



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA – UnB  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS – IG

**ESTUDO DO PARÂMETRO SOLO NOS MÉTODOS PARA A  
DETERMINAÇÃO DE VULNERABILIDADE A  
CONTAMINAÇÃO DE AQUÍFEROS EM REGIÕES TROPICAIS**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 125**

**MARIANA FERREIRA CARRICONDE DE AZEVEDO**

**Orientador:** Prof. Dr. Jérémie Garnier

**Co-orientador:** Prof. Dr. Luciano Soares da Cunha

**Brasília, Março de 2018.**



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA – UnB  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS – IG

# **ESTUDO DO PARÂMETRO SOLO NOS MÉTODOS PARA A DETERMINAÇÃO DE VULNERABILIDADE A CONTAMINAÇÃO DE AQUÍFEROS EM REGIÕES TROPICAIS**

**MARIANA FERREIRA CARRICONDE DE AZEVEDO**

**Banca Examinadora:**

Prof. Dr. Jérémie Garnier  
Instituto de Geociências/Universidade de Brasília

Prof. Dr. Geraldo Resende Boaventura  
Instituto de Geociências/Universidade de Brasília

Prof.<sup>a</sup> Dra. Leila Nunes Menegasse Velásquez  
Instituto de Geociências/Universidade Federal de Minas Gerais

*Dedico aos meus filhos, Benjamin e Simone, e ao meu avô, Urgel (in memoriam).*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof Dr. José Eloi Guimarães Campos por me incentivar a ser uma geóloga cada vez melhor, pela idealização e realização desta dissertação, pela orientação científica e pela amizade.

Ao Prof Dr Luciano Soares da Cunha por me receber com tão boa vontade como sua orientanda neste processo.

Ao Prof Dr Jérémie Garnier, meu querido orientador, que me recebeu de braços abertos para finalizar o mestrado, pois sem sua orientação, ajuda e paciência, eu não teria conseguido concretizar esse sonho.

Aos demais professores do Instituto de Geociências que engrandeceram as discussões científicas desse trabalho.

Ao IG, à Universidade de Brasília e à CAPES por todo o suporte e paciência nesta empreitada.

Aos técnicos de laboratório que tanto ajudaram na realização das análises.

À minha mãe por ter lutado para que eu tivesse a melhor educação possível.

Ao meu pai que me ensinou o gosto pela leitura e sempre incentivou no crescimento intelectual e emocional.

Ao meu marido, Eduardo, que me ajudou a reorganizar todos os dados das análises após perder os mesmos já tratados, por cuidar do nosso filho enquanto eu escrevia e por doar parte do nosso tempo em família para que eu pudesse finalizar a dissertação.

Em especial, ao amigo Júlio Henrichs de Azevedo, que além das várias discussões de resultados, ainda tentou ajudar com uma possível análise estatística dos dados.

Aos meus familiares e amigos que incentivaram a realização e finalização do mestrado.

E não menos importantes, aos membros da banca que engrandeceram este trabalho com suas contribuições.

## RESUMO

Dez classes de solos que ocorrem no Distrito Federal foram utilizadas objetivando avaliar a influência de suas características físicas, químicas e mineralógicas, incluindo a estruturação, como agentes na capacidade de retenção de cargas contaminantes inorgânicas, e desta forma, na redução da vulnerabilidade a contaminação dos aquíferos. A partir dos solos escolhidos, foram construídas colunas de solos de aproximadamente 70 cm, sendo que para os Latossolos por serem mais espessos foram construídas duas colunas, uma com uma porção superficial e outra com a porção subsequente mais profunda. As colunas de solos foram contaminadas por duas soluções salgadas inorgânicas, uma de cloreto de sódio e outra de sulfato de cobre. Posteriormente iniciou-se uma simulação de precipitação de chuva por aplicação de água deionizada nas colunas ao longo do tempo (147 dias). As soluções de lixiviados foram coletadas e com o objetivo de avaliar a capacidade de retenção pelos solos de cada íon da solução infiltrada. Os parâmetros utilizados nas avaliações de capacidade de retenção incluíram: textura, estrutura, mineralogia, composição química, conteúdo de matéria orgânica, pH e  $\Delta$ pH. Cotejando as informações das características físicas, químicas e mineralógicas dos solos e os resultados dos ensaios de colunas, foi possível verificar que a estruturação não era o principal parâmetro de controle da retenção dos íons das soluções infiltradas nos solos, como também não é possível determinar uma variável principal de fato, considerando a complexidade do meio (solo), a diversidade de solo existente no DF (com estado de intemperismo mais ou menos avançado, mineralogia e composição química variáveis) e o comportamento de cada tipo individualizado de íon com as variáveis existentes. Portanto, os resultados de ensaios mostram que Organossolo, Plintossolo e Cambissolo apresentam maior capacidade de retenção dos íons da solução infiltrada que os demais solos. Os resultados permitiram hierarquizar os solos do DF quanto a sua capacidade de retenção das cargas de solução infiltrada. A partir desta ordenação, foi possível ponderar quais as características mais influentes das principais classes de solos tropicais de forma a orientar os estudos de aplicação dos métodos de determinação da vulnerabilidade a contaminação de aquíferos, como por exemplo, DRASTIC, GOD, dentre outros. Os resultados para os solos estudados na região do Distrito Federal indicam a seguinte hierarquização crescente para os solos quanto a seu potencial de retenção das cargas inorgânicas infiltrantes: Neossolo Quartzarênico órtico <<<< Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico < Latossolo Vermelho distrófico < Nitossolo Vermelho eutrófico < Gleissolo Háptico distrófico << Saprólito pelítico < Argissolo Vermelho eutrófico < Cambissolo Háptico Tb distrófico < Plintossolo Háptico concrecionário <<< Organossolo Háptico fíbrico. Além disso, as características que mais influenciaram nestes resultados foram: mineralogia, textura e teor de matéria orgânica.

**Palavras-Chave:** solos, experimentos de colunas, retenção de íons, vulnerabilidade dos aquíferos.

## ABSTRACT

Ten classes of soils found in the Federal District were used in order to evaluate the influence of its physical, chemical and mineralogical characteristics, including the structure, as agents to contaminant retention or contaminant retention capacity, and reducing the aquifers vulnerability to contamination. Columns of about 70 cm were built to the selected soils types, and for the thicker Oxisols two columns were built, one with a shallow portion and another with the subsequent deeper portion. The soil columns were initially contaminated with solutions of sodium chloride and copper sulphate and after rainfall precipitation were simulated. Leachate solutions were collected and analyzed to verification of each contaminant ion retention capacity. The parameters used in the retention capacity assessments included: texture, structure, mineralogy, chemical composition, organic matter content, ph,  $\Delta$ pH. By matching the information of physical, chemical and mineralogical characteristics of the soils and the results of each contaminant retention, it was possible to verify that the structure is not the most important feature to soils retention capacity evaluation, but also it is not possible to determine the main variable, considering the complexity of the environment and the behavior of each individual type of ion and the existing variables. In this way, it was decided to use the conjunction of ions results (by the Electrical Conductivity) to the soil capacity retention of contaminants. From this, it was possible to consider the most influential characteristics for the main classes of tropical soils in order to direct the studies of application of methods of determination of vulnerability to contamination of aquifers, as for example, DRASTIC, GOD, among others. The results for the studied soils in the Federal District region indicate the following hierarchy to soils as potential retention of chemical contaminant: Psamitic Entisol <<<< Reddish-Yellow Oxisol < Reddish Oxisol < Reddish Alfisol < Gleysol << Pellitic Saprrolite < Inceptol < Plinthosol <<< Histosol. In addition, the characteristics that most influenced these results were: mineralogy, texture and organic matter content.

**Keywords:** soils, column experiments, ions retention, aquifer vulnerability.

# Sumário

1	INTRODUÇÃO .....	1
1.1	Apresentação e Justificativas.....	1
1.2	Objetivos.....	2
1.3	Localização da Área de Estudo .....	2
1.4	Organização da Dissertação.....	3
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	4
2.1	Solos (SiBCS).....	4
2.1.1	Atributos Diagnósticos.....	4
2.1.2	Outros Atributos e Características .....	5
2.1.3	Horizontes Superficiais .....	7
2.1.4	Horizontes Subsuperficiais .....	8
2.1.5	Classificação .....	10
2.2	Métodos para Determinação de Vulnerabilidade de Aquíferos.....	13
2.2.1	Método DRASTIC .....	14
2.2.2	Método GOD.....	15
2.2.3	Método SEEPAGE.....	15
2.2.4	Método AVI.....	15
2.2.5	Método EPIK .....	16
2.2.6	Método SINTACS.....	16
2.2.7	Método DAT.....	17
2.2.8	Método SAI.....	17
2.2.9	Método SORETO.....	17
2.2.10	Método MAIA.....	18
2.3	Caracterização da Área de Estudo .....	18
3	EXPERIMENTO, ANÁLISES, RESULTADOS E AVALIAÇÕES PRELIMINARES.....	26
3.1	Parte Experimental .....	26
3.2	Análises .....	30
3.3	Métodos Analíticos.....	30
3.4	Resultados.....	34
3.4.1	Solos.....	34
3.4.2	Percolados .....	48
4	DISCUSSÕES.....	54
4.1	Avaliação dos Solos Estudados Quanto à Capacidade de Retenção .....	54
4.2	Análise Integrada dos Solos Estudados .....	60
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....	63
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	65
	ANEXOS.....	68

## Lista de Figuras

Figura 1.1 - Mapa de localização dos pontos estudados (Fonte: Google Earth).....	2
Figura 2.1 - Os diferentes tipos de estrutura do solo com ilustração esquemática e foto de campo (Brady & Weil, 2012).....	6
Figura 2.2 - Variação sazonal da precipitação total média mensal para a estação Brasília (em mm). .....	19
Figura 2.3 - Balanço Hídrico da Estação Brasília (Fonte INMET).....	20
Figura 2.4 - Colunas estratigráficas do Grupo Paranoá (a) e do Grupo Bambuí (b), respectivamente, na região do Distrito Federal (modificadas de Campos et al. 2013 e Dardenne 1978).....	21
Figura 2.5 - Mapa de solos do Distrito Federal (Gonçalves 2006, modificado de Embrapa 1978). .....	22
Figura 3.1 - Exemplo de exposição de talude (área de empréstimo) em Latossolo Vermelho onde foi realizada a amostragem para preenchimento de coluna.....	26
Figura 3.2 - Detalhe da instalação da tela de nylon para contenção do solo e retirada da amostra de percolado. ....	27
Figura 3.3 - Detalhe da fixação da tela de nylon.....	27
Figura 3.4 - Detalhe da alça para fixação da coluna acima no nível do terreno, para possibilitar a retirada da amostra em recipiente colocado abaixo da base da coluna. ....	28
Figura 3.5 - Exemplo de tubo utilizado para a montagem das colunas. Na porção inferior foi instalada uma tela de nylon para possibilitar a coleta da solução percolada.....	28
Figura 3.6 - Exemplos de retirada da coluna de solo a partir do talude. ....	28
Figura 3.7 - Desenho esquemático da disposição das colunas de lixiviação. ....	29
Figura 3.8 - Equipamento portátil multi parâmetros utilizado para análises dos solos amostrados. ....	31
Figura 3.9 - Esquematização da titulação.....	31
Figura 3.10 - Espectrômetro durante análise.....	32
Figura 3.11 - Cromatografia iônica em funcionamento. ....	33
Figura 3.12 - Balanço de cargas elétricas dos solos (Fonte: <a href="http://www.pedologiafacil.com.br/enquetes/enq59.php">http://www.pedologiafacil.com.br/enquetes/enq59.php</a> ). ....	45
Figura 3.13 - [a] Vista geral de agregado granular no Latossolo Vermelho distrófico 1. [b] Microporosidade + argilominerais no Latossolo Vermelho distrófico 1. ....	46
Figura 3.14 - [a] Microporosidade interna ao agregado no Latossolo Vermelho distrófico 1. [b] Superfície de grânulo com estrutura fechada e cristais lamelares aderidos na porção externa do mesmo, Latossolo Vermelho distrófico 2. ....	47
Figura 3.15 - Cristais agregados na porção externa de agregado granular no Latossolo Vermelho distrófico 2. [b] Macroporosidade associada a espaço intergranular no Cambissolo Háplico distrófico.....	47
Figura 3.16 - Resultados de condutividade elétrica dos percolados de solos. ....	49
Figura 3.17 - Resultados de absorção atômica para Sódio dos percolados de solos.....	50
Figura 3.18 - Resultados de cromatografia iônica para Cloreto dos percolados de solos.....	52

## *Lista de Tabelas*

Tabela 1.1 - Coordenadas dos solos coletados.....	3
Tabela 2.1 - Resumo da classificação dos Domínios, Sistemas/Subsistemas aquíferos do Distrito Federal com respectivas vazões médias. Fonte: Adaptado de Campos & Freitas-Silva (1999)...	23
Tabela 3.1 - Fotografias dos perfis de solos estudados.....	36
Tabela 3.2 - Textura dos solos estudados.....	38
Tabela 3.3 - Mineralogia comparativa dos solos estudados (amostra total). ....	39
Tabela 3.4 - Mineralogia comparativa dos solos estudados (fração argila). ....	40
Tabela 3.5 - Fluorescência de raios-X. / PF - perda ao fogo resultados em %. ....	44
Tabela 3.6 - Resultados de pH e $\Delta$ pH dos solos estudados.....	45
Tabela 3.7 - Data de início de gotejamento de solução de lixiviado de cada coluna de solo. ....	48
Tabela 3.8 - Grupo 1 $\mu$ S/cm.....	49
Tabela 3.9 - Grupo 2 $\mu$ S/cm.....	49
Tabela 4.1 - Compilação de solos e suas respectivas características. ....	54

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Apresentação e Justificativas

O solo com sua função filtro-reguladora é reconhecidamente o principal elemento na proteção da contaminação dos aquíferos, uma vez que a zona não saturada da maioria dos sistemas é desenvolvida nas coberturas de regolitos.

Atualmente, existem diferentes métodos para a avaliação da vulnerabilidade a contaminação dos aquíferos, todos foram desenvolvidos em contexto de clima temperado, locais em que a pedogênese é menos intensa e rápida, gerando solos menos profundos, com maior teor de argila 2:1 e menos estruturados. Assim, os parâmetros que são considerados para ponderar o parâmetro solo nessas modelagens de vulnerabilidade são: textura dos solos, teor de argilominerais e seu conteúdo em matéria orgânica (Aller *et al.* 1987).

Por outro lado, os solos de regiões tropicais, apresentam-se comumente mais profundos, muito lixiviados, com mineralogia dominada por argila 1:1 e óxido-hidróxidos e muito estruturados, o que modifica de forma significativa seu comportamento com relação à função de proteção dos aquíferos e, desta forma, faça com que os modelos de vulnerabilidade dos aquíferos existentes atualmente na literatura necessitem de adaptação por não serem adequados para solos tropicais.

A questão central dessa pesquisa é compreender o quanto os parâmetros físico-químicos dos solos tropicais podem influenciar na retenção de cargas contaminantes inorgânicas na zona não saturada dos aquíferos e, considerando a classificação dos solos brasileira, estudar a capacidade de retenção dos diferentes tipos de solos.

O intuito desta pesquisa foi preencher lacunas no conhecimento sobre o papel dos solos na proteção dos aquíferos em regiões tropicais, uma vez que faltam métodos de vulnerabilidade à contaminação de aquíferos aplicáveis a solos tropicais, principalmente estudos específicos que correlacionem as características dos solos com a função filtro dos aquíferos. Nesse sentido, objetivando avaliar a capacidade de retenção de contaminantes inorgânicos em solos, realizou-se o ensaio com colunas de lixiviação.

Trata-se de um trabalho com base empírica, baseado sobre ensaios de laboratório (lixiviação em colunas de solos) no qual observam-se apenas as variáveis de entrada e de saída. Apesar de não controlar todas as variáveis em função do reduzido tempo para o desenvolvimento da pesquisa, sua importância está na atual preocupação com relação à proteção dos aquíferos e consequente qualidade da água nos mesmos. Além disso, faltam estudos para suprir a falta de informação a respeito do comportamento das estruturas dos solos tropicais em conjunto com os parâmetros físicos já abordados por estes métodos.

## 1.2 Objetivos

Os objetivos da presente pesquisa são:

- Avaliar a capacidade de retenção de íons infiltrados a partir de uma solução inorgânica dos diferentes tipos de solos da região do DF;
- Comparando os resultados obtidos para os diferentes solos, espera-se poder destacar o papel das principais características físico-químicas na retenção ou lixiviação de cátions e/ou ânions;
- Sugerir e hierarquizar as principais características dos solos a serem consideradas na adaptação dos modelos de vulnerabilidade de contaminação dos aquíferos existentes na literatura,
- Agrupar e hierarquizar os diferentes tipos de solo do Distrito Federal quanto à sua capacidade de proteger os aquíferos depois um contaminação inorgânica superficial;
- Investigar como o parâmetro solo poderia ser empregado de forma mais adequada para adaptar os modelos de vulnerabilidade dos aquíferos existentes para casos de estudos de solos tropicais.

## 1.3 Localização da Área de Estudo

Neste trabalho foram utilizados solos da porção norte do Distrito Federal, previamente escolhidos, considerando sua grande variedade de tipos quando comparados às classes de solos tropicais. Os perfis de solos amostrados estão distribuídos entre as rodovias DF-150, DF-205 leste e BR-020 (Figura 1.1).

