,33	0,97
PVA11	0,65	0,38	0,97	PVA11	0,74	0,38	0,97
PVA16	0,93	0,33	0,98	PVA16	0,99	0,30	0,97
PVA17	1,24	0,34	0,97	PVA17	1,53	0,34	0,96
PVA18	1,23	0,33	0,98	PVA18	1,33	0,26	0,97
CX1	0,87	0,26	0,95	CX1	0,73	0,41	0,96
CX9	0,80	0,33	0,96	CX9	0,83	0,30	0,97
CX12	0,85	0,33	0,98	CX12	0,76	0,40	0,96
CX13	0,65	0,41	0,98	CX13	0,74	0,38	0,95
RQ3	0,27	0,52	0,95				

Outro aspecto a ser ressaltado são os valores relativamente elevados de Fe amorfo nesses solos, conforme observado na relação Feo/Fed desse solo em torno de 0,50 e 0,60 nos horizontes A e B, respectivamente.

Como pode ser observado no quadro 10, outra amostra de Latossolo Vermelho (LV23) apresentou comportamento oposto ao LV5, exibindo uma das menores CMAAs entre os Latossolos. Apesar de possuir aspectos muito semelhantes no que se refere à cor do solo, as maiores diferenciações demonstradas nos difratogramas dessa amostras

se referem à maior presença de micas e aos picos menos pronunciados de gibbsita, com teores deste mineral, obtidos da ATG, em torno de 15 % menores. Quanto às micas, esses minerais 2:1 apresentam mais cargas negativas do que a caulinita, o que diminui a capacidade das partículas coloidais do solo em adsorverem arsênio.

A baixa relação Feo/Fed desse solo (em torno de 0,04), e, principalmente, o baixo teor de argila do LV23, podem explicar a menor capacidade de adsorção a este solo. Trata-se, portanto, de um solo ligeiramente mais jovem, o que pode ser observado pela maior soma de bases e maior eletronegatividade. O PCZ estimado (Keng e Uehara, 1974) próximo de 3, sugere maior tendência à repulsão de cargas negativas, o que é corroborado com os teores relativamente elevados de P-rem desse solo.

Dentre os solos que mostraram os valores elevados de CMAAs, destacou-se o Latossolo Bruno, com valor de 3,08 mg/g As. Características como a elevada adsorção de fósforo, evidenciada pelos valores muito baixos de P-rem, a textura muito argilosa desse solo, relação Feo/Fed relativamente elevada (0,5 no Bw), associados à presença de óxidos de ferro e alumínio, como a goethita e gibbsita, são um conjunto de fatores indicativos do potencial deste solo em adsorver arsênio.

Latossolos de textura franco-siltosa e de mineralogia predominantemente caulínica, semelhantemente à maioria dos Cambissolos estudados, tiveram comportamento similar quanto à adsorção de arsênio, no que se refere tanto ao parâmetro *b* quanto ao parâmetro *a* da equação de Langmuir.

Entre os horizontes A e os horizontes diagnósticos B, as maiores diferenças foram observadas em alguns Argissolos, principalmente no horizonte Bt do PVA17, que obteve nos resultados a mais elevada CMAAs entre os Argissolos (3,25 mg/g As), como pode ser observado no quadro 10. Neste caso, houve um incremento de argila no horizonte Bt de 23 %. O caráter eutrófico deste solo se deve a pouca participação do Al^{3+} no complexo de troca, uma vez são baixos os teores cátions trocáveis e, conseqüentemente, de soma de bases. A elevada adsorção de arsenato provavelmente se deveu à presença da goethita, que apresentou pico pronunciado em 0,41 nm no difratograma relativo a este solo (vide mineralogia, figura 13) e à caulinita, mineral predominante na fração argila, que, em pH ácido, apresenta cargas negativas nas bordas quebradas.

Em relação aos Argissolos estudados, estes, de um modo geral, apresentaram

granulometria mais grosseira e mineralogia menos oxidica/gibbsítica do que os Latossolos, possivelmente sendo a razão pela qual a média da CMAAs dos primeiros (2,16 no Bt) é ligeiramente inferior aos segundos (2,46 no Bw). Em razão da translocação de argila dentro do perfil, o horizonte A dos Argissolos muitas vezes apresenta textura franco-arenosa ou franco-siltosa. Além disso, em regiões de relevo movimentado, esses solos, muitas vezes, estão localizados em posição de acúmulo de sedimentos, tendendo, muitas vezes, à eutrofia. Os maiores teores de bases trocáveis, tenderão a tornar o pH do solo levemente mais alcalino, conferindo menor CMAAs ao solo com estas características em relação a perfis mais ácidos e distróficos de Argissolo.

É importante considerar, entretanto, que alguns solos, mesmo apresentando pH em H₂O relativamente elevado, o ponto de carga zero (PCZ) desses solos pode estar acima do pH do meio, gerando, conseqüentemente, um balanço de cargas positivo aos colóides do solo. Como pode ser observado no quadro 4, referente às características químicas dos solos, a amostra PVA8 foi a única a apresentar PCZ estimado (Keng e Uehara, 1974) acima do pH da solução de equilíbrio no horizonte A.

Na classe dos Cambissolos, a CMAAs média foi de aproximadamente 1,6 mg/g de As em ambos os horizontes, os quais não diferiram substancialmente quanto a esses valores, com exceção do CX1. Neste solo, os resultados adsorção de arsênio, provavelmente em decorrência da muito menor relação silte/argila do horizonte subsuperficial, e, além disso, a elevada saturação por alumínio neste horizonte sugere a possibilidade de existência de formas de alumínio amorfo, elevando a CMAAs em 8 %. Resultados de Feo aumentando em profundidade, juntamente com a maior relação Feo/Fed no horizonte B, também podem contribuir para a maior adsorção de arsênio neste horizonte.

Entre todos os Cambissolos, a maior CMAAS foi de 1,82 mg/g de As, correspondendo à amostra CX12, que, juntamente com o CX13, apresentaram granulometria mais fina (franco-argilo-siltosa) em relação aos demais. Deve-se destacar que, em relação à textura do solo, a amostra CX12 estatisticamente não diferiu da CX13, entretanto, a presença de picos indicativos da presença de óxidos de ferro nos difratogramas dessa primeira amostra revela a importância da mineralogia na adsorção de arsênio.

O Neossolo Quartzarênico, em função de a mineralogia ser composta basicamente por quartzo, nas frações acima de 0.05 mm, e caulinita (e algum quartzo)

na fração argila, apresentou, como era esperado, menor valor de CMAAs. O quartzo é tido como material inerte, e, portanto, a adsorção de arsênio existente pode ser atribuída às cargas positivas e oxigênios estruturais, ou grupos Al-OH estruturais, existentes nas bordas quebradas da caulinita.

A constante relacionada à energia de ligação do As em relação às partículas sólidas, representada pela variável a da Equação de Langmuir, é tanto menor quanto menos oxidado o solo. Na prática, esses valores indicam ter havido adsorção rápida inicialmente, o que ocorre, normalmente, na presença de óxidos de Fe e Al atuando como adsorvedores de arsênio. É importante destacar, entretanto, que na literatura os valores de energia de ligação podem ser maiores do que os encontrados nesse trabalho, entretanto, a importância desses valores é apenas a de promover a comparação entre solos. Os solos de mineralogia mais caulinítica apresentaram as menores energias de ligação, demonstrando a menor afinidade do material pelos argilominerais, em relação aos óxidos.