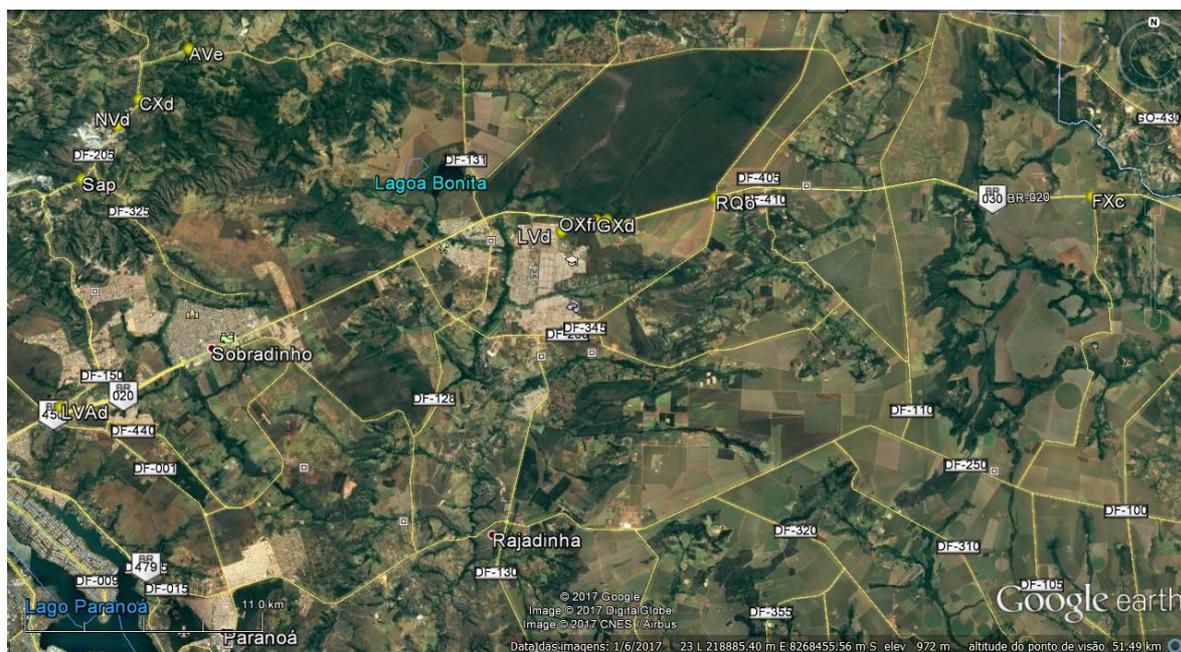


Figura 1.1 - Mapa de localização dos pontos estudados (Fonte: Google Earth)

A Tabela 1.1 consolida as informações relacionadas à localização de cada um dos sítios amostrais em relação às coordenadas planares UTM (Datum SAD 69) Zona 23L e seus devidos números no mapa de localização (Figura 1.1).

**Tabela 1.1 - Coordenadas dos solos coletados.**

<b>Número</b>	<b>Solo</b>	<b>Coordenada S</b>	<b>Coordenada E</b>	<b>Elevação (m)</b>
1	Latossolo Vermelho	0216840	8273227	1001
2	Gleissolo	0218499	8273804	1032
3	Neossolo	0224110	8275086	1159
4	Plintossolo	0242326	8276050	983
5	Organossolo	0218991	8273839	1019
6	Argissolo	0198032	8281751	771
7	Cambissolo	0195858	8279049	881
8	Saprolito	0193496	8274923	890
9	Nitossolo	0194922	8277675	857
10	Latossolo Vermelho-Amarelo	0193959	8263897	1202

#### **1.4 Organização da Dissertação**

A presente Dissertação é estruturada em cinco capítulos sequenciais e complementares cujos conteúdos e objetos são a seguir descritos:

- O Capítulo 1 traz a apresentação do tema, as justificativas para o desenvolvimento da pesquisa, localização da área e métodos gerais;
- No Capítulo 2 é apresentado o Referencial Teórico sobre os temas abordados na pesquisa, incluindo aspectos sobre solos, métodos de determinação da vulnerabilidade a contaminação dos aquíferos e caracterização física da área de estudo;
- O Capítulo 3 apresenta o experimento em colunas de lixiviação em solos, os métodos analíticos utilizados e seus resultados;
- O Capítulo 4 exhibe as discussões incluindo a proposição das características mais significativas na análise de capacidade de retenção para a adaptação dos métodos de vulnerabilidade a contaminação dos aquíferos para a realidade dos solos tropicais.
- O Capítulo 5 enumera as considerações finais e conclusões da pesquisa.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo pretende-se apresentar o estado da arte relativo aos temas desenvolvidos na Dissertação para facilitar a compreensão e orientar o leitor no entendimento do problema estudado. São apresentados os aspectos gerais e as particularidades relativas à classificação dos solos, aos métodos de determinação da vulnerabilidade a contaminação dos aquíferos e à caracterização da área e dos pontos estudados.

### 2.1 Solos (SiBCS)

O Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Embrapa, 2013) foi desenvolvido com base no antigo sistema de classificação de solos americana (*Soil Taxonomy*) e na proposta da FAO /WRB (*Food and Agriculture Organization / World Reference Base*), com o passar do tempo várias alterações foram sendo realizadas.

O solo ocupa grande parte do manto superficial continental, i.e. chamada de zona crítica, e é formado por materiais orgânicos e minerais provenientes do intemperismo físico e químico das rochas. Em condições de clima tropical úmido a espessura do *pedum* costuma ser superior a 2,0 m e pode ultrapassar a profundidade de 100 m, isso porque a atividade biológica e os processos pedogenéticos são favorecidos neste ambiente. Sua mudança normalmente é gradual da superfície até a rocha sã. A classificação é feita a partir da análise de diversos atributos físico-químicos e pode chegar a seis níveis categóricos.

#### 2.1.1 Atributos Diagnósticos

Dentre as diversas características existentes, algumas se sobressaem como quantidade de matéria orgânica, quantidade e atividade das argilas, saturação por bases, textura, cor e mineralogia.

O material orgânico corresponde ao total de carbono orgânico contido no perfil e tende a diminuir continuamente com o aumento da profundidade do solo. O decaimento da matéria orgânica é função da oxidação da própria pedogênese.

A atividade das argilas se refere à capacidade de troca catiônica da fração argila descontada a contribuição da matéria orgânica. São reconhecidas duas classes de atividade de argila, as argilas de alta atividade (Ta) e as de baixa atividade (Tb).

O solo apresenta capacidade de troca (retenção e liberação) rápida de elementos controlada por processos físico-químicos complexos de adsorção e dessorção de elementos a partir de matéria orgânica e inorgânica, resumindo no conceito de complexo sortivo. Assim, a disponibilidade de macronutrientes/bases ( $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{Na}^+ + \text{K}^+$ ) e potencial de acidez ( $\text{Al}^{3+} + \text{H}^+$ ) no solo dependem da capacidade de retenção de cátions e ânions do solo e da saturação em nutrientes/bases desse complexo sortivo. Solos com saturação de bases igual ou

maior que 50% são chamados eutróficos e inferior a 50%, distróficos. A saturação por bases é feita pela divisão da soma das bases trocáveis, por ela mesma +  $Al^{3+}$  +  $H^+$ . Valores <50% resultam no caráter distrófico e >50% eutrófico.

A plintita é formada em ambientes com certa deficiência de drenagem pela segregação de ferro e por agregados de minerais ricos em alumínio, entre outros. Elas são facilmente identificadas pelo mosqueamento na base do perfil. Esta plintita pode evoluir devido a variação do nível freático formando nódulos e concreções ferruginosas bastante duros. O caráter concrecionário de um solo requer que haja pelo menos 5% de petroplintita no perfil. Quando esta petroplintita apresenta forma contínua e consolidada, é caracterizada como caráter litoplíntico.

Alguns atributos são caracterizados a partir da condutividade elétrica em solução como o caráter salino e sálico, do teor de ferro presente como hipoférrico, mesoférrico, férrico e perférrico, da quantidade de alumínio extraível como o caráter alumínico e alítico, da saturação de sódio como os atributos sódico e solódico, pelo índice de cor como o crômico e o ebânico, pela presença de alumínio e bases trocáveis como o caráter ácrico, entre diversos outros atributos.

### **2.1.2 Outros Atributos e Características**

O índice de cor é uma das propriedades mais diretas usadas pela caracterização e classificação dos solos. É determinada pelo estado de oxidação e/ou hidratação do ferro, pelo conteúdo de matéria orgânica ou de sílica livre. É a partir da carta de Munsell que esta definição de cor é estabelecida, sendo caracterizada por um índice de letras e números, nesta ordem: Matiz/Valor/Croma (ex. 2,5 YR 2/4).

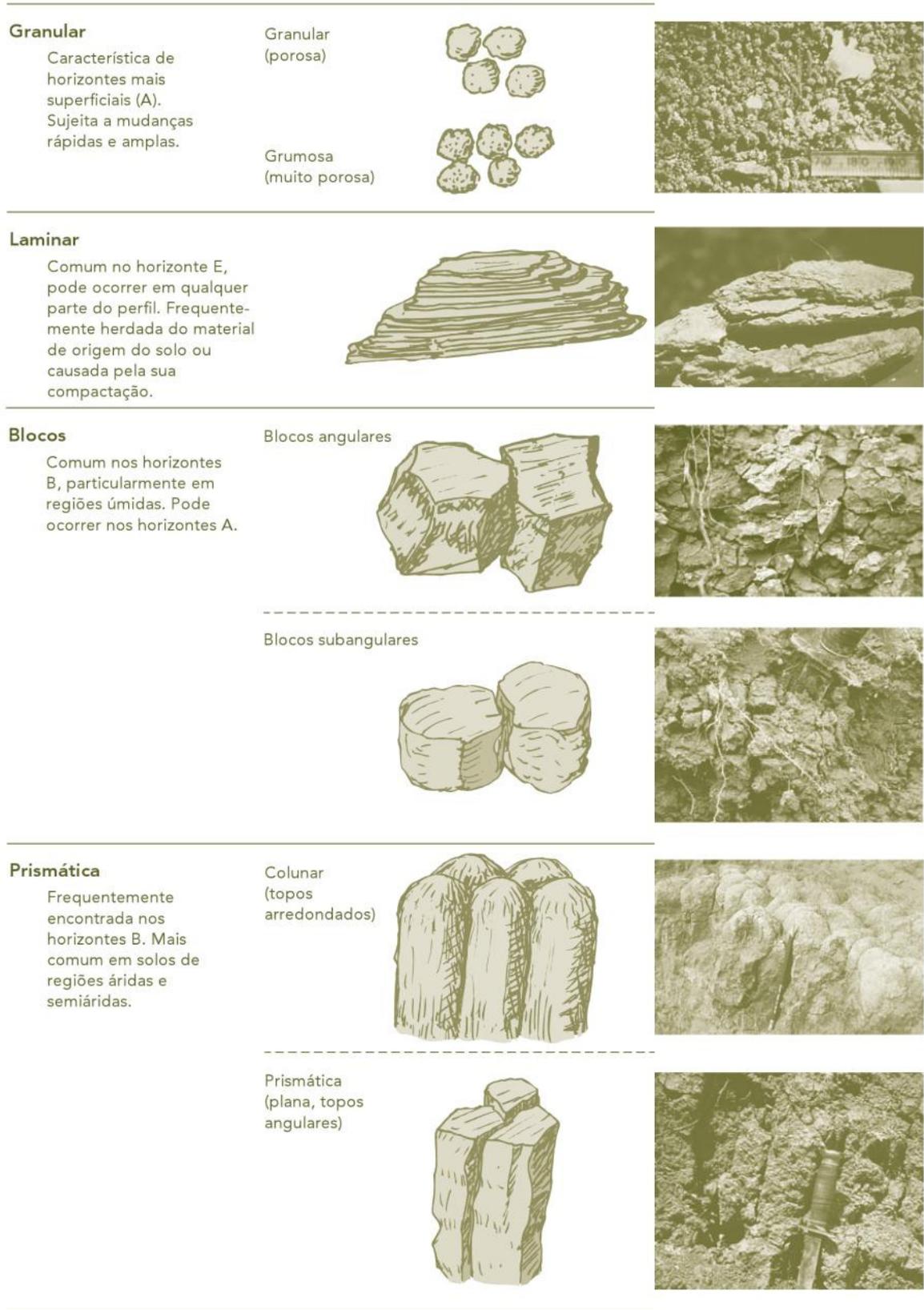
A profundidade é a soma da espessura de cada horizonte, podendo ser: rasa quando menor que 50 cm; pouco profunda entre 50 e 100 cm; profundo entre 100 e 200 cm; e muito profunda quando superior a 200 cm.

A classificação da estrutura do solo é relacionada à aglomeração de partículas finas compondo grãos individuais com diferente estabilidade, e se fundamenta em características relacionadas à forma (tipo), tamanho (classe) e grau de desenvolvimento das unidades estruturais. Quando a estrutura é classificada a ordem de referência deve ser frequência, tamanho e tipo (ex. comum, média, granular). Pode ser granular, grumosa, em blocos, prismática, colunar e laminar (Figura 2.1).

A cerosidade representa a acumulação de argila por processo de iluviação, representada em grande parte por argilominerais, na superfície dos agregados formando um aspecto especular.

A pedregosidade corresponde à presença de materiais grossos como quartzo, plintita, fragmentos líticos, entre outros que podem ser classificados como cascalho.

A rochosidade significa que há presença de fragmentos líticos nos horizontes A e B.



**Figura 2.1 -Os diferentes tipos de estrutura do solo com ilustração esquemática e foto de campo (Brady & Weil, 2012).**

Os grupamentos de classes texturais foram determinados de acordo com a composição granulométrica do solo relacionando-se o conteúdo de argila, silte e areia, desta forma têm-se:

- Textura muito argilosa: solo com teor de argila superior a 60%;
- Textura argilosa: apresenta composições granulométricas com 40 a 60% de argila, compreendendo as classes texturais: argila, argila arenosa, argila siltosa, franco-argiloso com mais de 35% de argila e franco-argilo-siltoso com mais de 35% de argila;
- Textura arenosa: compreende composições granulométricas com mais de 90% de areia e que correspondem às classes texturais areia e areia franca;
- Textura siltosa: apresenta composições granulométricas com mais de 90% de silte;
- Textura média: solo com composição granulométrica com menos de 35% de argila e mais de 15% de areia, excluídas as classes texturais areia e areia franca.

A porosidade representa os espaços vazios presentes nos solos, sendo a macroporosidade relacionada à porosidade entre diferentes agregados e a microporosidade, à porosidade interna aos agregados. De maneira geral, um solo pode ter alta microporosidade e ao mesmo tempo ter macroporosidade razoável e boa interconexão entre os poros fazendo com que o solo apresente boa infiltração e retenção da água.

Geralmente o pH dos solos tropicais varia entre 3,5 a quase neutro (7) e o Eh (potencial de oxidação-redução) do ambiente em que o solo ocorre pode ser de fortemente negativo (- mV) até positivo (+ mV), em função das condições de anoxia ou de oxidação.

### 2.1.3 Horizontes Superficiais

É a camada superior do perfil de solo, com maior importância edáfica onde se acumula maior volume de matéria orgânica viva e morta. É classificado em função de espessura e conteúdo de matéria orgânica.

O Horizonte A Chernozêmico é um horizonte mineral superficial, relativamente espesso, escuro, rico em matéria orgânica, eutrófico (com valor  $V > 65\%$ ) onde o  $\text{Ca}^{2+}$  domina o complexo sortivo.

Horizonte A Proeminente é semelhante ao horizonte chernozêmico, porém com menor volume de matéria orgânica, menos espesso e distrófico.

Horizonte A Moderado possui conteúdo de carbono orgânico moderado, cor, estruturas e feições gerais diferentes do A chernozêmico e A proeminente.

Horizonte A Fraco tem teores de carbono orgânico inferior a 0,58% (matéria orgânica menor que 1%), cores claras, pouca estrutura (pequena ou média granular pouco desenvolvida). Horizonte muito comum em regiões tropicais, subtropicais e semiáridas.

Horizonte A Húmico é um horizonte rico em matéria orgânica, relativamente espesso e com baixa saturação em bases onde a fase mineral domina sobre a matéria orgânica.

Horizonte A Antrópico é formado pelo uso prolongado para cultivo e residência. Pela alta demanda de bases trocáveis apresenta valor V menor que os solos adjacentes, e pela acumulação de resíduos apresenta um maior conteúdo de  $P_2O_5$ .

Horizonte Hístico é um horizonte extremamente rico em matéria orgânica, com coloração escura (preta) e espessura maior que 20 cm. Quando não há argila a porcentagem de carbono orgânico deve ser 8% e quando há mais do que 60% de argila, o carbono orgânico deve ser maior que 12%. Está associado a hidromorfismo.

Horizonte A Turfosos é um horizonte essencialmente orgânico, formado por acumulação de matéria vegetal em áreas com deficiência de drenagem, ainda com muitos restos vegetais não decompostos.

Horizonte Orgânico (O) ou camada superficial orgânica é formado em condições de drenagem desimpedida. Pode manter saturação em períodos curtos.

#### **2.1.4 Horizontes Subsuperficiais**

São camadas subsuperficiais do perfil com importância para a determinação dos processos pedogenéticos e para a classificação dos solos. São chamados horizontes diagnósticos.

Horizonte B Incipiente (Bi) é o horizonte abaixo de A ou AB pouco desenvolvido, ou seja, com pedogênese restrita. Tem espessura inferior a 50 cm, mas há registro de pedogênese com estrutura e bioturbação (raízes e invertebrado). Pode conter e em geral contém fragmentos de rocha-mãe pouco intemperizados (rochosidade) e pedregosidade. Em região de clima úmido ocorre em áreas de relevo movimentado. O processo pedogenético mais importante é a transformação.

Horizonte B Latossólico (Bw) é um horizonte com espessuras superiores a 50 cm, elevado nível de pedogênese e homogeneidade. A quantidade de argila deve ser superior a 15%, quando ocorrem argilominerais são do tipo 1:1 (Tb). Os principais minerais constituintes seriam os óxidos e hidróxidos. A cerosidade é bastante rara já que não há translocação nem argila de alta atividade no sistema. Os processos de transformação são predominantes. A estrutura grumosa é a mais comum, mas a granular também pode estar presente de forma menos desenvolvida.

Horizonte B Textural (Bt) é um horizonte que apresenta incremento de argila com relação ao horizonte A. A cerosidade é muito comum por causa da translocação de argila, a estruturação é variável apesar da estrutura granular média a grande ser mais comum. O processo pedogenético mais importante é a podzolização. Rochosidade é comum. O gradiente textural, isto é, o aumento do conteúdo de argila do horizonte A para o B, deve ser de no mínimo 1,5.

Horizonte B Nítico (Bn) é um horizonte com pequeno (relação inferior a 1,5) ou nenhum gradiente textural. Facilmente distinguível dos demais horizontes, com rochosidade comum, cerosidade e estruturação (granular grande, colunar, em blocos) muito comuns.

Horizonte B Espódico (Bh) é o horizonte composto de ferro e alumínio com acumulação iluvial de matéria orgânica ± alumínio ± ferro. Pode ter estruturação fraca e pequena granular ou laminar.

Horizonte B Plânico é um tipo particular de horizonte Bt onde há mudança abrupta entre os horizontes A e B. Pode conter feições de mosqueamento principalmente na base.

Horizonte B Plíntico é um horizonte com presença de no mínimo 15% de plintita, espessura mínima de 15 cm e matriz sempre mais clara. Apresenta padrão mosqueado.

Horizonte B Petroplíntico corresponde à litificação do horizonte plíntico onde não há matéria orgânica preservada.

Horizonte B Gleissólico (Bg) é um horizonte que indica deficiência de drenagem, situação em que o ferro ocorre na forma reduzida possibilitando o mosqueamento na base. Apresenta cores claras: branca a cinza-clara.

Horizonte Cálcico é um horizonte em que há acumulação de carbonato de cálcio. Deve conter pelo menos 15 cm de espessura e 5% a mais de carbonato que o material parental.

Horizonte Petrocálcico corresponde à litificação do horizonte cálcico com degradação total da matéria orgânica. Está relacionado a regiões de clima muito seco.

Horizonte Sulfúrico é o horizonte mineral ou orgânico, com pH em água inferior a 3,5, com elevado teor de sulfato solúvel e deficiência de drenagem. Deve ter no mínimo 15 cm de espessura. Seus solos são tóxicos para a maior parte das culturas.

Horizonte B Vértico é o horizonte com desenvolvimento de fendas com abertura superior a 1 cm, podendo ocorrer escorregamentos. Muito rico em argilominerais com estrutura 2:1 (esmectita, montmorilonita).

Horizonte Álbico (E) é um horizonte descolorido em função de processos de iluviação que deve ter no mínimo 1-2 cm de espessura.

Fragipã é um horizonte com mais de 10 cm de espessura, com textura média e consistência seca dura a muito dura. Endurecido em função de cimentos.

Duripã é um horizonte subsuperficial com cimentação silicosa que permanece endurecido mesmo sob condição de umedecimento prolongado.

Horizonte C é o horizonte ou camada mineral relativamente pouco afetado pelos processos pedogenéticos, sendo formado a partir da decomposição das rochas ou ainda de sedimentos de natureza mineralógica e textural diversas.

Horizonte R é a camada de material consolidado, correspondente ao substrato rochoso, constituído por rocha alterada ou sã.

### 2.1.5 Classificação

O Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos (Embrapa, 2013) é organizado em seis níveis categóricos e leva em consideração características genéticas, químicas e físicas de cada solo apenas dos 2 (dois) primeiros metros. Neste trabalho, a classificação foi feita apenas até o terceiro nível, sendo esta classe aplicada para a maioria das aplicações e do quarto ao sexto nível apenas para aplicações de detalhe e ultradetelhe. As superposições dos horizontes anteriormente citados compõem o perfil do solo. A nomenclatura háplico e órtico é utilizada quando os solos em questão não se encaixam em nenhuma das opções de segundo e terceiro nível na chave de classificação.

#### Latossolo

Solos com horizonte Bw abaixo de qualquer horizonte A, dentro dos primeiros 200 cm do perfil ou dentro dos primeiros 300 cm se o horizonte A tem mais de 150 cm de espessura. Apresenta perfil homogêneo com difícil distinção entre horizontes, produção hídrica elevada e pouco estruturado, podendo ter estrutura grumosa e granular. Ocorre em áreas de relevo plano a suave ondulado. Sendo a sequência de horizontes:

$$A_{qualquer} + Bw + C + R$$

O segundo nível categórico dos Latossolos é caracterizado pelo índice de cor, onde são encontrados o Latossolo Bruno, Latossolo Amarelo, Latossolo Vermelho-Amarelo e o Latossolo Vermelho. O terceiro nível varia de acordo com teor de ferro, alumínio e saturação em bases trocáveis.

#### Cambissolo

Solo com horizonte Bi abaixo de qualquer horizonte A, pouco desenvolvido e pouco espesso. Apresenta produção hídrica média apesar do aumento da vazão resultando da pedregosidade e rochosidade. Relevo ondulado a forte ondulado. Sendo a sequência de horizontes:

$$A_{qualquer} + Bi + R \quad \text{ou} \quad A_{qualquer} + Bi + C + R$$

O Cambissolo pode ser húmico, flúvico ou háplico em seu segundo nível. Já no terceiro, as características variam entre, teor de alumínio, de ferro, de carbonato de cálcio, de sódio, atividade da argila e saturação em bases.

#### Nitossolo

Solos com espessura superior a 50 cm e horizonte Bn, com argila de baixa atividade no horizonte A ou nos primeiros 50 cm do horizonte B, gradiente textural inferior a 1,5, bastante estruturado, pode haver cerosidade em alguns casos, argiluviação incipiente e produção hídrica média elevada. Relevo suave ondulado a ondulado.

$$A_{qualquer} + Bn + C + R$$

Seu segundo nível também considera o índice de cor, podendo ser bruno, vermelho e háplico. O terceiro nível categórico usa teores de ferro, alumínio e saturação do complexo sortivo.

### Argissolo

Solos com horizonte Bt e argila de baixa atividade, argila de alta atividade quando distrófico ( $V < 50$ ), abaixo de horizonte A ou E. Se existir horizonte plúntico deve ocorrer acima do horizonte Bt e o horizonte A será espesso. Processos de argiluviação avançada e translocação. Produção hídrica média elevada, estruturação variável, cerosidade e rochosidade comuns. Relevo ondulado.

$$A_{qualquer} + Bt + C + R \quad \text{ou} \quad E + Bt + C + R$$

O segundo nível também é caracterizado pelo índice de cor, as opções de Argissolo são: Bruno-acinzentado (5YR 3 a 4/4), Acinzentado (7,5YR 5/4), Amarelo (mais amarelo que 7,5YR), Vermelho-Amarelo (não se engloba nos demais) e Vermelho (mais vermelho que 2,5YR). No terceiro nível são caracterizado em função dos teores de alumínio, saturação do complexo sortivo, atividade da argila e coesão.

### Neossolo

Solos pouco evoluídos pedogeneticamente, caracterizados pela ausência de horizonte B, pouca acumulação e transformação e rara podzolização. Podem não apresentar horizonte C, conter fragmentos líticos ou estar associados a aluvião e a produção hídrica restrita (lítolico) ou elevada (quartzarênico).

$$A/O/H + C + R \quad \text{ou} \quad A/O/H + R$$

Os Neossolos podem ser lítolíticos, regolíticos, quartzarênicos ou flúvicos. O terceiro nível é mais variado considerando atividade das argilas, saturação do complexo sortivo, conteúdo de matéria orgânica, entre outros.

### Gleissolo

Solos com horizonte Bg abaixo de qualquer horizonte A, sem horizonte Bt, plúntico ou vértico. Comum em veredas e nascentes de drenagens, é hidromórfico e tem produção hídrica restrita. Relevo plano a suave ondulado.

$$A_{qualquer} + Bg$$

Os Gleissolos podem ser tiomórficos, sálicos, melânicos e háplicos com teores de alumínio, carbonato de cálcio, atividade da argila e saturação de bases.

### Organossolo

Solos que contém mais de 20% de matéria orgânica em horizonte O ou H com espessura mínima de 40 cm ou de até 30 cm quando em contato lítico. Processo de adição e produção hídrica restrita. Relevo plano.

$$O/H + RO/H + C + RO/H + B + C + R$$

O segundo nível categórico é tiomórfico, fólico ou háplico. O Organossolo possui o terceiro nível categórico mais importante para a avaliação da vulnerabilidade à contaminação do aquífero, uma vez que trata de níveis de decomposição da matéria orgânica de raízes, folhas, etc. Quanto menos decomposto, menor a atenuação do contaminante já que as raízes criam fendas que possibilitam um fluxo preferencial e direto.

### Plintossolo

Solos com horizonte plíntico ou petroplíntico dentro dos primeiros 40 cm do perfil ou dentro dos primeiros 200 cm quando o horizonte plíntico ou petroplíntico ocorre sob horizonte A ou E. Apresenta iluviação de Fe e produção hídrica variável. Pode ter mosqueamento na base. Sua ocorrência está relacionada com condições de encharcamento temporário, quer pela presença do lençol freático elevado em alguma época do ano, quer por restrições à percolação da água.

$$A_{qualquer} + Plíntico \text{ ou } A_{qualquer} + Petroplíntico$$
$$E + Plíntico \text{ ou } E + Petroplíntico$$

O segundo nível pode ser pétrico, argilúvico ou háplico, enquanto o terceiro nível trabalha com o nível de evolução das plintitas, teor de alumínio e saturação em bases trocáveis.

### Planossolo

Solo com horizonte A ou E acima de horizonte B plânico. Se existir horizonte plíntico ele deve coincidir com o horizonte A ou E. Se existir horizonte Bg ele deve ser coincidente com o B plânico.

$$A/E + Bplânico$$

São encontrados planossolos nátrico e háplico, com variações entre teor de alumínio, saturação do complexo sortivo e carbonato de cálcio.

### Chernossolo

Solos com horizonte A chernozêmico, seguido por Bt, Bi ou Bn com alta atividade ou horizonte cálcico substituindo o A chernozêmico ou contato lítico desde que o horizonte A tenha mais que 15% de carbonato de cálcio.

$$A_{chernozêmico} + Bt/Bi/Bn$$

O segundo nível categórico do chernossolo é composto pelos caracteres rëndzico, ebânico, argilúvico e háptico. Já no terceiro, varia o teor de carbonato de cálcio e do ferro.

### Espodossolo

Solos com horizonte B espódico abaixo de horizonte A, E ou horizonte hístico dentro dos primeiros 2,0 m de espessura. Típico de ambiente com deficiência de drenagem.

$$A/E/H + Bh$$

No segundo nível pode ser humilúvico, ferrilúvico e ferrihumilúvico. O terceiro nível varia em relação à espessura e ao grau de hidromorfismo.

### Vertissolo

Solos com horizonte vértico, com pouca variação de textura e composição mineral com considerável quantidade de argila.

O segundo nível apresenta caráter hidromórfico, caráter ebânico ou é háptico. O terceiro é representado pelo teor de sais solúveis, saturação em sódio e carbonatos.

### Luvissolo

Este também é um solo mineral, com horizonte B textural, presença de argilas de alta atividade e alta saturação de bases, abaixo de qualquer horizonte A, exceto os horizontes E alábico e A chernozêmico.

$$A_{qualquer} + Bt$$

O segundo nível é marcado pelo caráter crômico ou é classificado como háptico e terceiro nível, pela espessura e teor de carbonato.

## **2.2 Métodos para Determinação de Vulnerabilidade de Aquíferos**

Diversos trabalhos propondo métodos para determinação da vulnerabilidade de aquíferos foram escritos desde a década de 80. Nos métodos tradicionais, como os que serão descritos a seguir, são considerados parâmetros específicos para avaliar qualitativa e semi-quantitativamente esta vulnerabilidade, onde a maior parte das variáveis é vinculada às características dos solos e à litologia dos aquíferos. É importante que os pesos e ponderações característicos de cada método sejam considerados de forma adequada.

O mais utilizado e completo destes métodos é o DRASTIC que foi desenvolvido por Aller *et al.* (1987). Considerando a complexidade e grande quantidade de parâmetros necessários no método DRASTIC, devido à dificuldade de obtenção e aplicação de todos esses parâmetros,

alguns autores propuseram métodos mais simples ou algumas pequenas modificações como o GOD (Foster & Hirata 1988), o AVI (Van Stempvoort *et al.* 1993), o SINTACS (Civita 1994), o DAT (Ross *et al.* 2004), o SORETO (Cunha 2009) e o MAIA (Maia & Cruz 2011).

Por sua popularidade, na literatura existem várias adaptações ao método DRASTIC acrescentando parâmetros como mapa de uso e cobertura de solo (Secunda *et al.* 1998; Fritch *et al.* 2000; Panagopoulos *et al.* 2006; Gomezdelcampo & Dickerson 2007) e propriedades estruturais (Rodríguez, 2004), dos contaminantes (Wang *et al.* 2007) e de adsorção e conteúdo de argila (Guo *et al.* 2007). O método GOD também foi ajustado adicionando um parâmetro exclusivo para solo, onde a característica observada é a textura do solo (Foster *et al.* 2006).

Alguns tipos de aquíferos necessitaram a determinação de novos métodos que se adequassem a algumas características especiais, como o MAIA para os aquíferos fissurais ou cársticos (Maia & Cruz 2011) e o EPIK para aquíferos cársticos (Doerfliger & Zwahlen 1997).

De todos os modelos pesquisados, o SEEPAGE (Moore, 1988 *apud* Gogu & Dessargues 2000) é o que abrange a maior quantidade de características dos solos.

A presente dissertação irá focar no parâmetro solo destes métodos e para isto, parâmetros como sedimentos não consolidados, camada de sedimentos e de cobertura foram considerados como correspondente ao parâmetro solo.

### **2.2.1 Método DRASTIC**

Segundo Aller *et al.* (1987) o objetivo da criação do DRASTIC foi desenvolver um método que permitisse avaliar o potencial de poluição de aquíferos usando como parâmetros, características físicas hidrogeológicas. As características abordadas neste método são: profundidade do nível estático (D), rede de recarga (R), tipo de aquífero (A), tipo de solo (S), declividade do terreno (T), impacto da zona vadosa (I) e condutividade hidráulica do aquífero (C).

Cada parâmetro recebe um peso de 1 a 5 de acordo com a sua importância, sendo posteriormente subdividido em subparâmetros com valores indexados entre 1 e 10, com respeito a seu potencial de poluição.

Os autores consideram o solo como uma zona de alteração de até 1,8 m com atividade biológica significativa e determina que as características dos solos mais expressivas são a textura, a mineralogia e o conteúdo de matéria orgânica, sendo a textura a característica de maior aplicação. Essa espessura de solo é bastante inferior a existente em regiões de climas tropicais que podem chegar a mais de 100 m.

Algumas considerações devem ser feitas a respeito da forma como o método DRASTIC avalia as argilas expansíveis. Somente seu aspecto físico de dilatação é analisado, porém é muito importante também verificar a capacidade de troca iônica nos espaços interlamelares destas argilas. Esse subparâmetro é ponderado com um valor alto para a vulnerabilidade de

contaminação pela formação de fendas que possibilitam a migração da carga contaminante. A possibilidade de retenção deste contaminante pela troca iônica deveria ser considerada.

$$DRASTIC = \sum_{i=1}^7 P_i \times W_i$$

### 2.2.2 Método GOD

No intuito de simplificar conceito e aplicação do método existente, uma vez que as informações necessárias encontram-se disponíveis em estudos básicos de hidrogeologia regional, Foster (1987) e Foster & Hirata (1988) propuseram o método GOD tendo em conta o confinamento hidráulico da água subterrânea ou tipo de aquífero (G), os estratos de cobertura (O) e profundidade nível estático (D) como principais parâmetros a serem analisados. Dentro de cada um desses parâmetros o índice pode variar entre 0,0 e 1,0.

O parâmetro estratos de cobertura pondera a partir da permeabilidade, características litológicas e o grau de consolidação da zona vadosa ou camada confinante. Este parâmetro pode ser subdividido entre uma porção de sedimentos não consolidados e outra de rochas consolidadas porosas ou duras. Para a classificação dos estratos de cobertura o fator principal considerado foi a possibilidade de fluxo preferencial a partir de fraturas, que por sua vez podem aumentar a vulnerabilidade e reduzir a atenuação da carga contaminante.

$$\text{Índice}_{(GOD)} = G \times O \times D$$

### 2.2.3 Método SEEPAGE

Segundo os autores Navulur & Enger (1996) e Gogu & Dessargues (2000) foi desenvolvido combinando três modelos e utiliza como parâmetros vários conceitos hidrogeológicos e propriedades físicas dos solos. Os parâmetros utilizados são declividade do solo, profundidade do lençol freático, material da zona vadosa, material do aquífero, profundidade do solo e potencial de atenuação. Este último parâmetro considera vários fatores importantes dos solos como textura em superfície, textura em subsuperfície, pH, conteúdo de matéria orgânica, classe de drenagem e permeabilidade.

A cada parâmetro deve ser atribuído um valor relativo entre 1 e 50, sendo esses valores para o parâmetro de menor e de maior significância para a vulnerabilidade respectivamente. Após a obtenção destes valores relativos, esses seis parâmetros devem ser somados.