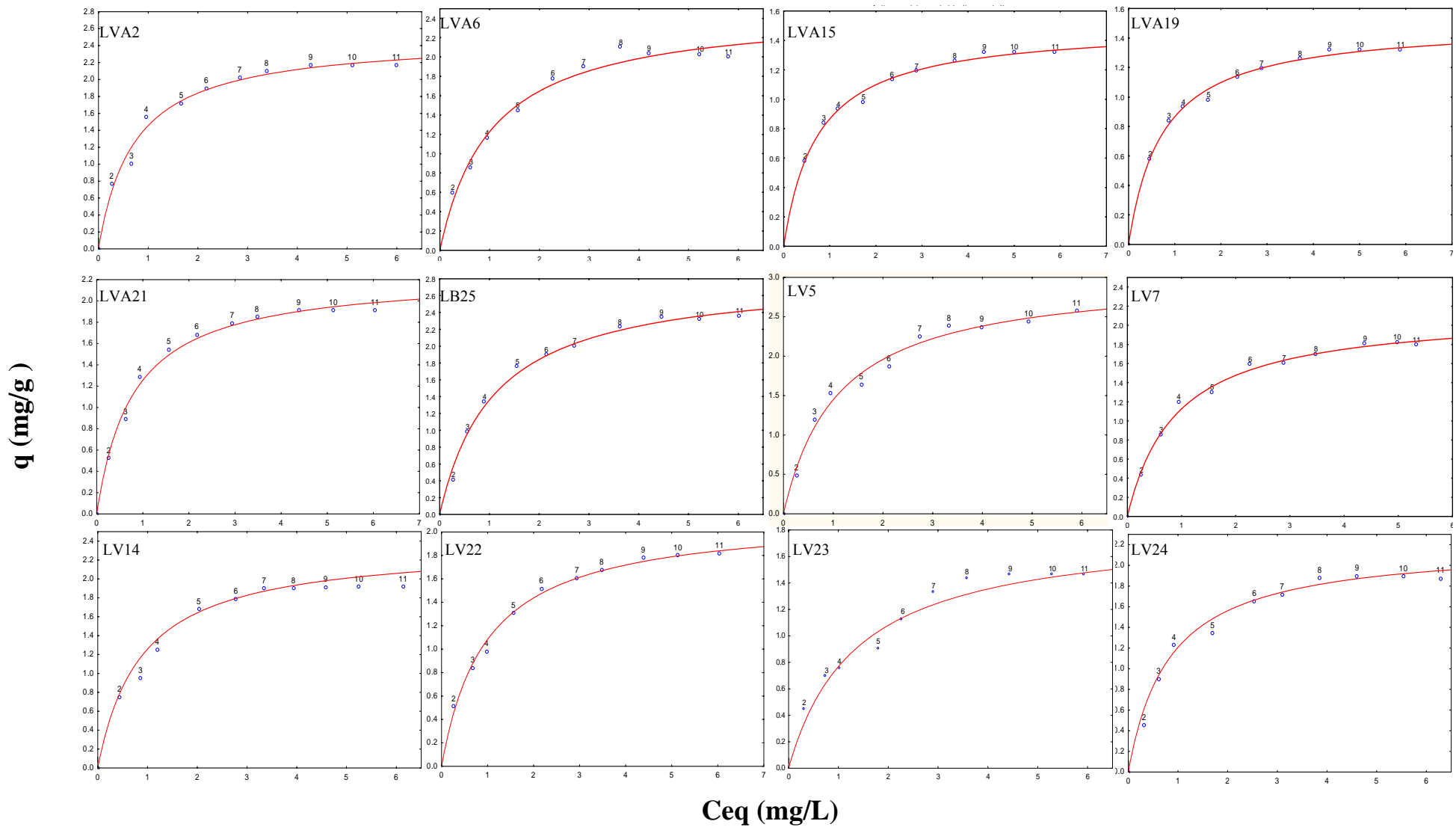


Figura 36: Adsorção de arsenato utilizando-se o horizonte A dos solos estudados. Condição das isothermas: pH=5,5, I=0,15M ajustada com NaNO₃; T= 25±0,5°C. As linhas sólidas representam o ajuste dos dados experimentais à Equação de Langmuir.

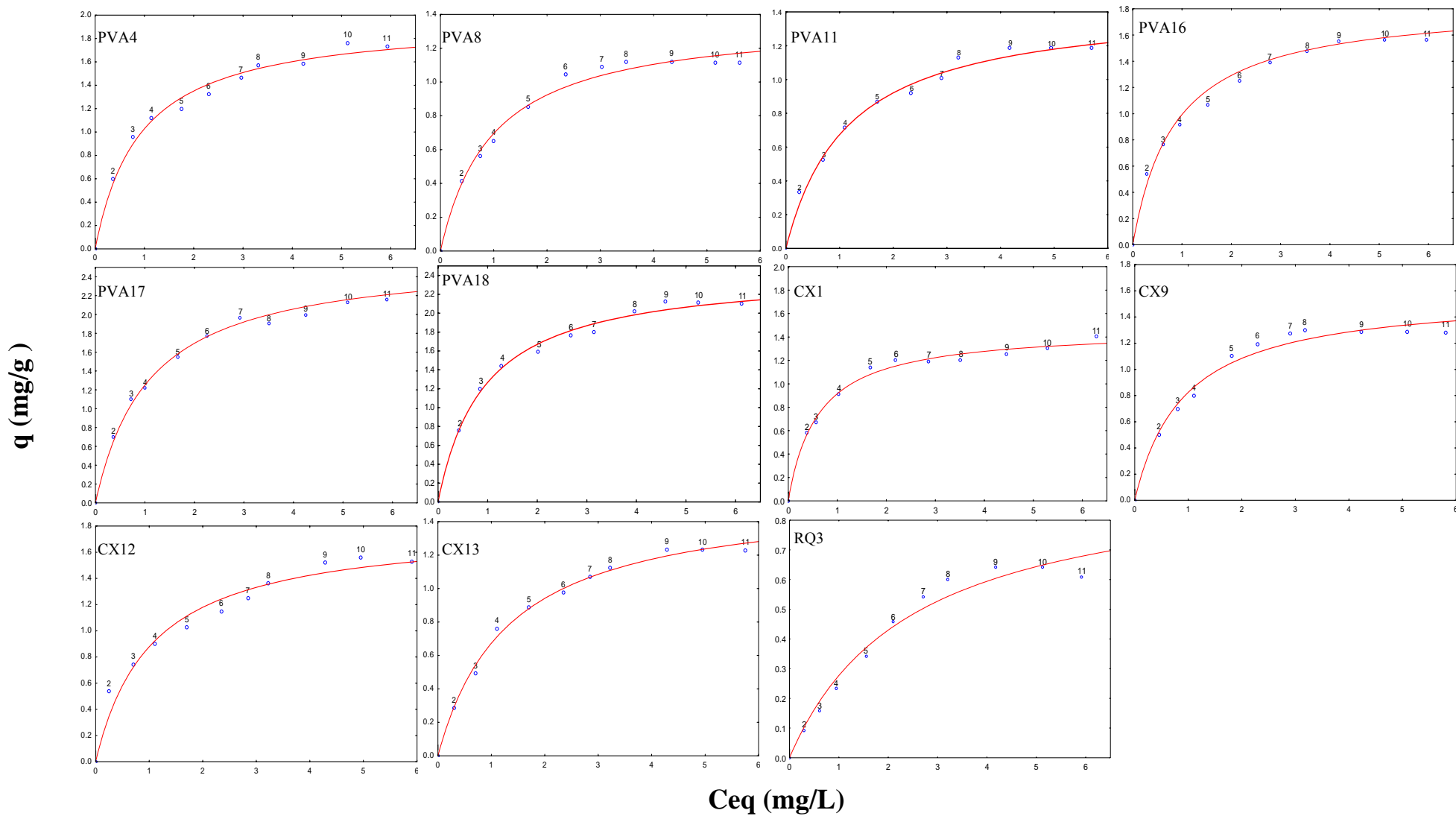


Figura 37: Adsorção de arsenato utilizando-se o horizonte A dos solos estudados. Condição das isothermas: pH=5,5, I=0,15M ajustada com NaNO_3 ; T= 25±0,5°C. As linhas sólidas representam o ajuste dos dados experimentais à Equação de Langmuir. (Cont.)