### 2.2.4 Método AVI

De todos os métodos o Índice de Vulnerabilidade do Aquífero (AVI) descrito por Van Stempvoort *et al.* (1993) considera apenas a espessura da camada sedimentar (d) ou superfície saturada do aquífero e a condutividade hidráulica estimada em cada uma dessas camadas (k)

como os parâmetros físicos fundamentais para a determinação da vulnerabilidade de um aquífero. O autor sugere que a resistência hidráulica seja calculada para cada poço ou buraco de teste.

Correspondente ao parâmetro solo está a espessura da camada sedimentar que funciona como um atenuante por dispersar a carga contaminante.

$$AVI = \sum_{i=1}^n d_i/k_i$$

### 2.2.5 Método EPIK

Este método foi criado por Doerfliger & Zwahlen (1997) para determinar, exclusivamente, a vulnerabilidade à contaminação de aquíferos cársticos. Como características que afetam o fluxo e as condições de transporte de água em um sistema cárstico são avaliadas a zona epicárstica (E), a cobertura de proteção (P), condições de infiltração (I) e desenvolvimento do carste (K).

Os pesos são dados de acordo com o grau de vulnerabilidade de cada parâmetro, e diferentemente dos outros modelos, quanto maior a vulnerabilidade menor o peso. Já os índices variam de acordo com se há ou não um sistema cárstico, o tipo de carste, qual o tipo de cobertura e sua espessura e o tipo de infiltração.

A cobertura protetora pode ser entendida como o fator solo onde pedologia, litologia e espessura da camada são os aspectos mais importantes a serem considerados.

$$V_i = (\alpha \times E_i) + (\beta \times P_i) + (\gamma \times I_i) + (\delta \times K_i)$$

Onde:

$\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  e  $\delta$  são os pesos. Os autores sugerem o uso dos seguintes valores: 3, 1, 3 e 2 respectivamente.

### 2.2.6 Método SINTACS

Este é o modelo mais similar ao DRASTIC, porém a partir de vários testes Civita (1994) e Civita & De Maio (2004) trocaram o parâmetro rede de recarga pela infiltração efetiva para melhor adequação do método à determinação da vulnerabilidade. As características destacadas são a profundidade do nível freático, a infiltração efetiva, a capacidade de atenuação do solo/cobertura, a capacidade de atenuação da zona não saturada, as características hidrogeológicas do aquífero, a condutividade hidráulica e o papel hidrológico da topografia.

Há uma maior flexibilidade na escolha dos pesos e índices dos parâmetros.

$$SINTACS = \sum_{i=1}^7 P_i \times W_i$$

### 2.2.7 Método DAT

Ross *et al.* (2004) propuseram um método para avaliar a vulnerabilidade do aquífero a partir do transporte descendente das cargas contaminantes. Apesar de ter uma forma simplificada, possibilita a confecção de modelos geológicos 3D a partir de informações geológicas e hidrogeológicas, fatores mutáveis como uso do solo ou efeitos climáticos, comportamento do contaminante relacionado ao da água, contaminantes lançados ao solo e o fluxo vertical do aquífero. Para isso, são usados como parâmetros a taxa de recarga ( $q$ ), a espessura da camada de cobertura até o nível freático ( $m$ ) e volume de conteúdo de água ( $\theta$ ) limitado pela porosidade ( $n$ ).

$$DAT = \frac{1}{q} \sum_{i=1}^n m_i \times \theta_i$$

### 2.2.8 Método SAI

Segundo Heredia & Cirelli (2007) o Índice de Atenuação do Solo propõe uma forma normalizada de classificação para os parâmetros escolhidos para determinar a vulnerabilidade. As características ( $C$ ) empregadas neste método são profundidade do nível freático, espessura da zona vadosa, conteúdo de carbono orgânico, capacidade de troca catiônica, pH e conteúdo de argila.

Os fatores recebem o peso ( $P$ ) variando de 1 a 4 de acordo com seu impacto na atenuação dos contaminantes, sendo o valor 4 o mais importante. Ao invés da utilização de índices, este método utiliza uma escala de 10 a 100%.

$$SAI = \frac{\sum C_i \times P_i}{\sum P_i}$$

### 2.2.9 Método SORETO

Após várias ponderações acerca dos fatores hidrogeológicos e sua importância, Cunha (2009) definiu que os principais condicionantes para a vulnerabilidade como conceito são a capacidade de atenuação de cargas contaminantes pelo solo, a resistência vertical ao fluxo e o transporte de contaminantes. O autor também leva em consideração os solos tropicais e sugere pesos pré-definidos como resultados de estudos. Os parâmetros utilizados são solo ( $So$ ), recarga ( $Re$ ), topografia ( $To$ ), zona vadosa ( $I$ ), profundidade do nível estático ( $D$ ), aquífero ( $A$ ) e condutividade hidráulica ( $C$ ).

$$SORETO = So + Re \times 3 + To \times 3 + I \times 3 + D \times 3 + A + C$$

### 2.2.10 Método MAIA

Maia & Cruz (2011) propuseram um novo modelo que descarta o uso de ponderações para os parâmetros com a finalidade de eliminar a subjetividade inerente aos processos de avaliação dos métodos pré-existentes e tornar a avaliação do potencial de contaminação mais direta. Os principais parâmetros utilizados foram separados em fatores direta ou inversamente proporcionais à vulnerabilidade.

Os fatores inversamente proporcionais são profundidade da água (PA), espessura do solo (ES) e declividade do terreno (DT), enquanto os diretamente proporcionais são densidade das fraturas (DF), transmissividade do aquífero (TA), capacidade específica (CE) e recarga potencial (RE). Este método avalia a espessura do solo ou regolito como um parâmetro importante para a atenuação da carga contaminante e proteção do aquífero.

Existem duas propostas de equações neste método, sendo uma para aquíferos fissurais e cársticos onde a densidade de fraturas é bastante valorizada e outra para aquíferos granulares com a transmissividade do aquífero evidenciada e por ambos os resultados estarem na mesma escala, os índices obtidos podem ser comparados. Na falta de dados disponíveis, a densidade das fraturas e a transmissividade do aquífero podem ser excluídas da avaliação.

$$V_{(Fissural)} = \left(\frac{1}{PA}\right) + \left(\frac{1}{ES}\right) + \left(\frac{1}{DT}\right) + CE + RE + DF$$

$$V_{(Granular)} = \left(\frac{1}{PA}\right) + \left(\frac{1}{ES}\right) + \left(\frac{1}{DT}\right) + CE + RE + TA$$

## 2.3 Caracterização da Área de Estudo

### Contexto Geomorfológico Regional

Localizado no Planalto Central do Brasil, o Distrito Federal engloba as bacias dos rios São Bartolomeu, Preto, Descoberto e Maranhão. Os principais fatores que influenciaram na evolução morfodinâmica foram: geologia, estruturação tectônica, clima, vegetação e perfis de alteração. A compartimentação geomorfológica do território do Distrito Federal é constituída pelas seguintes regiões:

- Região de Plano Elevado - apresenta relevo plano a suave ondulado, onde a declividade é inferior a 10% e cotas superiores a 1.100m. Sustentada principalmente pelas formações Serra da Meia Noite e Ribeirão Contagem;
- Região de Plano Intermediário - exhibe padrão de relevo plano a suave ondulado com declividades inferiores 12% e cotas entre 950 e 1.050m. É uma região controlada por rochas pelíticas, tanto do Grupo Paranoá, como do Grupo Bambuí (Campos *et al.* 2013; Dardenne 1978);
- Região Dissecada de Vale - apresenta relevo ondulado a forte ondulado com declividades superiores a 20% e cotas inferiores a 800. Apresenta também, elevada densidade de

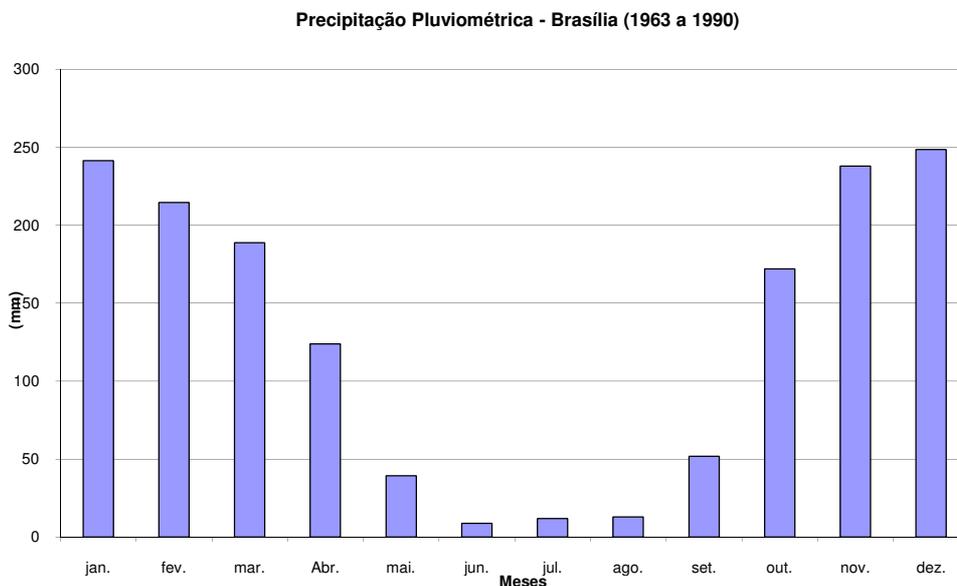
drenagem. Condicionados por rochas pelíticas dos grupos Canastra, Araxá e Paranoá (Campos 2012);

- Região de Rebordo - mostra padrão de relevo ondulado, onde a declividade varia entre 10 e 20% e as cotas, entre 950 e 1.100m;
- Região de Rampa Íngreme - tem relevo forte ondulado a escarpado, onde a declividade supera 25% e as cotas estão compreendidas entre 800 e 1.100m.

Os rebordos e as rampas íngremes são controlados pelos contatos litológicos (Campos 2004, Campos2012).

### Contexto Climático Regional

O Distrito Federal é marcado pela forte sazonalidade, onde existe uma estação seca bem definida no inverno e outra chuvosa no verão (Figura 2.2 e 2.3). No período entre maio e setembro ocorre baixa taxa de precipitação, baixa nebulosidade, alta taxa de evaporação e umidade relativa diária algumas vezes menor que 15%. Nos demais meses do ano acontecem as precipitações que concentram entre dezembro e março 47% da precipitação anual, onde o maior fenômeno controlador é a Zona de Convergência do Atlântico que é caracterizada por zonas nebulosas semi-estacionárias.



**Figura 2.2 - Variação sazonal da precipitação total média mensal para a estação Brasília (em mm).**

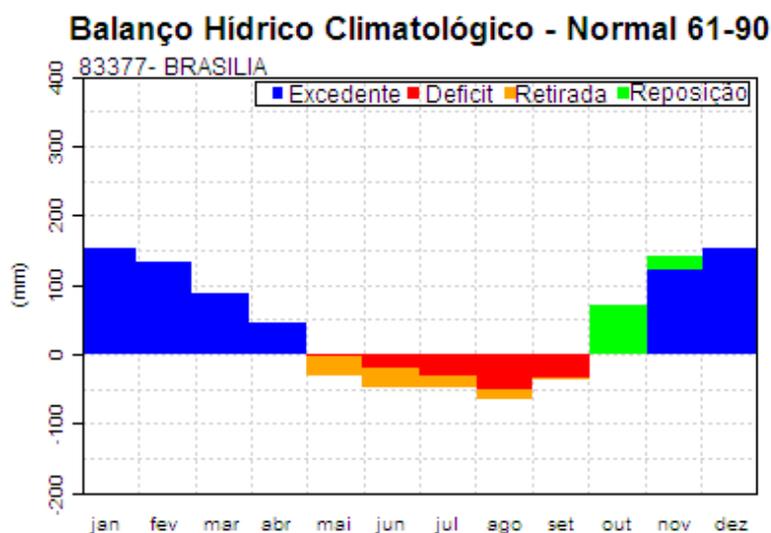


Figura 2.3 - Balanco Hídrico da Estação Brasília (Fonte INMET).

De acordo com a classificação de Köppen, os tipos climáticos que podem ocorrer devido à variação de temperatura e de altitude são: Tropical e Tropical de Altitude, com precipitação média de 1500 mm (Campos 2004, Campos2012).

### Contexto Geológico Regional

A geologia do Distrito Federal foi revista e atualizada a partir da confecção de novo mapa geológico desenvolvido por Campos (2012) e Campos *et al.* (2013). O Distrito Federal, por estar localizado na porção central da Faixa de Dobramentos e Cavalgamentos Brasília compreende quatro conjuntos litológicos distintos, incluindo os grupos Paranoá, Canastra, Araxá e Bambuí. Os grupos Paranoá e Canastra apresentam idade Mesoproterozóico (1.300 a 1.100 milhões de anos), e os grupos Araxá e Bambuí, idade Neoproterozóica (950 a 650 milhões de anos).

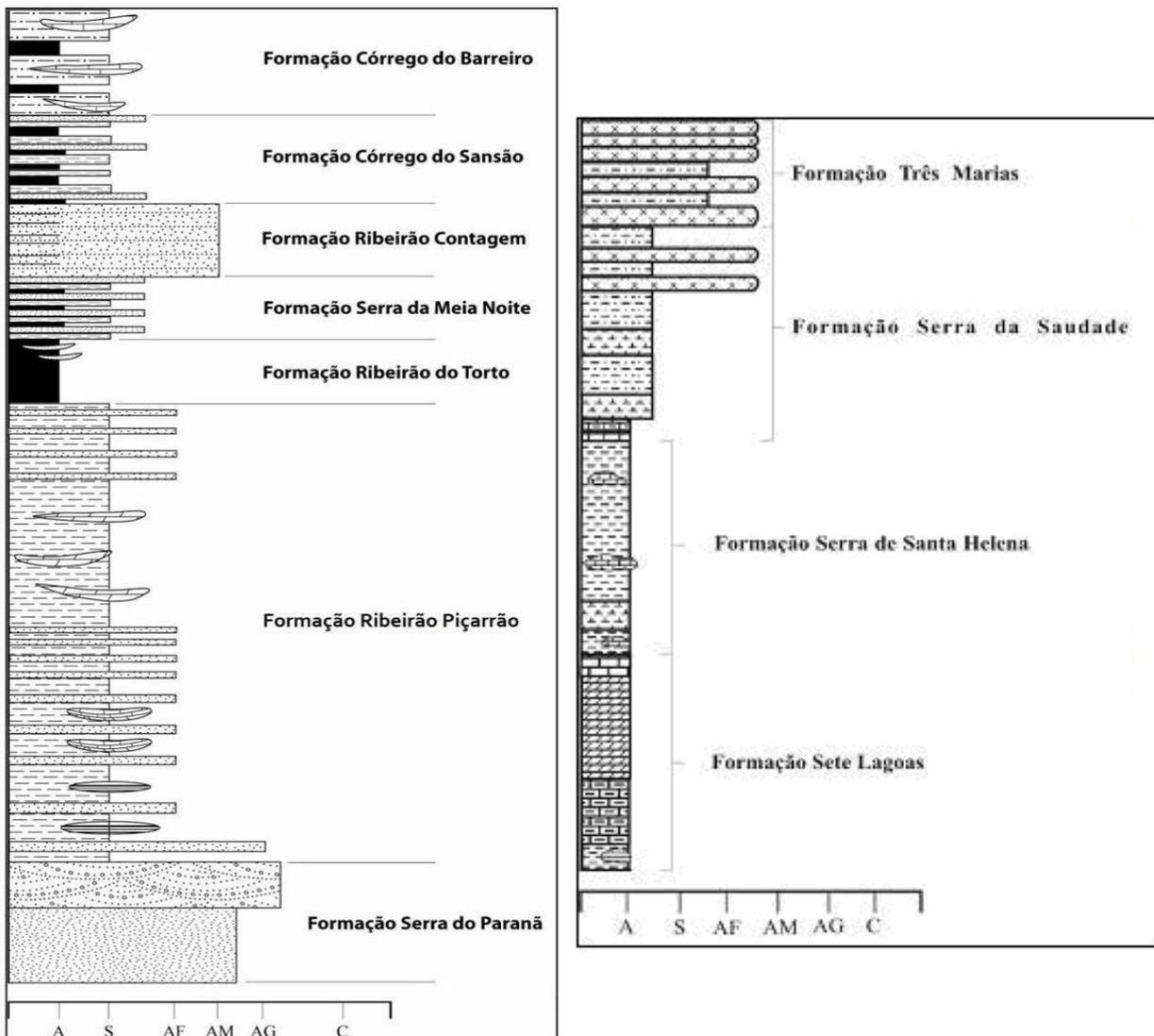
Todos os solos estudados na região estão relacionados a algum tipo de litologia característica. A área investigada encontra-se na porção noroeste do Distrito Federal e, geologicamente, é representada por parte dos grupos Paranoá e Bambuí (Figuras 2.4a e 2.4b).

O Grupo Paranoá ocupa cerca de 65% da área total do Distrito Federal, sendo possível caracterizar sete unidades litoestratigráficas correlacionáveis com as sequências deposicionais das áreas-tipo da região de Alto Paraíso de Goiás (Faria 1995). Atualmente a estratigrafia do Grupo Paranoá foi renomeada por Campos *et al.* (2012). O Grupo Paranoá na região do Distrito Federal é formado da base para o topo pelas seguintes formações: Formação Serra do Paranã (Q<sub>2</sub>), Formação Ribeirão Piçarrão (S), Formação Ribeirão do Torto (A), Formação Serra da Meia Noite (R<sub>3</sub>), Formação Ribeirão Contagem (Q<sub>3</sub>), Formação Córrego do Sansão (R<sub>4</sub>) e Formação Córrego do Barreiro (PPC). Para este trabalho os solos a serem coletados estão localizados sobre as seguintes formações:

- Formação Ribeirão Contagem é composta por quartzitos, de finos a médios, brancos ou rosados, silicificados e intensamente fraturados com intercalações argilosas

laminares. Apresentam estratificações cruzadas variadas e, mais raramente, marcas onduladas. Sustentam o relevo de chapadas elevadas em cotas superiores a 1.200 m.

- Sobrepondo a Formação Ribeirão Contagem ocorrem os metarritmitos argilosos da Formação Córrego Sansão. Estes são constituídos por intercalações regulares de quartzitos muito finos e metapelitos, com espessuras bastante regulares da ordem de 1 a 3 cm. Apenas raramente são discriminados pacotes decimétricos de metassiltitos maciços.
- E finalmente a Formação Córrego do Barreiro, antiga Unidade Psamo-Pelito-Carbonatada, composta por lentes de metacalcários, camadas e lentes de quartzitos pretos e grossos interdigitados com metassiltitos e metargilitos com cores amareladas, que passam a tons rosados quando alterados.



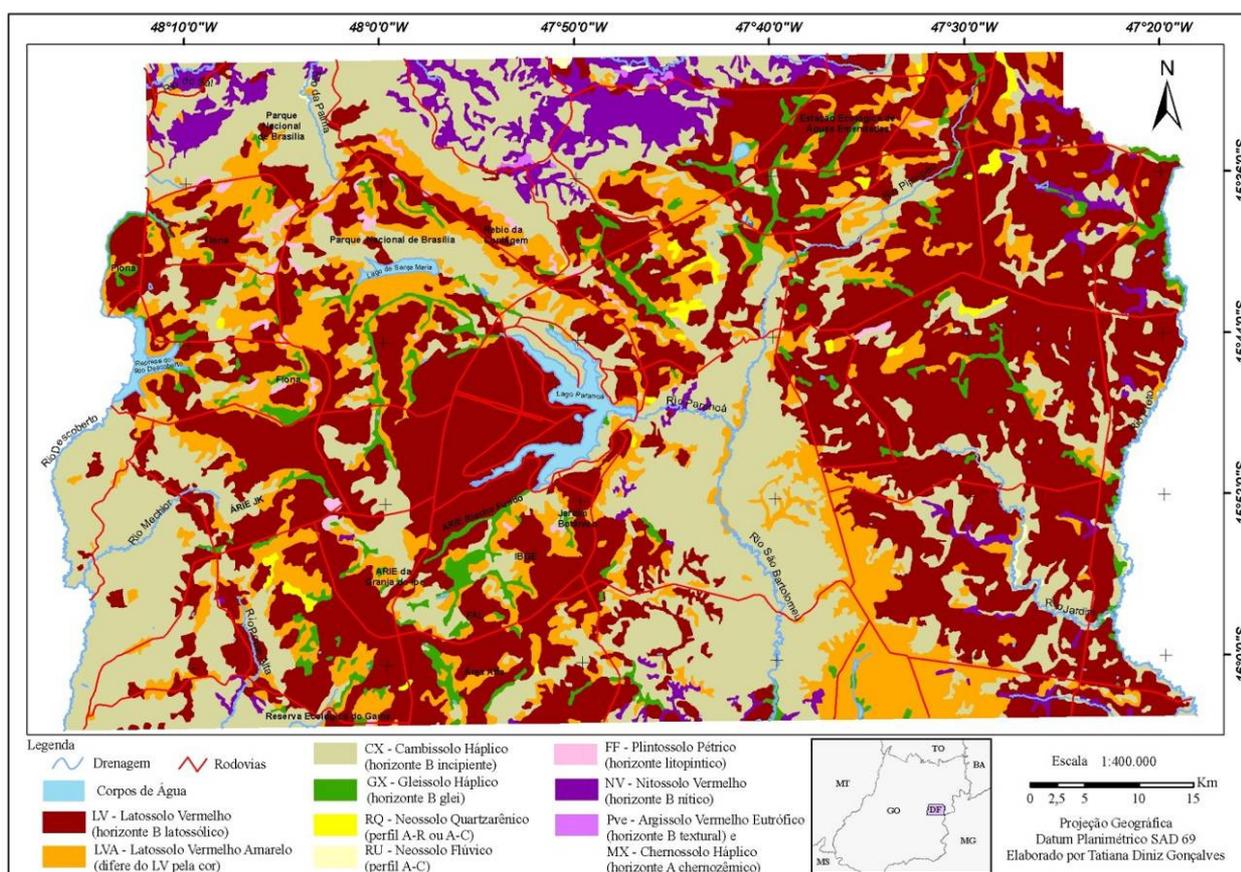
**Figura 2.4 - Colunas estratigráficas do Grupo Paranoá (a) e do Grupo Bambuí (b), respectivamente, na região do Distrito Federal (modificadas de Campos *et al.* 2013 e Dardenne 1978).**

O Grupo Bambuí distribui-se por cerca de 15% da área total do DF, sendo observado na porção leste, ao longo do Vale do Rio Preto. Da base para o topo é composta pelas formações Sete Lagoas, Serra de Santa Helena, Serra da Saudade e Três Marias.

As litologias correspondentes aos solos coletados são pertencentes à Formação Sete Lagoas composta por argilitos com lentes de dolomito bege laminado e calcários argilosos, dolomitos laminados, brechas dolomíticas, dolarenitos e calcários cinza escuros localmente oolíticos e à Formação Três Marias por arcóseos esverdeados em bancos maciços, alternados com siltitos arcoseanos esverdeados (Guimarães & Silva 2001).

### Contexto Pedológico Regional

Segundo o mapeamento do Serviço Nacional de Levantamento e Conservação dos Solos (Embrapa 1978), as principais classes de solos encontradas no Distrito Federal podem ser separadas em dois grupos distintos onde 50% da cobertura de solo é representada por Latossolo Vermelho (LV) e Latossolo Vermelho Amarelo (LVA), 35% por Cambissolo Háptico (CX) e os 15% restantes por Argissolo (A), Nitossolo (N), Chernossolo (B), Neossolo Flúvico (RF), Neossolo Litólico (RL), Neossolo Quartzarênico (RQ), Gleissolo (G), Organossolo (O) e Plintossolo (F). Após esse mapeamento houve uma atualização que ocasionou no seguinte mapa pedológico do Distrito Federal.



**Figura 2.5** - Mapa de solos do Distrito Federal (Gonçalves 2006, modificado de Embrapa 1978).

## Contexto Hidrogeológico Regional

Os aquíferos do DF foram caracterizado por Campos & Freitas-Silva (1998 e 1999) em três domínios, com respectivos sistemas aquíferos e em alguns casos com subsistemas (Tabela 2.1).

**Tabela 2.1- Resumo da classificação dos Domínios, Sistemas/Subsistemas aquíferos do Distrito Federal com respectivas vazões médias. Fonte: Adaptado de Campos & Freitas-Silva (1999).**

DOMÍNIO	SISTEMA	SUBSISTEMA	Vazão Média (m <sup>3</sup> /h)	Litologia/Solo Predominante
Freático	Sistema P <sub>1</sub>	Deverão ser definidos com o detalhamento da cartografia hidrogeológica.	< 0,8	Latossolos Arenosos e Neossolos Quartzarênicos.
	Sistema P <sub>2</sub>		< 0,5	Latossolo Argilosos.
	Sistema P <sub>3</sub>			Plintossolos e Argissolos.
	Sistema P <sub>4</sub>		< 0,3	Cambissolo e Neossolo Litólico.
Fraturado	Paranoá	S/A	12,5	Metassiltitos.
		A	4,5	Ardósias.
		R <sub>3</sub> /Q <sub>3</sub>	12,0	Quartzitos e metarritmitos arenosos.
		R <sub>4</sub>	6,5	Metarritmitos argilosos.
	Canastra	F	7,5	Filitos micáceos.
	Bambuí	-	6,0	Siltitos e arcóseos.
	Araxá	-	3,5	Mica xistos.
Físsuro-Cárstico	Paranoá	PPC	9,0	Metassiltitos e lentes de mármore.
	Canastra	F/Q/M	33,0	Calcifilitos, quartzitos e mármore.

- Domínio Freático

Os aquíferos do Domínio Freático são caracterizados pelos meios geológicos onde a porosidade é do tipo intergranular, ou seja, a água ocupa os poros entre os minerais constituintes do material geológico (rocha ou solo). No Distrito Federal esse domínio é essencialmente representado pelos solos e pelo manto de alteração das rochas. A caracterização dos aquíferos desse domínio está vinculada a vários parâmetros, dos quais dois são destacados: a espessura saturada (b) e a condutividade hidráulica (K), sendo que ambas são diretamente controladas pela geologia e pela geomorfologia onde cada tipo de solo está inserido.

No Distrito Federal os aquíferos freáticos são compostos por meios geológicos não consolidados, com espessuras saturadas variando de poucos centímetros até 80 metros, com ampla predominância (>60%) de espessuras entre 15 e 25 metros, grande extensão e continuidade lateral, heterogêneos e anisotrópicos (Campos 2012). Os aquíferos relacionados a esse domínio são classificados como aquíferos livres e/ou suspensos, com ampla continuidade lateral, compondo o sistema de águas subterrâneas rasas. Esses aquíferos geralmente são aproveitados por poços rasos, sendo a altura do nível freático controlada pela hipsometria e por feições físicas gerais dos vários tipos de solo/manto de intemperismo. Como são aquíferos rasos e livres, são moderadamente susceptíveis à contaminação por agentes externos, sendo, em geral, isolados em sistemas de abastecimento público. Os volumes de água captados pelos poços rasos são sempre inferiores a 800 L/h.

Em função de parâmetros dimensionais (principalmente espessura saturada  $b$  e condutividade hidráulica  $K$ ), esse domínio foi dividido em quatro sistemas denominados P1, P2, P3 e P4. Os sistemas P1 e P2 são caracterizados por espessuras maiores que 20 metros e condutividades hidráulicas, respectivamente, alta (maior que  $10^{-6}$  m/s) e moderada (da ordem de grandeza de  $10^{-6}$  m/s). No Sistema P3 as espessuras totais são reduzidas para menos de 10 metros e a condutividade hidráulica assume valores menores que  $10^{-6}$  m/s. O sistema P4 caracteriza-se por pequenas espessuras (comumente menores que 1 metro, podendo alcançar 2,5 metros) e condutividade hidráulica muito baixa. Nesse Sistema é comum a ausência de zona de saturação no domínio do saprolito, principalmente quando desenvolvidos sobre rochas argilosas.

Esse domínio aquífero apresenta particularidades devido ao fato de incluir a transição entre a zona não saturada e a zona saturada do aquífero. Essa porção também inclui a região onde se originam os processos de recarga dos aquíferos (rasos e profundos) a partir da infiltração das águas de chuva. Uma importância adicional desse domínio está vinculada à manutenção da perenidade de drenagens no período de recessão de chuvas.

As zonas de descargas desse domínio estão relacionadas a fontes do tipo depressão ou contato, sendo que sua vazão média é controlada pelo tipo de regime de fluxo. As fontes relacionadas a fluxos regionais e intermediários apresentam vazões superiores a 2,0 litros por segundo, enquanto as de fluxo local mostram vazões reduzidas e com amplas variações sazonais. Os aquíferos subjacentes, do domínio fraturado, também funcionam como importantes exutórios dos aquíferos do domínio poroso, pois são diretamente alimentados a partir da zona saturada contida nos solos e nas rochas alteradas.

- Domínio Fraturado

Os aquíferos do domínio fraturado são caracterizados pelos meios rochosos, onde os espaços ocupados pela água são representados por descontinuidades planares, ou seja, planos de fraturas, microfraturas, diáclases, juntas, zonas de cisalhamento e falhas. Como no Distrito Federal o substrato rochoso é representado por metassedimentos, os espaços intergranulares foram preenchidos durante a litificação e o metamorfismo. Dessa forma, os eventuais reservatórios existentes nas rochas proterozóicas estão inclusos dentro do Domínio Fraturado, onde os espaços armazenadores de água são classificados como porosidade secundária.

Por estarem restritos a zonas que variam de alguns metros a centenas de metros, os aquíferos do Domínio Fraturado são livres ou confinados, de extensão lateral variável, fortemente anisotrópicos e heterogêneos, compondo o sistema de águas subterrâneas profundas. Com raras exceções, esse domínio está limitado a profundidades pouco superiores a 250 metros, sendo que em profundidades maiores há uma tendência de fechamento dos planos de fraturas em virtude do aumento da pressão.

Os parâmetros hidrodinâmicos são muito variáveis em função do tipo de rocha e, inclusive, variando significativamente em um mesmo tipo litológico. O principal fator que

controla a condutividade hidráulica dos aquíferos desse domínio é a densidade das descontinuidades do corpo rochoso.

Esses aquíferos são aproveitados a partir de poços tubulares profundos e apresentam vazões que variam de zero até valores superiores a 100 m<sup>3</sup>/h, sendo que a grande maioria dos poços apresenta entre 5 e 12 m<sup>3</sup>/h (Campos 2012). A existência de poços secos é controlada pela variação da fração granulométrica, sendo que quanto maior a concentração de quartzitos menor a incidência de poços secos e quanto maior a presença de material argiloso (metassiltitos e ardósias) maior a ocorrência de poços secos ou de muito baixa vazão.

A classificação desse domínio em quatro conjuntos distintos, denominados de sistemas aquíferos Paranoá, Canastra, Araxá e Bambuí é feita com base no conhecimento geológico, análise estatística dos dados de vazões e feições estruturais (Campos & Freitas-Silva 1998).

O Sistema Paranoá foi subdividido nos seguintes subsistemas: S/A, A, R3/Q3 e R4, enquanto o Sistema Canastra é integrado pelo Subsistema F.

As águas subterrâneas desse domínio apresentam exposição à contaminação atenuada, uma vez que os aquíferos do Domínio Intergranular sobrepostos funcionam como um filtro depurador natural, que age como um protetor da qualidade das águas mais profundas.

A recarga dos aquíferos desse domínio se dá através do fluxo vertical e lateral de águas de infiltração a partir da precipitação pluviométrica. A morfologia da paisagem é um importante fator controlador das principais áreas de recarga regionais.

- Domínio Físsuro-Cárstico

Os sistemas de porosidade físsuro-cárstica são representados por situações em que rochas carbonáticas (calcários, dolomitos, margas e mármore) ocorrem na forma de lentes com restrita continuidade lateral interdigitadas com litologias pouco permeáveis (siltitos argilosos, folhelhos ou filitos).

Nesses casos a dissolução cárstica fica limitada pela restrita circulação e as cavidades resultantes são pequenas, inferiores a 3 metros de abertura. Mesmo não representando sistemas cársticos clássicos essas ocorrências são responsáveis pelas vazões mais expressivas em poços individuais conhecidos na região do Distrito Federal (Campos 2012).

Na região do Distrito Federal ocorrem aquíferos físsuro-cársticos vinculados ao Sistema Paranoá, que é representado pelo Subsistema PPC e pelo Sistema Canastra, associado ao Subsistema F/Q/M (Campos, 2012). O subsistema F/Q/M apresenta especial importância na região, pois é responsável pelo abastecimento exclusivo da Cidade Satélite de São Sebastião com cerca de 100.000 habitantes.

### 3 EXPERIMENTO, ANÁLISES, RESULTADOS E AVALIAÇÕES PRELIMINARES

#### 3.1 Parte Experimental

Nesta dissertação foram aplicados diversos métodos e técnicas que possibilitaram alcançar os objetivos anteriormente enumerados. Quatro etapas foram desenvolvidas: etapa de campo, de experimentação, de análises laboratoriais e definição das características de solos mais significativas para adaptação dos modelos de determinação de vulnerabilidade a contaminação de aquíferos (DRASTIC, GOD e AVI). As diferentes etapas foram acompanhadas de ampla pesquisa bibliográfica.

#### Confecção de Colunas de Solo

Realizou-se trabalho de campo, na região do Distrito Federal, para a escolha de perfis representativos dos principais tipos de solos brasileiros. Os perfis amostrados foram descritos e classificados de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos (Embrapa 2013), sendo representados por: Latossolo Vermelho distrófico, Gleissolo Háptico distrófico, Neossolo Quartzarênico órtico, Plintossolo Háptico concrecionário, Organossolo Háptico fíbrico, Argissolo Vermelho eutrófico, Cambissolo Háptico distrófico, Nitossolo Vermelho distrófico e Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, além da representação de um saprolito bastante espesso, característica comum em regiões tropicais. Estes solos serão descritos detalhadamente no item 3.4.1. Após a escolha dos perfis, realizou-se a limpeza do talude de aproximadamente 70 cm por perfil e aproximadamente 140 cm quando o solo era muito espesso (Latossolo), neste caso foi realizada amostragem de dois horizontes distintos do mesmo perfil. Essa limpeza de talude propiciou uma amostragem de perfil de solo mais natural sem os efeitos do intemperismo a partir da exposição do talude (Figura 3.1).



**Figura 3.1- Exemplo de exposição de talude (área de empréstimo) em Latossolo Vermelho onde foi realizada a amostragem para preenchimento de coluna.**

A partir de tubos de PVC de mesmo diâmetro (100 mm) e comprimento (75 cm) foram confeccionadas doze colunas de solos. Primeiramente, na porção final de cada coluna foram instalados: redutor de tubulação 100x75 mm de diâmetro de PVC, para solos de textura mais arenosa, ou redutor de tubulação 100x50 mm de PVC, para solos mais argilosos, luva simples de PVC, tela verde de *nylon* reforçada que permite a saída da solução percolada garantindo a manutenção do solo na coluna (Figura 3.2), arame recozido liso para amarrar a tela (Figura 3.3) e corda para alça da coluna (Figura 3.4). No final, as colunas de solo ficaram como mostrado na Figura 3.5.