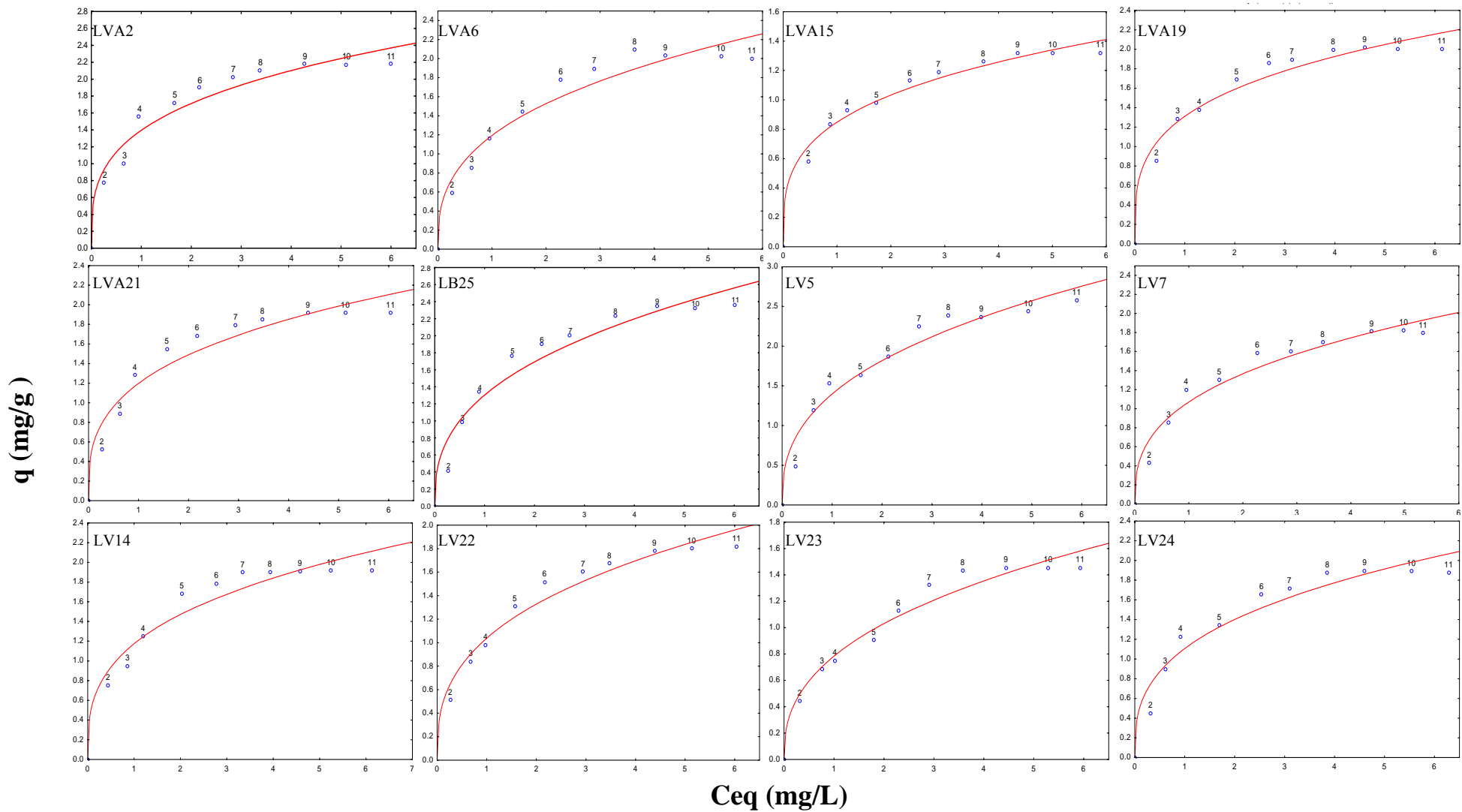


Figura 38: Adsorção de arsenato utilizando-se o horizonte A dos solos estudados. Condição das isothermas: pH=5,5, I=0,15M ajustada com NaNO₃; T= 25±0,5°C. As linhas sólidas representam o ajuste dos dados experimentais à Equação de Freundlich.

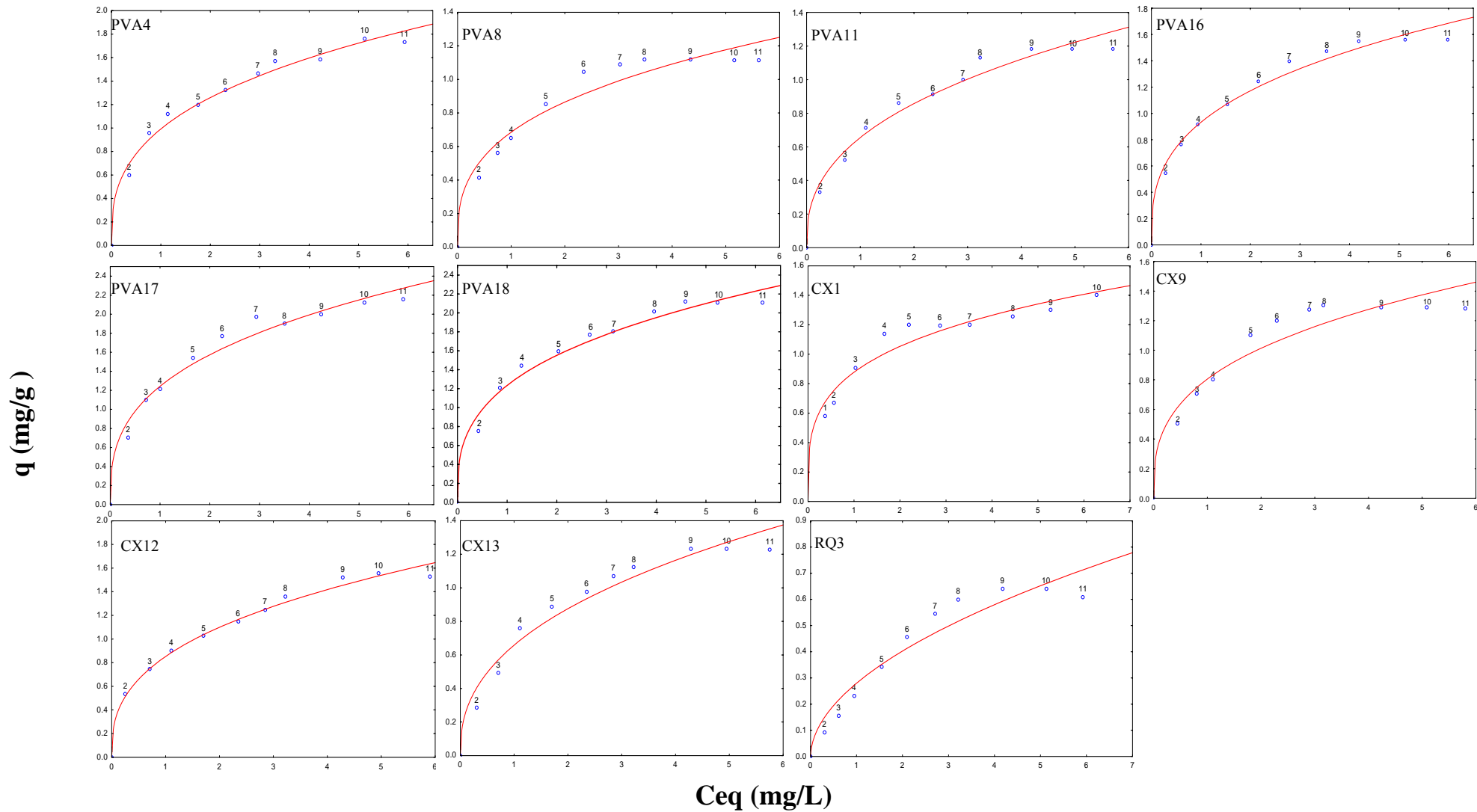


Figura 39: Adsorção de arsenato utilizando-se o horizonte A dos solos estudados. Condição das isothermas: $pH=5,5$, $I=0,15M$ ajustada com $NaNO_3$; $T= 25\pm 0,5^\circ C$. As linhas sólidas representam o ajuste dos dados experimentais à Equação de Freundlich. (Cont.)