**Figura 3.2-** Detalhe da instalação da tela de *nylon* para contenção do solo e retirada da amostra de percolado.



**Figura 3.3-** Detalhe da fixação da tela de *nylon*.



**Figura 3.4-** Detalhe da alça para fixação da coluna acima no nível do terreno, para possibilitar a retirada da amostra em recipiente colocado abaixo da base da coluna.

A amostragem dos solos realizou-se de forma a incluir a maior diversidade de solos existente no Distrito Federal e entorno, levando-se em consideração principalmente as variações estruturais e texturais.

Para causar a menor perturbação no material, a coluna (Figura 3.5) foi montada mantendo a ordem dos horizontes (Figura 3.6) e com adensamento realizado por sucessivos impactos dos tubos contra o solo para tentar reproduzir da melhor forma possível a porosidade original sem destruir as estruturas de cada tipo de solo.



**Figura 3.5 -** Exemplo de tubo utilizado para a montagem das colunas. Na porção inferior foi instalada uma tela de *nylon* para possibilitar a coleta da solução percolada.



**Figura 3.6 -** Exemplos de retirada da coluna de solo a partir do talude.

A amostragem foi realizada na porção Norte do Distrito Federal, durante a estação seca (no dia 5 do mês de agosto de 2012) de forma a se ter um material com baixa umidade (seco)

para possibilitar a coleta e melhor manuseio, além da maior facilidade na comparação entre os solos.

As colunas foram dispostas lado a lado (Figura 3.7) penduradas de forma a se manter a verticalidade do perfil tomando-se cuidado para manter abertura superior afastada do suporte o suficiente para manuseio das soluções administradas e em ambiente fechado para se ter maior controle dos ensaios de percolação e minimizar as interferências externas.

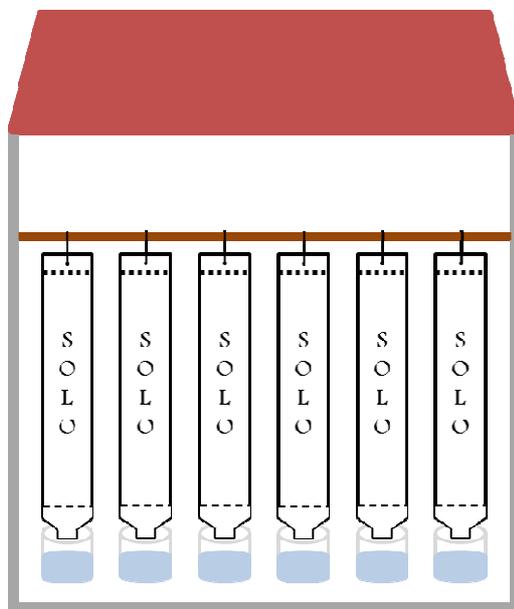


Figura 3.7 - Desenho esquemático da disposição das colunas de lixiviação.

- Ensaio de Percolação

Para a realização dos ensaios de percolação foi injetado em cada coluna de solo 200 ml de uma solução de  $\text{NaCl}$  com a maior concentração possível, a fim de poder avaliar a retenção de cátions ( $\text{Na}^+$ ) e ânions ( $\text{Cl}^-$ ) inorgânicos. Quando a solução foi aplicada nas últimas colunas, o sal estava precipitando, impossibilitando, assim, se saber se a concentração se manteve constante em todas as colunas, conquanto o volume injetado em cada uma tenha sido o mesmo.

Para se evitar uma rápida diluição e “lavagem” da solução, a percolação foi feita a partir da simulação da precipitação em um período hidrológico anterior (por exemplo, o ano de 2011) por água destilada para que a composição fosse mais aproximada à água de chuva, composicionalmente. Essa simulação teve início em 08/12/2012 e finalização em 03/05/2013, totalizando 160 dias de simulação de precipitação.

Inicialmente a precipitação foi simulada com água destilada, mas por problemas técnicos o resto do experimento foi realizado com água comum de torneira. Considerou-se que os elementos contidos na água de torneira não influenciariam de forma significativa uma vez que a solução percolante era extremamente concentrada, a concentração de cloro livre presente na água de torneira apresentou concentrações inferiores a 2mg/l (CAESB) durante o período de simulação de precipitação, além disso, os percolados posteriormente seriam diluídos com água destilada em laboratório. A água foi distribuída de forma regular com auxílio de um regador

manual, diariamente. A irrigação foi realizada na porção central da coluna para se evitar a infiltração direta a partir das paredes internas do tubo.

- Coleta de Amostras

As amostras de percolado foram coletadas a cada 3 (três) dias ou sempre que acumulado um volume mínimo de 200 ml. Na saída de cada coluna de solo foi instalado um bécker quimicamente inerte de polietileno para capturar todo o percolado que passou pela coluna. A amostra coletada foi filtrada e transferida para tubo de centrífuga limpo (lavagem realizada três vezes em ácido nítrico 5 ou 10% concentrado e três vezes em água do tipo Milli-Q ou Nanopure).

### 3.2 Análises

Para as análises laboratoriais dos solos e das soluções de lixiviação foram utilizadas as seguintes técnicas:

- Verificação da mineralogia a partir da difratometria de raios-X (RIGAKU) e da composição química por fluorescência de raios-X (RIGAKU);
- Identificação de microporosidade nas estruturas dos solos a partir do microscópio eletrônico de varredura (FEI);
- Medição de pH do solo em solução e determinação de  $\Delta$ pH dos solos;
- Aferição da condutividade elétrica, logo depois de coletadas as soluções;
- Obtenção de concentrações de  $\text{Cl}^-$  por titulação;
- Determinação das concentrações  $\text{Cl}^-$  por cromatografia iônica (DIONEX);
- Determinação das concentrações em  $\text{Na}^+$  por espectroscopia de emissão atômica de chama (PerkinElmer).

Para a realização das análises de solos foram coletados a parte aproximadamente 4 kg de cada tipo de solo utilizado para a confecção das colunas de lixiviação, na forma de mistura (entre horizontes do mesmo solo).

### 3.3 Métodos Analíticos

- Condutividade Elétrica e pH

Para obtenção dos valores de condutividade elétrica das soluções lixiviadas e de pH dos solos utilizou-se o kit HACH modelo HQ40d Multi composto por dois eletrodos, sendo que ambos determinam a temperatura da amostra (Figura 3.7). Os íons dos sais dissolvidos na água transformam-se num eletrólito capaz de conduzir a corrente elétrica. O condutímetro mede a corrente que passa pela célula de solução salina na qual é aplicada uma tensão conhecida chegando assim ao potencial elétrico. O pHmetro mede a concentração de  $\text{H}^+$  disperso na água (Pinto, 2006). O equipamento foi calibrado antes das determinações. Segundo o manual do

equipamento, os limites de medição são 0,01 e 400.000,00  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , inferior e superior respectivamente.



**Figura 3.8- Equipamento portátil multi parâmetros utilizado para análises dos solos amostrados.**

Além da obtenção do pH dos solos a partir de solução com água, é possível determinar o  $\Delta\text{pH}$  dos solos, parâmetro que indica a predominância de cargas disponíveis nos solos.

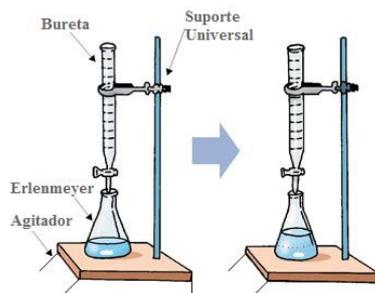
Para a determinação de  $\Delta\text{pH}$ , são medidas 2 (duas) soluções, uma com amostra de solo diluída em  $\text{H}_2\text{O}$  e outra com amostra solubilizada em  $\text{KCl}$ . Após medição com pHmetro, o resultado de pH da solução aquosa é diminuído do resultado de pH da solução de  $\text{KCl}$ , chegando-se assim aos valores desejados.

- Titulação de Mohr

A titulação é uma técnica para verificar a presença e a concentração de cloreto ( $\text{Cl}^-$ ) em uma solução. O objetivo desta análise foi, a partir do resultado, estimar a concentração inicial da solução de  $\text{NaCl}$  e desta forma fazer as primeiras diluições das soluções de lixiviados.

Para a realização do método utilizou-se um erlenmeyer de 100 ml para cada solução a ser analisada, pipeta de 1 ml para a medição do indicador de coloração cromato de potássio ( $\text{K}_2\text{CrO}_4$ ), bureta de 10 ml para titular o nitrato de prata ( $\text{AgNO}_3$ ), agitador e barra magnéticos para homogeneização (Figura 3.8). Considerando a alta concentração da solução infiltrada, decidiu-se por testar algumas diluições e não desperdiçar muito reagente.

Mediu-se 100 ml de cada solução às quais se adicionaram 1 ml de  $\text{K}_2\text{CrO}_4$ , o  $\text{AgNO}_3$  foi acrescido até atingir coloração castanha, chamado ponto de viragem. Isso ocorre quando o  $\text{AgCl}$  é depositado, e conseqüentemente, o  $\text{Ag}_2\text{CrO}_4$  é precipitado. A partir de cálculos estequiométricos as concentrações iniciais de Sódio e do Cloreto puderam ser determinadas.



**Figura 3.9- Esquematisação da titulação.**

- Espectroscopia Emissão Atômica de Chama

Este é o melhor método de análise para quantificar o metal dissolvido da solução infiltrada devido à enorme sensibilidade do equipamento. O equipamento utilizado foi o AAAnalyst 200 de marca Perkin Elmer (Figura 3.10). Para análise de Na<sup>+</sup> selecionou-se comprimento de onda ( $\lambda$ ) 589,00 nm e fenda 1,8/0,6 mm. Para determinação da concentração em mg/l de sódio utiliza-se a chama como fonte de excitação para emissão atômica. Os limites de quantificação neste método para Na estão entre 1 e 5 mg/l. Considerando as altas concentrações, foi necessária a diluição das soluções lixiviadas coletadas para que as mesmas tivessem concentrações dentro do intervalo da curva de detecção para sódio.



**Figura 3.10- Espectrômetro durante análise.**

- Cromatografia Iônica

A cromatografia tem como princípio a separação de misturas a partir da interação de íons, tanto estacionários como móveis, com a coluna de resina de troca iônica. É a partir da condutância elétrica que se obtém valores quantitativos para os íons dissolvidos em solução. A cromatografia líquida de alta performance utiliza pressões elevadas garantindo assim a necessidade de menores volumes de amostra (Fernandes, 2006). Para as análises dos ânions utilizou-se o cromatógrafo iônico da marca Dionex, modelo ICS 90 (Figura 3.11), com pré-coluna AG14A, coluna AS14A e supressor de condutividade química. Os limites de quantificação neste método para Cl estão entre 05 e 10 mg/l. A mesma diluição das soluções lixiviadas coletadas usadas na emissão atômica, foi utilizada na cromatografia iônica para detecção de cloreto dentro da curva de quantificação específica para este ânion.



**Figura 3.11- Cromatografia iônica em funcionamento.**

- Difractometria de Raios-X

A preparação das amostras e análises por difratometria de raios-X foram realizadas no Laboratório de Difração de Raios-X do Instituto de Geociências da UnB. Para a confecção da lâmina da amostra total separou-se a partir de quarteamento uma pequena porção do solo, a qual foi macerada em moinho de ágata e posteriormente disposta sobre uma depressão existente na lâmina. Pesou-se 7,5 g de amostra, também quarteada, para a confecção da lâmina de fração argila. Para separar a fração argila do silte e areia, as amostras passaram por duas etapas distintas de suspensão e centrifugação em centrífuga Thermo Scientific IEC CL 31R Multispeed., conforme segue:

- Primeira etapa: uma amostra de cada solo foi dispersa em água destilada totalizando um volume de 150 ml, ligeiramente homogeneizada, separada em três tubos de centrífuga de 50ml e centrifugada a 700 rpm por um período de 7 minutos e 30 segundos.
- Segunda etapa: o sobrenadante obtido da centrifugação foi transferido para outro tubo de centrífuga descartando o corpo de fundo da amostra. Este sobrenadante passou novamente pela centrifugação a uma rotação de 3000 rpm por um período de 30 minutos, o líquido sobrenadante foi descartado.

O corpo de fundo dos três tubos de centrífuga foi disposto sobre lâmina delgada pela técnica do esfregaço no intuito de orientar os minerais. Esta lâmina passou por três análises no difratômetro, a primeira em sua forma original, posteriormente à solvatação com etileno-glicol e finalmente após aquecimento a 490°C por 3:00 h.

As análises difratométricas foram realizadas em difratômetro Rigaku Ultima IV operando sob 35 kV e 15 mA, equipado com anodo de cobre e filtro de níquel, velocidade de varredura de 2° por minuto, no intervalo de 3 a 70° 2 $\theta$ . A identificação dos minerais foi realizada analisando os picos e suas intensidades com o auxílio do Software Jade 9.0 com banco de dados PDF ICCD 2.

- Fluorescência de Raios-X

A preparação das amostras e análises por fluorescência de raios-X foram realizadas no Laboratório de Geocronologia do Instituto de Geociências da UnB. Para a confecção do vidro separou-se uma pequena porção do solo, a qual foi secada em estufa por 3 dias para perder a umidade. Posteriormente, foi realizada a metodologia de determinação de perda ao fogo que consiste em tarar o cadinho após passar 1:00h na temperatura de 1.000°C, medir 3g de amostra, deixar 2:00h na temperatura de 1.000°C e medir novamente amostra+cadinho, a partir dessa informação calculou-se o percentual de perda ao fogo.

Na etapa de fusão, foram medidos 0,9g de amostra, 9,0g de tetraborato de lítio e 2 gotas de brometo de lítio, depois colocou-se no programa geral por 20 minutos. Quando finalizada a fusão, deixou-se descansar/esfriar por 30 minutos no dessecador.

As análises de fluorescência foram realizadas em espectrômetro Rigaku Zsx PrimusII operando com gás glp da marca Claisse, modelo Claisse m4 Fluxer. A identificação da composição química dos solos foi realizada com o auxílio do programa Zsx Versão 5.24.

- Microscópio Eletrônico de Varredura

Inicialmente os solos foram secos em estufa e posteriormente dispostos em lâminas de vidro cobertas com fita durex. Metalizou-se a amostra com uma camada manométrica de ouro para que a mesma se tornasse condutiva para o imageamento. O microscópio utilizado foi o Quorum Q150R ES.

Considerando que as amostras fixaram bem nas lâminas, podendo, assim, contaminar o interior do equipamento quando da criação de vácuo no interior do mesmo, escolheu-se por utilizar o modo ambiental. Desta forma foi possível verificar a microporosidade contida nas estruturas dos solos.

- Textura

A textura foi analisada em laboratório terceirizado onde o método escolhido foi o do densímetro, que se baseia na velocidade de queda das partículas que compõem o solo após adicionado dispersante químico (soda ou calgon) para determinação da concentração total de argila). As frações areia grossa e fina foram separadas por tamisação, secas em estufa e pesadas para obtenção dos respectivos percentuais. O silte correspondeu ao complemento para 1000 g/kg.

### **3.4 Resultados**

#### **3.4.1 Solos**

Neste tópico serão discutidas as características descritivas dos solos coletados, assim como os resultados das análises realizadas nos mesmos.

Os solos coletados e amostrados foram visitados e estudados na disciplina de Pedologia ministrada no segundo período de 2011. Ademais, estes solos foram escolhidos por considerar que a variedade de tipos de solos do Distrito Federal é suficiente para representar os solos tropicais considerando sua diversidade.

Inicialmente estes solos foram previamente classificados de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos (Embrapa 2006), entretanto em 2013 houve a publicação de um novo Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos (Embrapa 2013) e, conseqüentemente, os solos coletados tiveram sua classificação atualizada. Segue descrição pedológica e fotografias (Tabela 3.1) de todos os perfis:

#### Latossolo Vermelho distrófico (LVd<sub>1</sub> e LVd<sub>2</sub>) (UTM 23L 0216840N 8273227W)

Perfil com textura média e estrutura grumosa a granular grossa, em que a estruturação granular é mais comum nos horizontes mais rasos. A transição entre os horizontes é gradual e regular. A intensa transformação e avançada pedogênese são características também relacionadas ao relevo local plano. Este perfil de solo é muito bem drenado.

O material parental pelítico pertence à Formação Córrego do Barreiro do Grupo Paranoá.

Foram coletadas duas porções distintas de amostra deste perfil sendo a mais superficial (LVd<sub>1</sub>) e a outra com profundidade maior que 30cm (LVd<sub>2</sub>).

#### Gleissolo Háptico distrófico (GXd) (UTM 23L 0218499N 8273804W)

Perfil com textura muito argilosa e estrutura comum grumosa a granular média, sendo o horizonte A caracterizado pela forte formação de grânulos. A transição entre os horizontes AB e B glei é gradual e regular. Este último é marcado por um leve mosqueamento em sua porção basal. O perfil apresenta forte hidromorfismo possibilitado pelo relevo local suave ondulado e pela restrita condutividade hidráulica do substrato.

O material parental é representado por metarritmitos da Formação Córrego do Sansão do Grupo Paranoá.

#### Neossolo Quartzarênico órtico (RQo) (UTM 23L 0224110N 8275086W)

Perfil pouco espesso com textura média em grãos simples de quartzo do quartzito parental e sem estruturação. Substrato originário da Formação Ribeirão Contagem do Grupo Paranoá.

**Tabela 3.1- Fotografias dos perfis de solos estudados.**



Latossolo Vermelho  
distrófico.



Gleissolo Háplico  
distrófico.



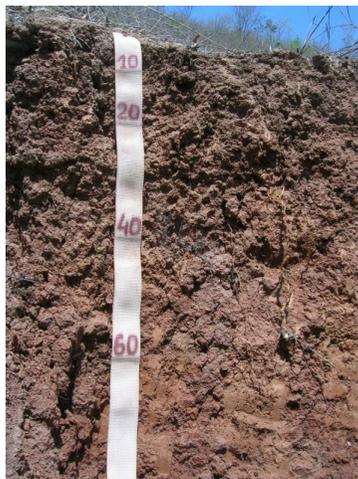
Neossolo Quartzarênico  
órtico.



Plintossolo Háplico  
concrecionário.



Organossolo  
Háplicofíbrico.



Argissolo Vermelho  
eutrófico.



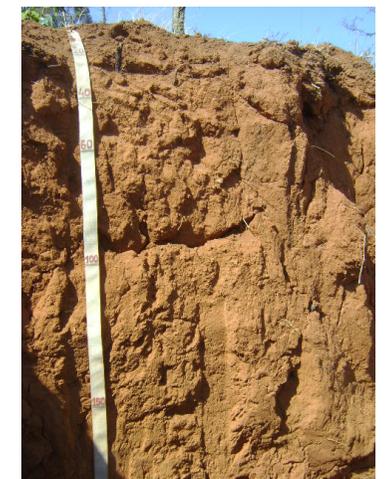
Cambissolo Háplico  
distrófico.



Saprolito de rocha pelítica  
oxidada.



Nitossolo Vermelho  
distrófico.



Latossolo Vermelho-  
Amarelo distrófico.

Plintossolo Háptico concrecionário (FXc) (UTM 23L 0242326N 8276050W)

A textura predominante deste solo é argilosa com pedregosidade e a estrutura é grumosa a granular, com ocorrência de plintitas ao longo de todo o perfil, com porcentagens variando de 50 a 60%. A presença de plintita tende a reduzir com o aumento da profundidade, bem como seu tamanho que passa de 1 cm até 0,3 cm de diâmetro. Este perfil apresenta intensa transformação, plintitização e translocação de ferro que é possibilitada pelo relevo local suave ondulado. Ocorre mosqueamento pela acumulação de ferro no horizonte saprolítico.

O material parental é constituído principalmente pelo siltito argiloso da Formação Três Marias do Grupo Bambuí.

Organossolo Háptico fíbrico (OXfi) (UTM 23L 0218991N 8273839W)

Trata-se de perfil de textura média e estrutura granular, sendo a transição dos horizontes gradual. Este solo está localizado na área da Estação Ecológica de Águas Emendadas o que auxilia a preservação de matéria orgânica suficiente em função da grande densidade de vegetação. O perfil apresenta horizonte superficial orgânico e forte hidromorfismo possibilitado pelo relevo local plano e pelo substrato impermeável. Devido a sua pequena espessura, o perfil foi repetido três vezes.

Material parental metarritmítico pertencente à Formação Córrego do Sansão.

Argissolo Vermelho eutrófico (AVe) (UTM 23L 0198032N 8281751W)

Perfil de textura muito argilosa com evidência de translocação da fração argilosa ao longo do perfil com avanço crescente proporcionalmente ao aumento da profundidade a partir de processos de argiluviação avançada. Apresenta estrutura granular, pedregosidade e alta cerosidade no horizonte B textural.

Substrato composto por argilitos, dolomitos e calcários pertencentes à Formação Sete Lagoas do Grupo Bambuí.

Cambissolo Háptico distrófico (CXd) (UTM 23L 0195858N 8279049W)

Apresenta perfil pouco espesso, textura muito argilosa e estrutura granular. Apresenta um mosqueamento muito restrito no horizonte B incipiente, além de leve presença de pedregosidade representada por grãos de quartzo.

O substrato é originário de pelitos azul-esverdeados da Formação Córrego do Barreiro do Grupo Paranoá.

Saprolito (Sap) (UTM 23L 0193496N 8274923W)

Saprolito espesso associado a manto de alteração de material pelito-carbonatado retrabalhado a partir da Formação Córrego do Barreiro do Grupo Paranoá composta por massa

de argila avermelhada, compacta, sem estrutura e com ocasionais marcas de deslizamentos (*slikensides*).

Nitossolo Vermelho distrófico (NVd) (UTM 23L 0194922N 8277675W)

Textura muito argilosa e estrutura granular predominante. Apresenta grande estruturação por todo o perfil, podzolização representada pela translocação de argilas ao longo do perfil e cerosidade incipiente, além de indícios de gradiente textural.

O substrato é representado principalmente pelos calcários da Formação Sete Lagoas do Grupo Bambuí.

Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (LVAd<sub>1</sub> e LVAd<sub>2</sub>) (UTM 23L 0193959N 8263897W)

Perfil com predominância de estrutura grumosa e granular média e textura média. É possível identificar presença decrescente de torrões com o aumento da profundidade, de grumos mais finos, de grão de quartzo e de petroplintitas abaixo do horizonte latossólico 2 e atividade biológica intensa. Os processos envolvidos neste perfil são a pedogênese e intemperismo e lixiviação intensa, possibilitadas pelo relevo local plano.

O substrato pertence ao contato das formações Ribeirão da Contagem e Córrego do Sansão e é composto predominantemente por metarritmitos.

Deste perfil foram coletadas duas porções distintas de amostra. Uma sendo mais superficial (LVAd<sub>1</sub>) e outra de profundidade maior que 70cm (LVAd<sub>2</sub>).

**3.4.1.1 Textura - Análise granulométrica- Triângulos Texturais**

De acordo com a análise granulométrica (Tabela 3.1), verifica-se que os solos que apresentam maior quantidade de grãos tamanho areia são os Latossolos e o Neossolo. Nenhum dos solos apresentapredominantemente granulometria siltosa. Como já se esperava, pelas características dos solos, Argissolo, Cambissolo, Gleissolo, Nitossolo e Plintossolo, os mesmos apresentam textura mais argilosa, assim como o saprolito que é originário de retrabalhamento de material pelito-carbonatado do Grupo Paranoá.

**Tabela 3.2- Textura dos solos estudados.**

Composição Granulométrica	LVd <sub>1</sub>	LVd <sub>2</sub>	GXd	RQo	FXc	OXd	AVe	CXd	Sap	NVd	LVAd <sub>1</sub>	LVAd <sub>2</sub>
Argila g/kg	300	275	525	250	525	375	600	625	450	650	325	350
Silte g/kg	100	100	100	75	275	200	150	175	375	125	175	200
Areia g/kg	600	625	375	675	200	425	250	200	175	225	500	450

A partir da plotagem das informações da análise granulométrica do solo, é possível classificar os solos amostrados de acordo com os seguintes grupamentos texturais:

- Cambissolo Háptico, Argissolo Vermelho e Nitossolo Vermelho - textura muito argilosa;
- Plintossolo Háptico, Gleissolo e Saprólito - textura argilosa;
- Neossolo Quartzarênico Latossolo Vermelho, Latossolo Vermelho-Amarelo e Organossolo Háptico - textura média.

Essa informação é importante, uma vez que a granulometria do solo pode influenciar quanto à porosidade intergranular e, conseqüentemente na capacidade de retenção dos componentes inorgânicos da solução infiltrada.

### 3.4.1.2 Difratomia de Raios-X

A partir da difratometria de Raios-X foi possível obter as seguintes associações mineralógicas para os solos estudados (Tabela 3.3, Tabela 3.4 e ANEXO 1).

Tabela 3.3- Mineralogia comparativa dos solos estudados (amostra total).

Amostras	Quartzo	Caolinita	Gibbsita	Goethita	Hematita	Ilita	Vermiculita	Anatásio	Diásporo
LVD <sub>1</sub>	M	Tr	Tr						
LVD <sub>2</sub>	M	Tr	Tr						
GXd	M	M	M					Tr	
RQo	M	Tr	Tr				Tr		
FXc	M	M		Tr		Tr			
OXd	M	m						Tr	
AVe	M	Tr				Tr			
CXd	M	M		Tr		m			
Sap	M	M			Tr				Tr
NVd	M	Tr							
LVAd <sub>1</sub>	M	Tr	M						
LVAd <sub>2</sub>	M	Tr	M						

Legenda:

M – Elemento Maior

m – Elemento menor

Tr – Elemento Traço

#### Latossolo Vermelho distrófico 1 (LVD<sub>1</sub>)

Neste perfil são identificados quartzo, gibbsita, caolinita, goethita, anatásio e rutilo.

Na amostra total verifica-se que os picos do quartzo se sobressaem em relação aos picos da gibbsita e caolinita, os quais aparecem como minerais traço. Os demais minerais não aparecem na amostra total.

Na fração argila, o pico do quartzo diminui de forma significativa indicando que este mineral originalmente tem uma granulometria maior que argila. Os demais minerais têm seus picos evidenciados, sendo a gibbsita o mineral predominante na fração mais fina. É possível verificar também que os picos da caolinita, da goethita e da gibbsita desaparecem na análise da lâmina aquecida uma vez que perdem sua estrutura característica em temperaturas superiores a 490°C, sobrando apenas os picos de quartzo, anatásio e rutilo. O rutilo é marcado por um pequeno pico à direita do pico do quartzo (d~3,25), indicando que este mineral ocorre em pequenas quantidades podendo ser considerado um mineral traço assim como o anatásio e o quartzo. Na fração argila, a goethita e a caolinita aparecem como elementos menores.

**Tabela 3.4- Mineralogia comparativa dos solos estudados (fração argila).**

Amostras	Quartzo	Caolinita	Gibbsita	Goethita	Hematita	Ilita	Vermiculita	Anatásio	Rutilo	Diásporo
LVd <sub>1</sub>	Tr	m	M	m				Tr	Tr	
LVd <sub>2</sub>	M	M	M		Tr			m	Tr	
GXd	m	M	M	m				Tr		
RQo	Tr	M	m	Tr		Tr	Tr			
FXc	M	M		Tr		M				
OXd	Tr	M				Tr	Tr	m		
AVe	Tr	M		Tr		M				
CXd	Tr	M		Tr		m				
Sap	M	M			m	Tr				Tr
NVd	m	M	Tr			m				
LVAd <sub>1</sub>	Tr	M	m				Tr			
LVAd <sub>2</sub>	m	M	M							

Legenda:

M-Elemento Maior

m - Elemento menor

Tr- Elemento Traço

#### Latossolo Vermelho distrófico 2 (LVd<sub>2</sub>)

Tratando-se do mesmo solo analisado anteriormente, porém em uma profundidade maior que a do perfil anterior (70 cm), identifica-se quartzo, gibbsita, caolinita, anatásio, rutilo e hematita.

Na amostra total verifica-se que o pico do quartzo também se sobressai em relação aos demais minerais, representados por pequenos picos de gibbsita e caolinita, sendo estes considerados elementos traço.

Na fração argila, o pico do quartzo diminui bastante, porém continu sendo considerado o constituinte maior da amostra, assim como a gibbsita e a caolinita, enquanto o anatásio se apresenta como mineral menor. O anatásio e o rutilo que não aparecem na amostra total, são evidenciados na fração argila, principalmente, depois de aquecidos. O rutilo e a hematita são os minerais com as menores quantidades relativas neste perfil, sendo classificados como elementos traço.

Comparando os difratogramas do LVd (mais raso e mais profundo) é possível observar as transformações mineralógicas ao longo de perfis de alteração pedogenética e isso é evidenciado pelo fato do nível mais raso apresentar goethita e no nível mais profundo, além de não apresentar goethita, possui em sua composição hematita. Pode-se dizer que a hematita, óxido de Ferro, foi transformada a partir do intemperismo sofrido, na goethita, óxido de ferro hidratado.

#### Gleissolo Háptico distrófico (GXd)

Neste perfil são identificados quartzo, gibbsita, caolinita, goethita e anatásio.

Na amostra total os picos do quartzo, da caolinita e da gibbsita se apresentam maior que dos demais minerais, enquanto o Anatásio aparece como mineral traço.

Na fração argila, a caolinita e a gibbsita são os constituintes maiores, enquanto isso, o pico do quartzo diminui bastante, passando a fazer parte dos constituintes menores juntamente com a goethita. O anatásio permanece constante em intensidade e como mineral traço, tanto na amostra total como na fração argila.

#### Neossolo Quartzarênico órtico (RQo)

Neste perfil identifica-se quartzo, gibbsita, caolinita, goethita, vermiculita e ilita.

Na amostra total verifica-se que o pico do quartzo se sobressai, porém a vermiculita, a caolinita e a gibbsita aparecem de forma quase imperceptível como elementos traço.

Na fração argila, este pico do quartzo diminui indicando que este mineral originalmente tem uma granulometria maior que argila, tornando o quartzo um constituinte traço como a goethita, a ilita e a vermiculita, enquanto na caolinita e na gibbsita ocorre o inverso, aumentando significativamente. A ilita e a vermiculita aparecem em quantidades ínfimas. O pico da goethita apresenta uma forma abaulada característica. A ilita tem seu pico intensificado quando aquecida e a vermiculita, quando glicolada indicando expansibilidade.

#### Plintossolo Háptico concrecionário (FXc)

Este solo é constituído por quartzo, caolinita e ilita, sendo a presença da goethita sugerida pela forma abaulada característica do seu pico, na amostra total.

Na amostra total os picos do quartzo e da caolinita se sobressaem. A ilita e a goethita aparecem como constituintes traço.

Na fração argila, os picos do quartzo e da caolinita permanecem mais expressivos, assim como a ilita, que tem seu pico intensificado, se apresentando também como elemento maior. A goethita aparece de forma quase imperceptível

#### Organossolo Háptico distrófico (OXfi)

Este solo é constituído pelos minerais: caolinita, quartzo, anatásio, vermiculita e ilita.

Na amostra total verifica-se que o quartzo se sobressai. A caolinita aparece como elemento menor e o anatásio, como traço.

Na fração argila, a caolinita é praticamente oconstituente único, enquanto a ilita, o quartzo e a vermiculita ocorrem apenas como constituintes traço. O anatásio se apresenta como um elemento menor, porém se destaca na amostra aquecida, ao lado do quartzo.

#### Argissolo Vermelho eutrófico (AVe)

Neste solo são identificados: quartzo, caolinita, goethita e ilita.

A amostra total mostra o quartzo como constituinte maior, além de pequenas quantidades de ilita e caolinita.

Na fração argila, o pico do quartzo quase desaparece, enquanto se destacam as reflexões da ilita e da caolinita, sendo esses constituintes maiores. Assim como o quartzo, a goethita surge como traço.

#### Cambissolo Háptico distrófico (CXd)

Este solo é constituído por ilita, quartzo, goethita e caolinita.

Na amostra total o quartzo e a caolinita são predominantes. A ilita mostra-se como elemento menor, enquanto a goethita, como traço.

Na fração argila, este solo se mostra essencialmente caolínico, ocorrendo ainda a ilita como constituinte menor, além do quartzo e da goethita que se apresentam como constituintes traço.

#### Saprolito (Sap)

Neste perfil verifica-se quartzo, caolinita, ilita, diásporo e hematita.

Na amostra total os constituintes maiores são a caolinita e o quartzo. O diásporo e a hematita aparecem como constituintes traço.

Na fração argila, a intensidade dos picos de quartzo e caolinita indica que estes são os elementos maiores. A hematita mantém sua intensidade em relação à amostra total, e pode ser considerada um constituinte menor. O pico da ilita aparece apenas nesta fração na mesma proporção da hematita, e seu pico se intensifica na amostra aquecida.

#### Nitossolo Vermelho distrófico (NVd)

Neste perfil identificam-se quartzo, caolinita, gibbsita e ilita.

Na amostra total o pico mais intenso é o do quartzo, entretanto com menor intensidade que na maioria dos difratogramas e o pico da caolinita é de baixíssima intensidade.

Na fração argila, a caolinita é constituinte maior e a illita e o quartzo são os constituintes menores, enquanto a gibbsita aparece de forma bastante tímida. O pico da illita se intensifica na amostra aquecida e o da caolinita desaparece.

#### Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico 1 (LVAd<sub>1</sub>)

Neste perfil pode-se identificar quartzo, gibbsita, caolinita e vermiculita.

Na amostra total os constituintes maiores são a gibbsita e o quartzo e a caolinita é constituinte traço.

Na fração argila, o pico do quartzo diminui drasticamente indicando que existe muito pouco quartzo nesta granulometria. A gibbsita também tem seu pico reduzido, enquanto há um aumento significativo na intensidade da caolinita. A pequena quantidade de vermiculita aparece apenas nesta fração, sendo que seu pico é levemente intensificado na amostra glicolada e acaba desaparecendo na aquecida. A caolinita é o constituinte maior, a gibbsita o menor e quartzo e vermiculita os elementos traço.

#### Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico 2 (LVAd<sub>2</sub>)

Em uma profundidade maior o Latossolo vermelho-amarelo distrófico é constituído por quartzo, gibbsita e caolinita.

Na amostra total a gibbsita e o quartzo são os constituintes maiores, sendo a caolinita um constituinte traço.

Na fração argila, o pico do quartzo diminui e o de gibbsita permanece com a mesma intensidade. A caolinita é o constituinte maior ao lado da gibbsita, enquanto o quartzo é menor.

#### **3.4.1.3 Fluorescência de Raios-X**

A fluorescência de raios-x determina quantitativamente as proporções de óxidos contidos nas amostras analisadas. Nestes foram analisados óxidos de Silício, Alumínio, Magnésio, Ferro, Cálcio, Sódio, Potássio, Titânio, Fósforo, Manganês, Rubídio e Estrôncio (Tabela 3.5). Foi calculada também a perda ao fogo de cada amostra, que mostra quanta umidade, hidratação mineral e matéria orgânica foram perdidas.