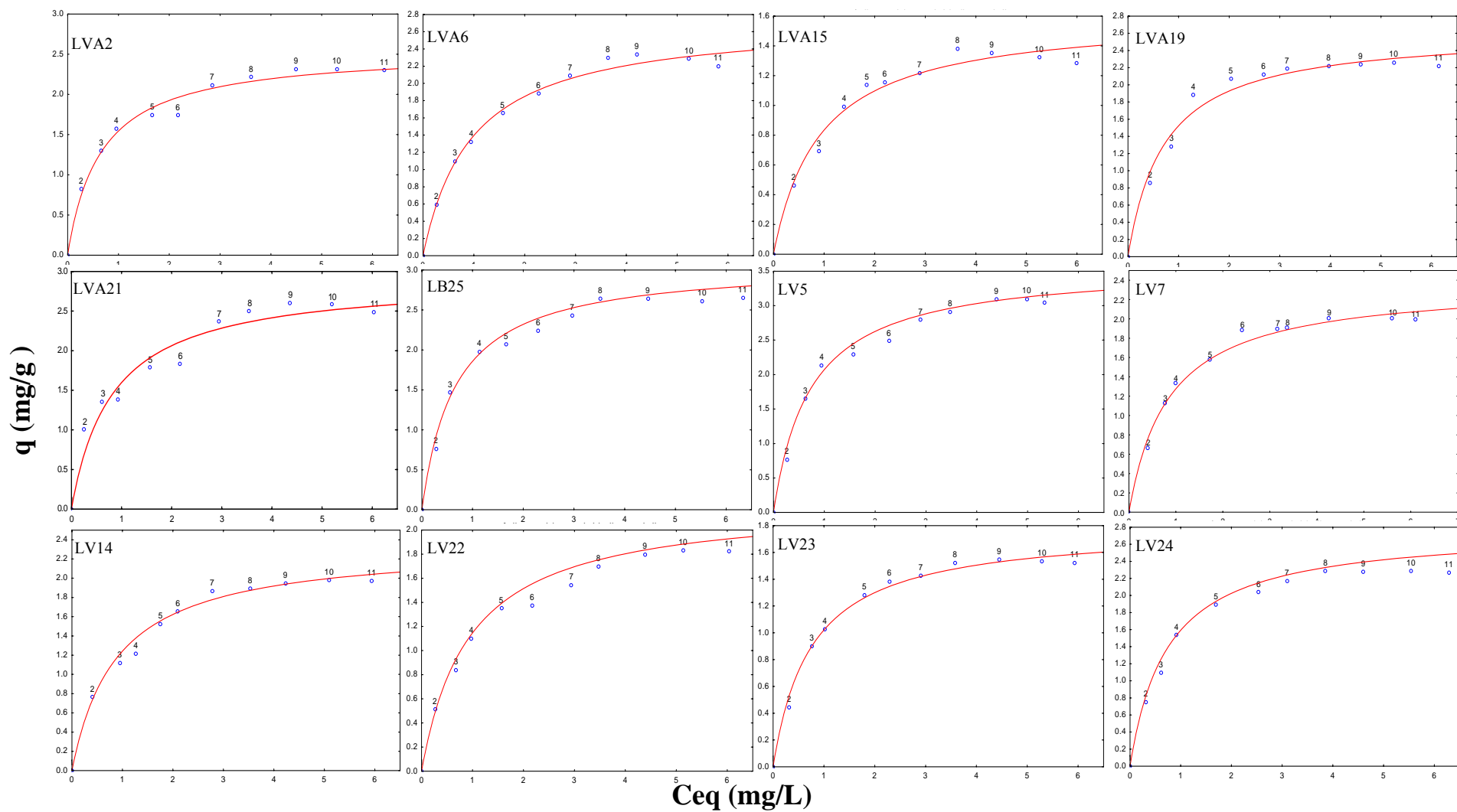


Figura 40: Adsorção de arsenato utilizando-se o horizonte B dos solos estudados. Condição das isotermas: $pH=5,5$, $I=0,15M$ ajustada com $NaNO_3$; $T= 25\pm 0,5^\circ C$. As linhas sólidas representam o ajuste dos dados experimentais à Equação de Langmuir.

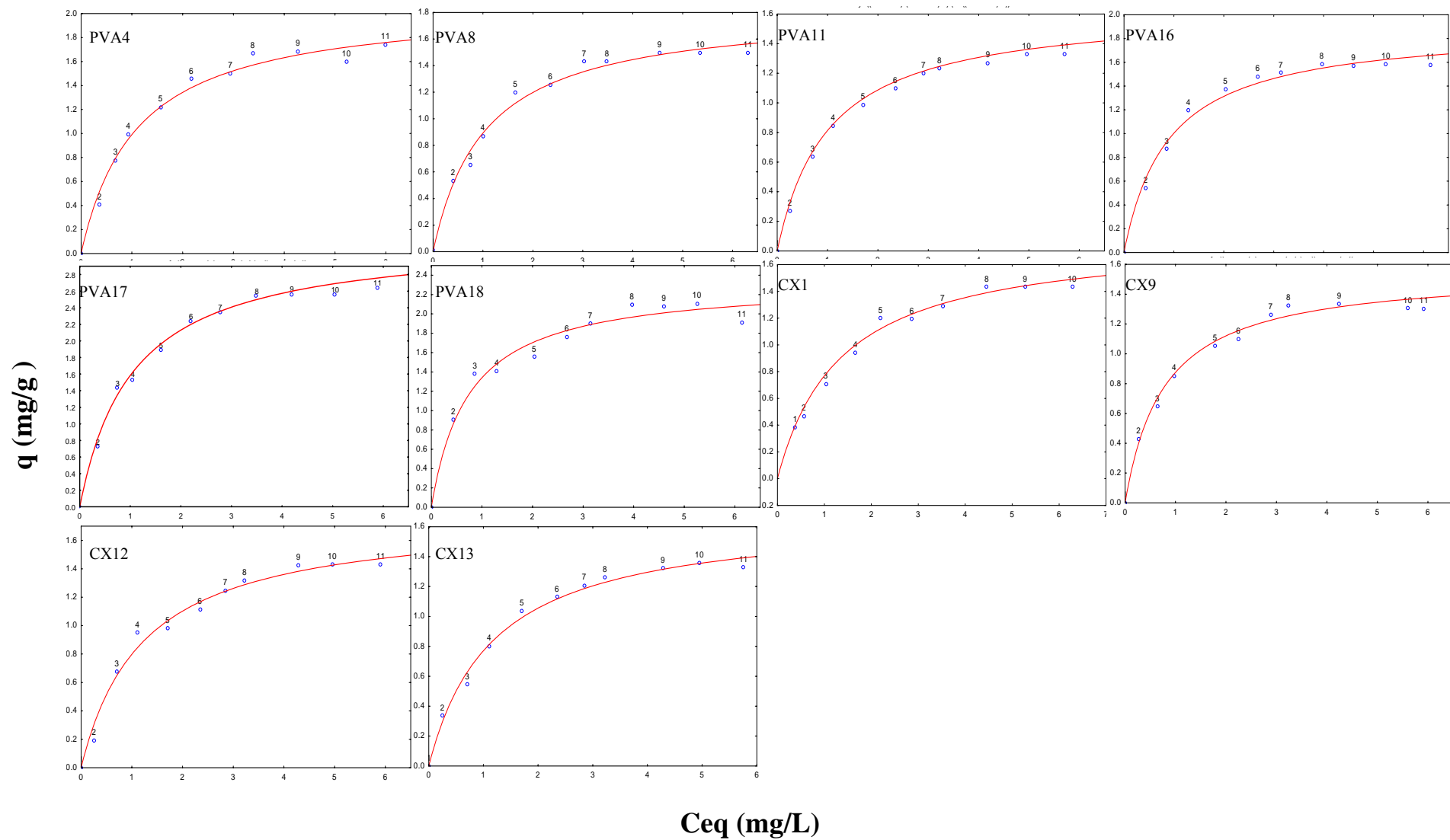


Figura 41: Adsorção de arsenato utilizando-se o horizonte B dos solos estudados. Condição das isothermas: pH=5,5, I=0,15M ajustada com NaNO₃; T= 25±0,5°C. As linhas sólidas representam o ajuste dos dados experimentais à Equação de Langmuir (Cont.).

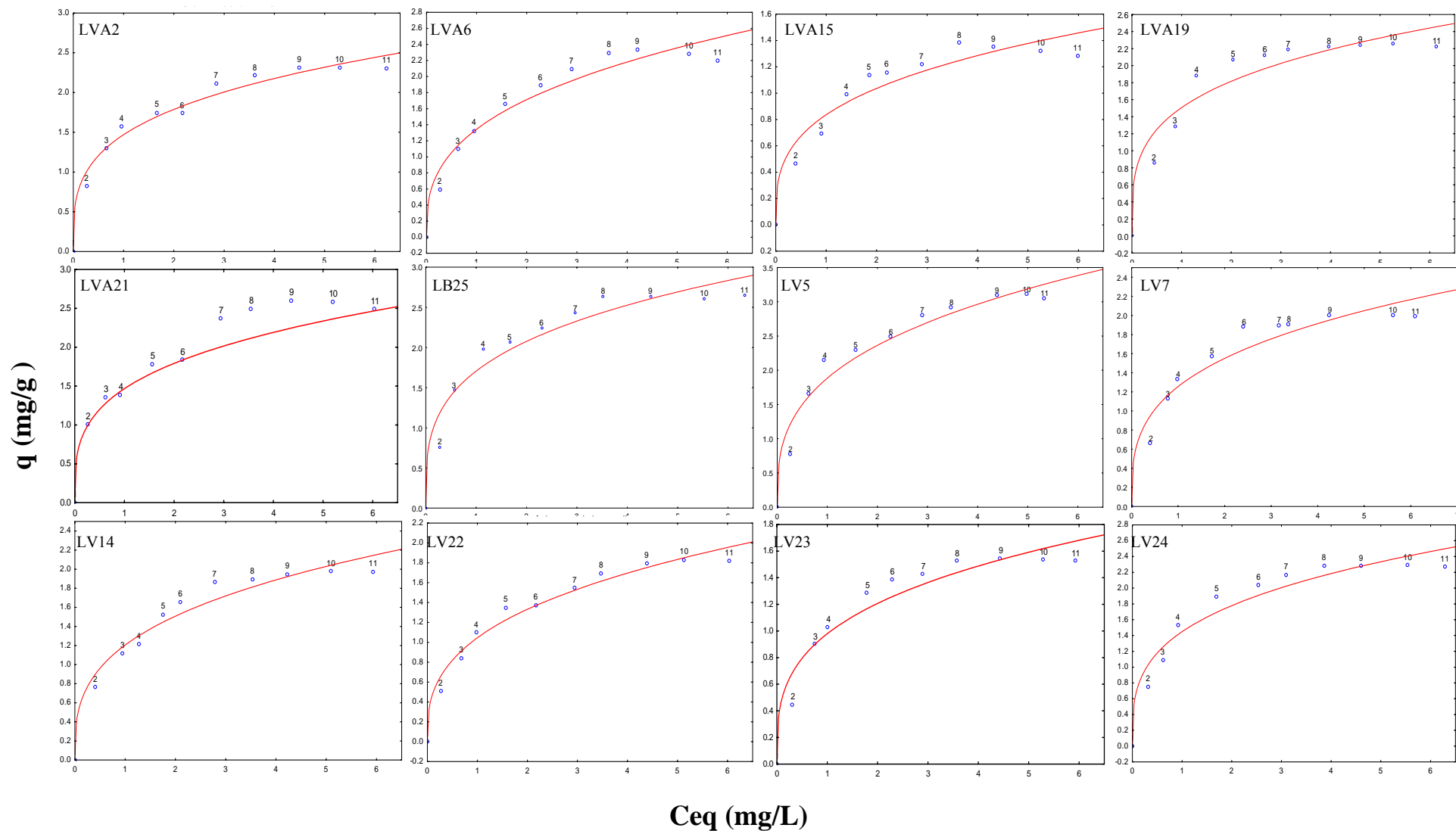


Figura 42: Adsorção de arsenato utilizando-se o horizonte B dos solos estudados. Condição das isotermas: pH=5,5, I=0,15M ajustada com NaNO_3 ; $T = 25 \pm 0,5^\circ\text{C}$. As linhas sólidas representam o ajuste dos dados experimentais à Equação de Freundlich.

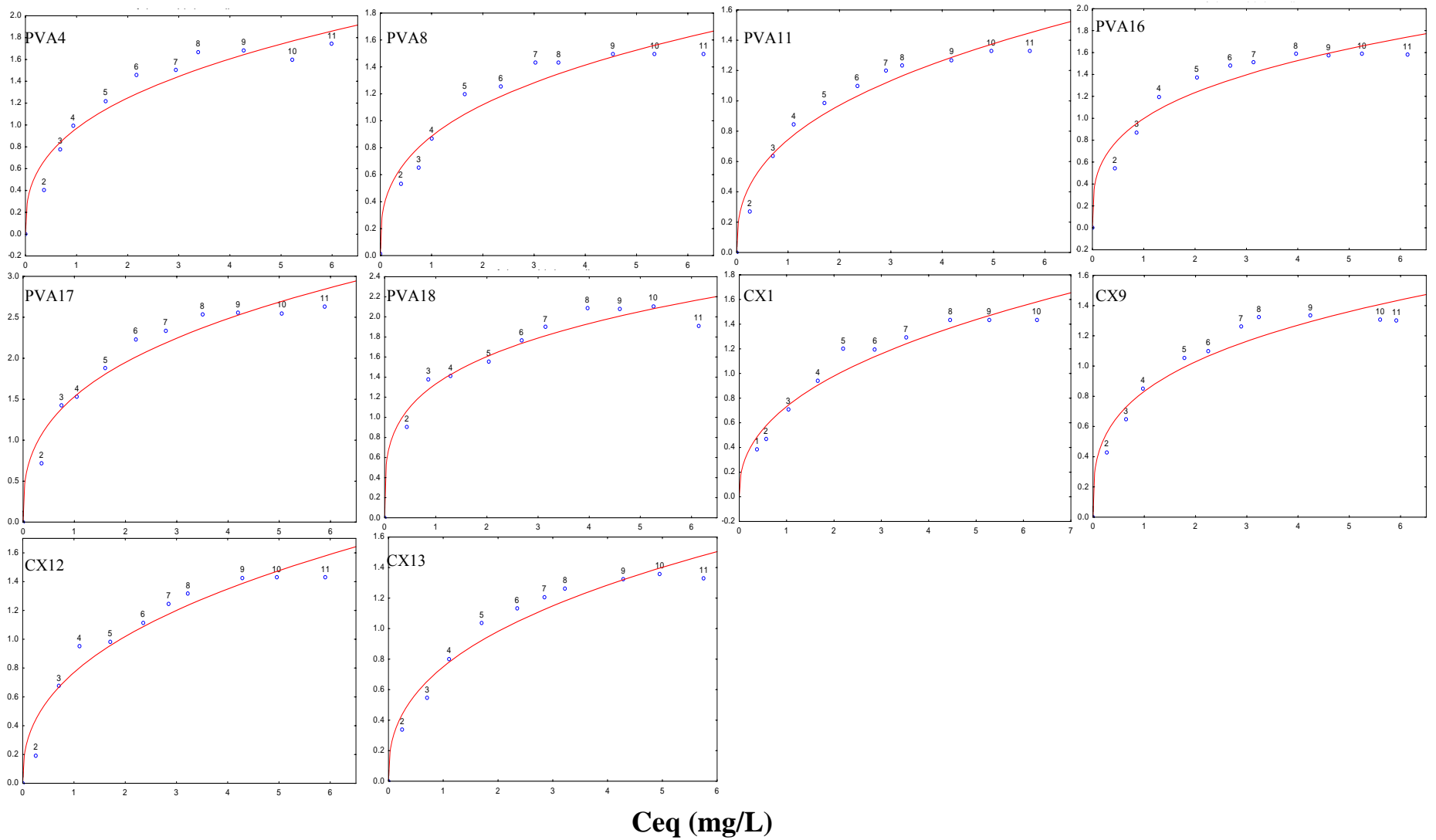


Figura 43: Adsorção de arsenato utilizando-se o horizonte B dos solos estudados. Condição das isothermas: pH=5,5, I=0,15M ajustada com NaNO₃; T= 25±0,5°C. As linhas sólidas representam o ajuste dos dados experimentais à Equação de Freundlich (Cont.).

4.6. Seleção de solos para atuação como barreiras geoquímicas para imobilização de As

A imobilização de certos elementos por meio da adsorção destes por constituintes do solo é uma das técnicas mais utilizadas para remediação de áreas contaminadas por elementos tóxicos, visando, principalmente, a não contaminação de águas superficiais e subterrâneas. Yong e Mulligan (2004) utilizam o termo “Natural Attenuation”, como sendo todo o tipo de processo, incluindo a sorção, que pode reduzir a concentração ou minimizar a toxidez dos contaminantes. O revestimento em valas de rejeito, por exemplo, é uma das utilizações possíveis para essas barreiras geoquímicas, entretanto, este estudo não se restringe a este único propósito, objetivando, sobretudo, gerar conhecimento básico sobre o comportamento do arsênio em classes de solos caracterizadas química, física e mineralogicamente, a fim de que seja possível a extrapolação dos dados em novos estudos.

Os resultados demonstraram que entre os solos estudados, amostras de Argissolo e Latossolo apresentaram grande capacidade adsorvedora de arsênio. Um aspecto relevante no que se refere à utilização dos solos como barreiras geoquímicas para imobilização de As, é a capacidade de infiltração da água no solo. Matéria orgânica, óxidos de ferro e gibbsita são conhecidos como agentes cimentantes que atuam na formação de estrutura granular nos solos. Por outro lado, solos mais caulínicos, tenderão à estrutura em blocos devido ao ajuste face-a-face das partículas (Corrêa, 2005; Resende, 2007). O teor de ADA também pode indicar a possibilidade de entupimentos dos poros, prejudicando a infiltração da água.

Diante disso, os Latossolos possuem características que se tornam uma vantagem para a utilização desses solos como barreira geoquímica, pois, além de serem profundos, apresentam distribuição mais ou menos uniforme de argila ao longo do perfil, elevada estabilidade de agregados e baixo conteúdo de silte em relação à argila (Ker, 1998). A estabilidade química do sistema também é de fundamental importância para reduzir os riscos de remobilização do arsênio no meio. A grande afinidade deste elemento por óxidos de ferro e alumínio, tendendo a formar ligações específicas com estas superfícies, supõe baixo risco de remobilização de arsênio.

5. CONCLUSÕES

A grande diversidade de solos de características químicas, físicas e mineralógicas diversas, demonstrou haver diferenciação numérica quanto à capacidade máxima de adsorção de arsênio para cada solo. A textura influenciou significativamente nesse processo, pois, por tratar-se de solos tropicais, em sua maioria em avançado estágio de alteração, a natureza dos constituintes mineralógicos variou menos do que a textura. No caso dos Latossolos, a grande presença de óxidos conferiu a esta classe maior CMAAs em relação aos demais, tanto maior, quanto mais fina a granulometria das partículas.

Em razão da maior capacidade máxima de adsorção de arsênio, os Latossolos e Argissolos mais oxídicos, ácidos e de textura mais argilosa são os mais indicados para atuarem como barreira geoquímica para imobilização deste elemento.

Para a utilização desses solos como barreira geoquímica para imobilização de arsênio, deve-se levar em consideração a estabilidade química e física do sistema. Para tanto, quimicamente não se espera haver, a princípio, substancial remoção de arsênio desses solos, mas estudos desta natureza ainda devem ser realizados. Quanto aos aspectos físicos, os Latossolos são aqueles que apresentam maior estabilidade pela maior continuidade do sistema poroso e profundidade do solo, permitindo o contato do contaminante por sítios de adsorção reativos que tenderão a imobilizar o elemento.

Com base nas inferências feitas a partir dos resultados, é possível afirmar que,

apesar de mineralogicamente os horizontes A e Bw não diferirem, fatores como: menor teor de C orgânico, a profundidade e estrutura farão com que o horizonte diagnóstico subsuperficial atue mais satisfatoriamente como barreira geoquímica na imobilização de As.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, C.A. de; LOPES, A.S.; SANTOS, G. Micronutrientes. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V.; V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. **Fertilidade do solo**. SBCS, Viçosa, 2007. 1017 p.
- ALMEIDA, J.R. **Cronocromossequência de solos originários de rochas pelíticas do Grupo Bambuí**. Viçosa, MG: UFV, 1979. 150 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição Vegetal) – Universidade Federal de Viçosa, 1979.
- ALVAREZ V., V.H., NOVAIS, R.F., BARROS, N.F. de. et al. Interpretação dos resultados das análises de solos. In: RIBEIRO, A.C., GUIMARÃES, P.T.G., ALVAREZ V., V.H. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais**. 5. Aproximação. Viçosa : CFSEMG, p. 25-32, 1999.
- AMARAL, F.C.S. Aptidão Agrícola das Terras do Estado de Minas Gerais: Avaliação e Adequação. Piracicaba: ESALQ/USP, 1993. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz - Universidade de São Paulo, 1993.
- AURILLO, A.C.; MASON, R.P.; HEMOND, H.F. Speciation and fate of arsenic in 3 lakes of the Aberjona watershed. **Environ. Sci. Technol.**, v. 28, p. 577-585, 1994.
- BDMG - Banco de Desenvolvimento de Minas Gerais. Minas Gerais do Século XXI. Vol. 2. Belo Horizonte: Rona Editora, 2002.

- BOWELL, R.J. Sorption of arsenic by iron oxides and oxyhydroxides in soils. **Appl. Geochem.**, v. 9, p. 279-286, 1994.
- BRASIL. Portaria nº 1469/GM, de 29 de dezembro de 2000. Aprova a Norma de Qualidade da Água para Consumo Humano, que dispõe sobre procedimentos e responsabilidades inerentes ao controle e à vigilância da qualidade da água para consumo humano, estabelece o padrão de potabilidade da água para consumo humano, e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, nº 1-E, 2 jan. 2001. Seção 1, página 19.
- CAIRES, S. M. **Determinação dos teores naturais de metais pesados em solos do Estado de Minas Gerais como subsídio para o estabelecimento de valores de referência de qualidade.** Viçosa, MG: UFV, 2009. 406 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, 2009.
- CAMPOS, M.L.; GUILHERME, L.R.G; VISIOLLI, E.; ANTUNES, A.S.; CURI, N.; MARQUES, J.J.; SILVA, M.L.N. Força iônica da solução de equilíbrio na adsorção de arsênio em Latossolos brasileiros. *Pesq. Agrop. Bras.*, v. 41, p. 457-460. 2006.
- CARNEIRO, P.A., FONTES, M.P.F. Aspectos geográficos e agrícolas do estado de Minas Gerais. In: Fontes, R., Fontes, M.P.F. (eds.). *Crescimento e desigualdade regional em Minas Gerais.* Viçosa: Folha de Viçosa, 2005. p. 151-218.
- COFFIN, D.E. A method for the determination of free iron in the soil and clays. **Can. J. Soil Sci.** v. 43, p. 7-17. 1963.
- CFSEMG. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais, 5ª aproximação.** Lavras, 1999. 359p.
- CORRÊA, M.M. **Óxidos de ferro e tipificação de caulinitas na gênese de solos coesos do ambiente dos tabuleiros costeiros.** Viçosa, MG: UFV, 2005. 194 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, 2008.
- CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução no 357, de 17 de março de 2005. Disponível em <http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res05/res35705.pdf>. Consultado em 6 de abril de 2009.
- DESCHAMPS, E; MATSCHULLAT, J. (orgs.) **Arsênio Antropogênico e Natural: um Estudo em Regiões do Quadrilátero Ferrífero.** Belo Horizonte, FEAM, 330 p. 2007.

- DONAGEMMA, G.K.; RUIZ, H.A.; FONTES, M.P.F.; KER, J.C.; SCHAEFER, C.E.G.R. Dispersão de Latossolos em resposta à utilização de pré-tratamentos na análise textural. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 27, n. 4, p. 765-772, 2003.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília: Embrapa Produção de Informação; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. p.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2ª Ed. rev. atual. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1997. 212 p.
- FANNING, D.S. et al. **Micas**. In: DIXON, J.B.; WEED, S.B. (Eds.). Minerals in soil environments. 2ª ed. Madison: Soil Science Society of America, 1989. p. 551 – 634.
- FONTES, M. P. F. **Iron oxides mineralogy in some Brazilian Oxisols**. Raleigh, USA:1988. 175 p. Tese (Ph.D) - North Carolina State University.
- FONTES, M. P. F.; CARVALHO Jr., I. A. Color attributes and mineralogical characteristics, evaluated by radiometry, of highly weathered tropical soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 69, p. 1162–1172. 2005.
- FONTES, M.P.F.; WEED, S.B. Iron oxides in selected Brazilian Oxisols: I. Mineralogy. **Soil Science Society of America Journal**, v. 55, n. 4, p. 1143-1149. 1991.
- FONTES, M.P.F.; WEED, S.B. Phosphate adsorption by clays from Brazilian Oxisols: relationships with specific surface area and mineralogy. **Geoderma**, v. 72, p. 37-51, 1996.
- FROST, R.R.; GRIFFIN, R.A. Effect of pH on adsorption of arsenic and selenium from landfill leachate by clay minerals. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 41, p. 53-57, 1977.
- FURTINI NETO, A.E.; VALO, F.R. do; RESENDE, A.V. de et al. **Fertilidade do Solo. Lavras**: UFLA, 2001. 252 p.
- GOLDBERG, S.; JOHNSTON, C.T. Mechanisms of arsenic adsorption on amorphous oxides evaluated using macroscopic measurements, vibrational spectroscopy, and surface complexation modeling. **J. Colloid Interface Sci.**, v. 234, p. 204-216, 2001.

- GOLDBERG, S. Competitive adsorption of arsenate and arsenite on oxides and clay minerals. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 66, p. 413-421, 2002.
- GRAFE, M., EICK, M. J., AND GROSSL, P. R. Adsorption of arsenate (V) and arsenite (III) on goethite in the presence and absence of dissolved organic carbon. *Soil Science Society of America Journal*, v. 65, p. 1680–1687. 2001.
- GRIFFIN, R.A.; FROST, R.R., AU, A.K., ROBINSON, G.D.; SHIMP, N.F. Attenuation of pollutants in municipal landfill leachate by clay minerals. **Environ. Geology Notes**, n. 79, p. 1-47, 1997.
- GRIFFIN, R.A. ; AU, A.K.. Lead adsorption by montmorillonite using a competitive Langmuir equation. **Soil Sci. Soc. Am. J.** n. 41, p. 880–882. 1977.
- GUPTA, U.C. A simplified method for determining hot-water soluble boron in Podzols soils. **Soil Sci.**, v. 103, p.424-428. 1967.
- HINGSTON, F.J.; POSNER, A.M.; QUIRK, J.P. Competitive adsorption of negatively charged ligands on oxide surfaces: Discussions. **Faraday Society**, v. 52, p. 334-342, 1971.
- HSIA, T.; LO, S.; LIN, C.; LEE, D. Characterization of arsenate adsorption on hydrous iron oxide using chemical and physical methods. **Colloids and Surfaces A: Physicochem. Engineer. Aspects**, v. 85, p. 1-7, 1994.
- HUGHES, J.C.; BROWN, G. A crystallinity index for soil kaolins and its relation to parent rock, climate and soil nature. **J. Soil Sci.**, v. 30, p. 557-563, 1979.
- JACKSON, M.L. Clay transformation in soil genesis during the quaternary. **Soil Sci.**, v. 99, p. 15-22, 1964.
- JAIN, A.; LOEPPERT, R.H. Effect of competing anions on the adsorption of arsenate and arsenite by ferrihydrite. **J. Environ. Qual.**, v. 29, p. 1422-1430, 2000.
- JAIN, A.; RAVEN, K.P.; LOEPPERT, R.H. Arsenite and arsenate adsorption on ferrihydrite: surface charge reduction and net OH⁻ release stoichiometry. **Environ. Sci. Technol.**, v. 33, p. 1179 -1184, 1999.

- KABATA-PENDIAS A., PENDIAS H. **Trace elements in soils and plants**. Book. Boca Raton, Florida, CRC Press, Inc., p. 31- 315. 1984.
- KELLOG, C.E. Preliminary suggestions for the classification and nomenclature of great soil groups in tropical and equatorial regions. **Common. Bur. Soil Sci. Tech. Comm.**, v. 46, p. 76-85, 1949.
- KENG, J.C.W.; UEHARA, G. Chemistry, mineralogy and taxonomy of Oxisols and Ultisols. **Proc. Soil Crop Sci. Soc.**, v. 33, p. 119-126, 1974.
- KER, J.C. Latossolos do Brasil: uma revisão. **Geonomos**, 1998, v. 5, n. 1, p. 17-40.
- KORTE, N.E., SKOPP, J., FULLER, W.H., NIEBLA, E.E., ALESII, B.A. Trace element movement in soils. Influence of soil physical and chemical properties. **Soil Sci.**, v. 122, p. 350-359, 1976.
- LADEIRA, A.C.Q.; CIMINELLI, V.S.T.; DUARTE, H.A.; ALVES, M.C.M.; RAMOS, A.Y. Mechanism of anion retention from EXAFS and density functional calculations: arsenic(V) adsorbed on gibbsite. **Geochim. Cosmochim. Acta**, v. 65, p. 1211-1217, 2001.
- LADEIRA, A.C.Q.; CIMINELLI, V.S.T.; NEPOMUCENO, A.L. Seleção de solos para a imobilização de arsênio. **R. Esc. Minas**, v. 55, p. 215-221, 2002.
- LIMA, C.E.P. Produção de mapas de vulnerabilidade de solos e de aquíferos à contaminação por metais pesados para o Estado de Minas Gerais. Tese de Mestrado. Departamento de Solos, Universidade Federal de Viçosa. 2007.
- LIN, Z.; PLUS, R. W.. Adsorption, desorption and oxidation of arsenic affected by clay minerals and aging process. **Environ. Sci. Technol.** v. 34, p. 3131–3136, 2000.
- LINDSAY, W.L. **Chemical Equilibria in Soils**. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1979. 449 p.
- MANDAL, B.K.; SUZUKI, K.T. Arsenic around the world: a review. **Talanta**, v. 58, p. 210-235, 2002.
- MANNING, B.A.; GOLDBERG, S. Adsorption and stability of arsenic(III) at the clay mineral-water interface. **Environ. Sci. Technol.**, v. 31, p. 2005-2011, 1997.

- MANNING, B.A.; GOLDBERG, S. Modeling competitive adsorption of arsenate with phosphate and molybdate on oxides minerals. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 60, p. 121-131, 1996a.
- MANNING, B.A.; GOLDBERG, S. Modeling arsenate competitive adsorption on kaolinite, montmorillonite and illite. **Clays Clay Miner.**, v. 44, p. 609-623, 1996b.
- MASSCHELEYN, P.H.; DELAUNE, R.D., PATRICK Jr., W.H., Effect of redox potential and pH on arsenic speciation and solubility in a contaminated soil, **Environ. Sci. Technol.**, v. 25, p. 1414–1419, 1991.
- MATIS, K.A.; ZOUBOULIS, A.I.; MALAMAS, F.B.; AFONSO, M.D.R.; HUDSON, M.J. Flotation removal of As(V) onto goethite. **Environ. Pollut.**, v. 97, p. 239-245, 1997.
- McKEAGUE, J.A. **Manual on soil sampling and methods of analysis**. Ottawa, Canadian Society of Soil Science, 1978. 212 p.
- MELLO, J.W.V. de; ROY, W.R., TALBOTT, J.L.; STUCKI, J.W. Mineralogy and Arsenic Mobility in Arsenic-rich Brazilian Soils and Sediments. **J Soils & Sediments**, v. 6, n. 1, p. 9 – 19, 2006.
- MCBRIDE, M.B. **Environmental chemistry of soils**. New York: Oxford University Press, 1994. 406 p.
- MENDONÇA, E.S.; MATOS, E.S. **Matéria orgânica do solo: Métodos de análises**. Viçosa, MG, UFV, 2005. 107 p.
- O'REILLY, S.E.; STRAWN, D.G.; SPARKS, D.L. Residence time effects on arsenate adsorption/desorption mechanisms on goethite. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 65, p. 67-77, 2001.
- PEREIRA, T.T.C. **Mapeamento e estudo de solos em áreas de plantio de eucalipto no município de Curvelo – MG**. Viçosa, MG: UFV, 2008. 101 p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, 2008.
- PIERCE, M.L.; MOORE, C.B. Adsorption on arsenite on amorphous iron hydroxide from dilute aqueous solution. **Environ. Sci. Technol.**, v. 14, p. 214-216, 1980.

- PIERCE, M.L., MOORE, C.B. Adsorption of arsenite and arsenate on amorphous iron hydroxide. **Water Res.**, n. 16, p. 1247-1253, 1982.
- PIGNA, M.; KRISHNAMURTI, G. S. R.; VIOLANTE, A. Kinetics of Arsenate Sorption–Desorption from Metal Oxides: Effect of Residence Time. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 70, p. 2017-2027. 2006.
- RAVEN, K.P.; JAIN, A.; LOEPPERT, R.H. Arsenite and arsenate adsorption on ferrihydrite: kinetics, equilibrium, and adsorption envelopes. **Environ. Sci. Technol.**, v. 32, p. 344-349, 1998.
- RESENDE, M. **Mineralogy, chemistry, morphology and geomorphology of some soils of the Central Plateau of Brazil**. PhD thesis, Indiana: Purdue University, USA, 1976. 237 p.
- RESENDE, M.; CURI, N.; KER, J.C.; REZENDE, S.B. **Mineralogia de solos brasileiros: Interpretação e aplicações**. Lavras: Ed. UFLA, 2005. 192 p.
- RESENDE, M.; CURI, N.; REZENDE, S.B.; CORRÊA, G.F. **Pedologia: base para distinção de ambientes**. 5ª ed. rev. Lavras: Editora UFLA, 2007. 322 p.
- RUIZ, H.A. Incremento da exatidão da análise granulométrica do solo por meio da coleta da suspensão (site + argila). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, p. 297-300, 2005.
- SANTOS, R.D.; LEMOS, R.C.; SANTOS, H.G.; KER, J.C.; ANJOS, L.H.C. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 5ª ed. revisada e ampliada. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2005. 100 p.
- SCHEFFER, F.; WESTLE, E.; LUDWEID, F. On the question of hydrated iron oxides in soil. **Chemistry Erde**, Jena, v. 18/19, p. 51-64, 1958.
- SCHWERTMANN, U.; CORNELL, R.M. **Iron oxides in the laboratory**. New York, Cambridge, VCH, 1991.137p.
- SCHWERTMANN, U.; FECHTER, H. The influence of aluminium on iron oxides. XI. Aluminium substituted maghemite in soils and its formation. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 48, p. 1462-1463, 1984.

- SCHWERTMANN, U.; TAYLOR, R.M. **Iron oxides**. In: DIXON, J.B.; WEED, S.B. (Eds.). *Minerals in soil environments*. 2^a ed. Madison: Soil Science Society of America, p. 789 – 824, 1989
- SMEDLEY, P.L.; KINNIBURGH, D.G. A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters. **Appl. Geochem.**, v. 17, p. 517-568, 2002.
- 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.
- TAN, K. H.; HAJEK, B. F. In: DIXON, J.B.; WEED, S.B., eds. **Minerals in soil environments**. Madison, Soil Science Society of America, 1977. p. 145-180.
- USEPA. **Technologies and costs for removal of arsenic from drinking water**. Office of Water, EPA 815-R-00-028. Washington, DC., 2000. Disponível em <<http://www.epa.gov/safewater/arsenic.html>>. Acesso em 02/03/2009.
- VIOLANTE, A.; PIGNA, M. Competitive sorption of arsenate and phosphate on different clay minerals and soils. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 66, p. 1788-1796, 2002.
- WILKIE, J.A.; HERING, J.G. Adsorption of arsenic onto hydrous ferric oxide: Effects of adsorbate/adsorbent ratios and co-occurring solutes. **Colloids Surfaces A: Physicochem. Engineer. Aspects**, v. 107, p. 97-110, 1996.
- XU, H.; ALLARD, B.; GRIMVALL, A. Effects of acidification and natural organic materials on the mobility of arsenic in the environment. **Water Air Soil Pollut.**, v. 57, p. 269-278, 1991.
- XU, H.; ALLARD, B.; GRIMVALL, A. Influence of pH and organic substance on the adsorption of As(V) on geologic materials. **Water Air Soil Pollut.**, v. 40, p. 293-305, 1988.
- YOEMANS, J.C., BREMNER, J.M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Comm. Soil Sci. Plant Anual.**, v. 19, p. 1467-1476, 1988.
- YONG, R.N.; MULLIGAN, C.N.. **Natural Attenuation of Contaminants in Soils**. CRC Press, Boca Raton, 2004.