A partir da tabela mencionada, é possível verificar que os solos mais silicosos são o LVd e o RQo. Entretanto, o LVAd apresenta o menor percentual de SiO<sub>2</sub> e, surpreendentemente, grande porcentagem de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, bem maior que a porcentagem do LVd onde era esperado que haveria maior teor de ferro uma vez que sua coloração é vermelha. Juntamente com o LVAd, os solos mais ferrosos são o CXd e o NVd. Já os solos com menores teores de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> são o GXd e o OXfi. Em relação ao Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> os solos que se sobressaem em relação ao maior teor são GXd e LVAd, e em relação ao menor teor, RQo e LVd.

Quanto aos constituintes que apresentam menores teores em relação à composição total de cada solo, o AVe apresenta as maiores porcentagens de MgO, CaO, K<sub>2</sub>O, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e MnO, corroborando seu eutrofismo.

**Tabela 3.5-** Fluorescência de raios-X. / PF - perda ao fogo resultados em %.

Solos	SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	MgO (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	CaO (%)	Na <sub>2</sub> O (%)	K <sub>2</sub> O (%)	TiO <sub>2</sub> (%)	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	MnO (%)	Rb <sub>2</sub> O (%)	SrO (%)	P.F. (1000°C)	Total (%)
LVd <sub>1</sub>	74,9	12,8	0,067	4,5	0,011	<L.Q.	0,183	0,748	0,024	<L.Q.	0,167	<L.Q.	6,56	100
LVd <sub>2</sub>	79,4	12,7	0,068	5,0	0,016	<L.Q.	0,188	0,728	0,029	<L.Q.	0,265	<L.Q.	1,68	100
GXd	49,0	32,4	<L.Q.	1,5	0,011	0,019	0,040	1,855	0,022	0,006	0,238	<L.Q.	14,89	100
RQo	81,1	8,8	0,057	4,3	0,017	<L.Q.	0,320	0,539	0,038	<L.Q.	0,226	0,002	4,54	100
FXc	49,6	15,7	0,573	8,7	0,022	0,044	2,246	0,802	0,066	0,020	0,193	0,009	22,10	100
OXfi	55,4	22,8	0,069	1,4	0,063	<L.Q.	0,066	1,596	0,053	0,009	<L.Q.	<L.Q.	18,45	100
AVe	56,0	19,6	1,551	8,7	0,318	0,048	3,687	0,933	0,205	0,251	0,203	0,004	8,56	100
CXd	49,3	23,4	0,798	13,0	0,033	0,049	2,440	1,127	0,039	0,018	0,227	<L.Q.	9,56	100
Sap	50,8	25,9	0,396	10,1	0,054	0,043	1,320	1,281	0,065	0,055	0,219	0,005	9,72	100
NVd	46,2	22,8	0,606	16,2	0,124	0,026	1,483	1,223	0,125	0,064	0,183	0,006	11,06	100
LVAd <sub>1</sub>	34,8	31,3	<L.Q.	13,3	0,014	<L.Q.	0,047	2,026	0,065	0,011	0,138	<L.Q.	18,35	100
LVAd <sub>2</sub>	31,9	33,6	0,016	13,6	0,040	0,010	0,042	2,151	0,055	0,011	0,109	0,002	18,40	100

#### 3.4.1.4 pH e ΔpH do Solo

O pH do solo mede a acidez e alcalinidade do solo, sendo uma informação importante como indicador de fertilidade dos solos. Já o ΔpH, relaciona-se com o balanço de cargas elétricas no solo e sua capacidade de troca catiônica (CTC) e aniônica (CTA) (Parfitt 1980).

A maioria dos solos da região Centro-Oeste tem uma tendência a ser mais ácida (por exemplo, Latossolos), porém na Tabela 3.6. Pode-se perceber que alguns dos solos apresentam pH maior que o esperado. Entretanto, entende-se que esses resultados diferentes não influenciam de forma excludente este experimento, uma vez que são analisadas diversas variáveis e que a ideia do mesmo é trabalhar com situações adversas, como por exemplo num desastre ambiental. Praticamente todos os solos apresentam valores de pH entre 5 e 7, com exceção do Organossolo que é mais ácido, uma vez que é basicamente formado por matéria orgânica (ácido húmico).

Quanto ao ΔpH dos solos é possível identificar a predominância de cargas nos mesmos, inclusive o ponto de carga zero, onde há o equilíbrio de cargas positivas e negativas. A fração argila dos solos tem uma tendência a apresentar cargas negativas influenciadas pela matéria orgânica e pelos minerais de argila, e cargas positivas por causa dos óxidos de ferro. Quando ΔpH < 0 predominam cargas negativas, ΔpH > 0 predominam cargas positivas e ΔpH = 0 quer dizer que há equilíbrio de cargas positivas e negativas. A predominância de cargas negativas propicia a CTC e de cargas positivas a CTA. O cloreto tem maior tendência de ficar retidos no caso de predominarem as cargas positivas e a retenção de sódio, no caso de cargas negativas.

Praticamente todos os solos evidenciam uma predominância de cargas negativas, o que indica uma preferência de retenção dos cátions. Apenas o Latossolo Vermelho-Amarelo apresenta valores próximos do PCZ, ou seja, equilíbrio entre cargas positivas e negativas. Isso pode ser visto pelo fato de apresentarem valores inferiores a 10,11, ademais, a porção superficial deste solo apresentou  $\Delta\text{pH} < 0$  e a mais profunda,  $\Delta\text{pH} > 0$  (Figura 3.12).

Tabela 3.6 - Resultados de pH e  $\Delta\text{pH}$  dos solos estudados.

Solos	LVd <sub>1</sub>	LVd <sub>2</sub>	GXd	RQo	FXc	OXfi	AVe	CXd	Sap	NVd	LVA <sub>d1</sub>	LVA <sub>d2</sub>
pH do solo	6,62	6,08	5,98	6,82	5,25	4,83	7,63	5,55	6,27	7,03	5,78	6,93
pH do KCl	5,72	7,02	4,37	5,02	4,15	6,33	5,53	5,02	4,32	5,58	5,83	4,65
$\Delta\text{pH} = \text{pH KCl} - \text{pH H}_2\text{O}$	-2,25	-1,06	-0,96	-1,23	-1,10	-0,51	-1,30	-0,90	-0,43	-1,50	-0,06	0,08

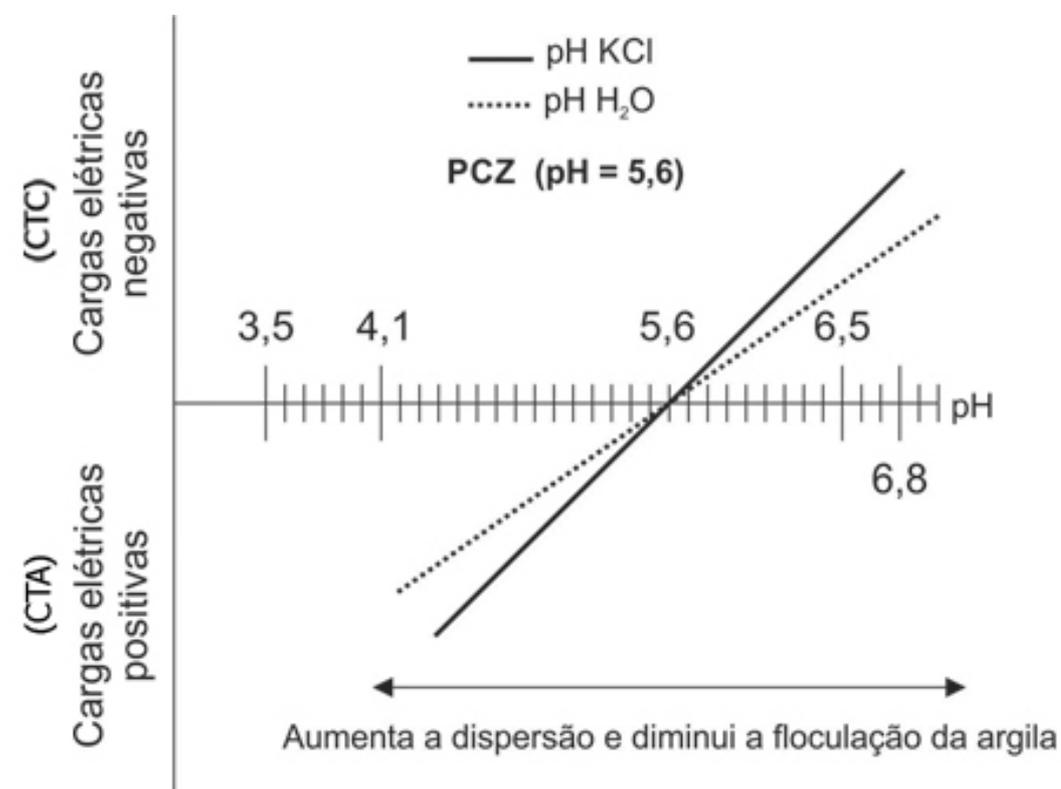


Figura 3.12- Balanço de cargas elétricas dos solos (Fonte: <http://www.pedologiafacil.com.br/enquetes/enq59.php>).

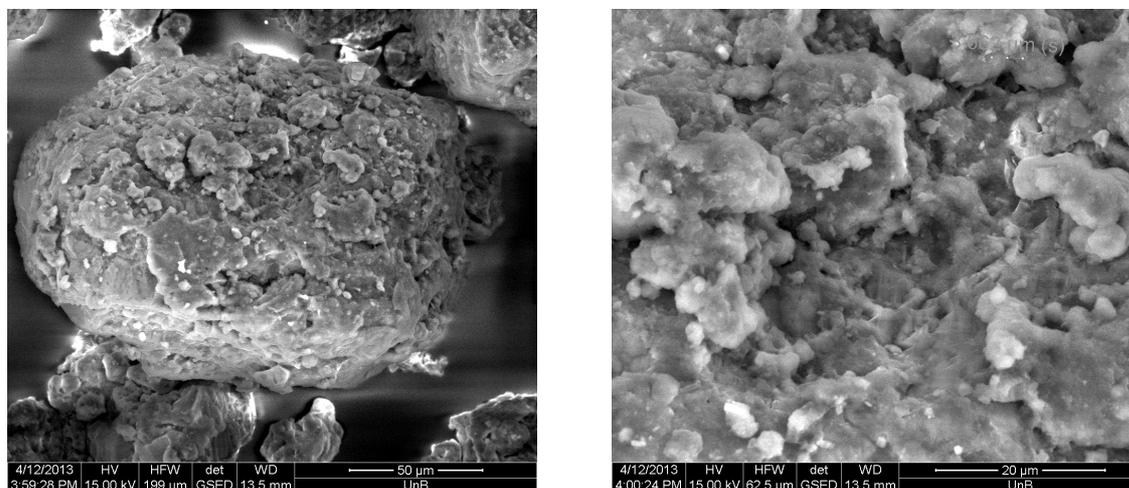
#### 3.4.1.5 Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV

Os formatos dos agregados dos solos coletados foram analisados e fotografados por Microscópio Eletrônico de Varredura com o intuito de avaliar a micro e macroporosidade nas estruturas de cada solo (antes dos ensaios de lixiviação). Como no Neossolo Quartzarênico não se esperava formação de estruturas, este solo foi excluído desta análise.

Visando a discussão relacionada à influência da porosidade na retenção e vazão específica, ou seja, na capacidade de retenção dos íons presentes na solução infiltrada, foram selecionadas algumas fotos exemplificativas. Para tanto, é necessário esclarecer o que seria micro e macroporosidade.

A microporosidade pode estar ligada tanto à porosidade entre grãos muito finos (argila) como à porosidade intragranular, ou seja, dentro da estrutura do solo. Neste item, a microporosidade discutida será relacionada à porosidade intragranular. Já a macroporosidade pode estar associada tanto à porosidade entre grãos maiores (cascalho, areia, pedregosidade) como à porosidade intergranular, que não é o foco desta análise. Um solo como o Neossolo Quartzarênico tende a ter uma maior macroporosidade se relacionado ao Argissolo, uma vez que este último tem em média uma textura mais fina, ou seja, sua capacidade de retenção e impermeabilização tende a ser maior do que a do Neossolo. Neste caso, o Neossolo teria uma maior vazão específica, enquanto o Argissolo teria uma maior percentagem de retenção específica.

A partir das imagens de MEV é possível verificar agregados granulares extremamente pequenos (menores que 1 mm) como um todo (Figura 3.13 [a]), inclusive poros intragranulares na ordem de micrômetros ( $\mu\text{m}$ ) e a presença de minerais com aspectos placosos que são interpretados como argilominerais (Figura 3.13[b]). Esses poros intragranulares e, de maneira mais geral, a fração fina (apresentando alta superfície específica) são importantes, pois participam ativamente na retenção de água nos solos por adsorção e, assim, podem participar da retenção de fluídos como possíveis cargas contaminantes.

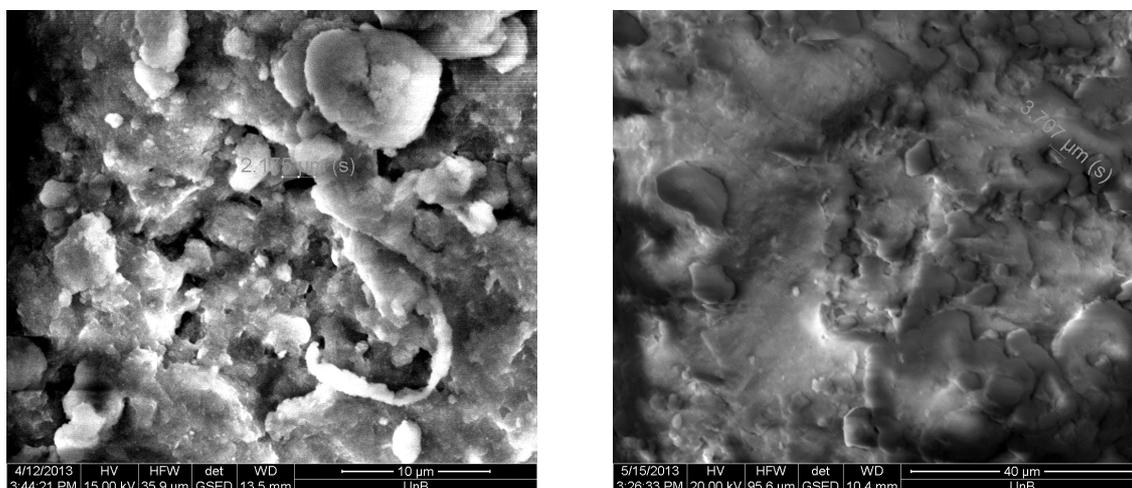


**Figura 3.13 - [a] Vista geral de agregado granular no Latossolo Vermelho distrófico 1. [b] Microporosidade + argilominerais no Latossolo Vermelho distrófico 1.**

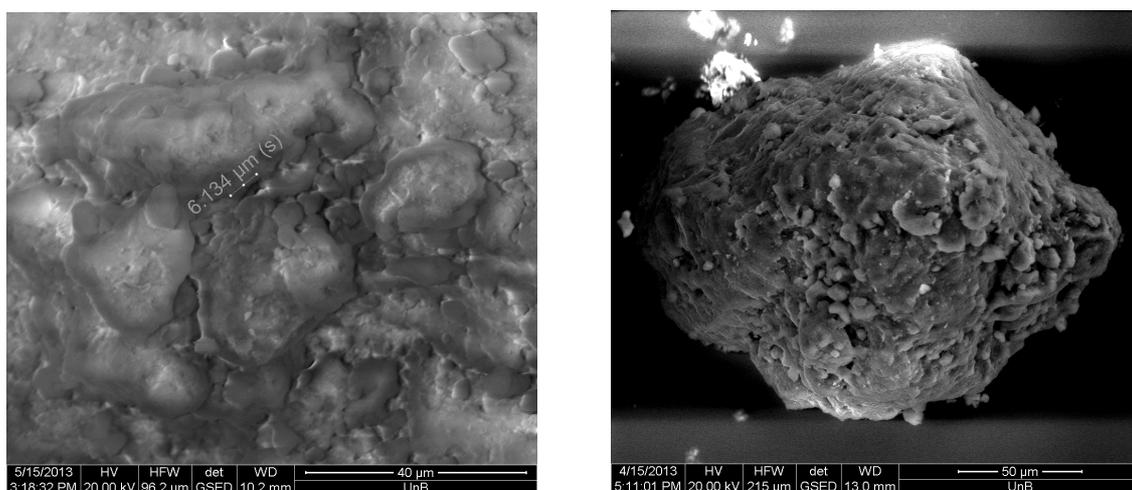
A microporosidade interna, ou seja, porosidade intragranular, indica que este solo possui um maior potencial para retenção de cargas da solução infiltrada por tensão superficial (Figura 3.14[a]). Em contraposição, dentre os solos amostrados o Latossolo Vermelho apresenta a superfície da estrutura granular com estrutura fechada, mostrando restrita microporosidade (Figura 3.14[b]). Isso sugere que essas estruturas podem ter porosidade intragranular, porém com

menor acessibilidade para as soluções do solo. Por consequência, essas estruturas apresentam potencialmente menor capacidade de retenção.

Além de grânulos agregados, observa-se também, cristais agregados (neoformados) na porção externa de algumas estruturas granulares (Figura 3.15[a]). Como exemplo de macroporosidade ou porosidade intergranular pode-se considerar a Figura 3.15[b] que mostra claramente que grânulos individuais se agregam mantendo um aspecto cavernoso entre eles, evidenciando, assim, uma porosidade entre grãos (intergranular). Esses espaços entre grãos e entre estruturas aumentam a macroporosidade, portanto aumentam a capacidade de infiltração das soluções do solo, com potencial de diminuição da capacidade de retenção de cargas da solução infiltrada. Entretanto, ainda podem haver outros mecanismos de retenção superficial por compatibilidade de cargas ou por processos de adsorção, absorção e trocas catiônicas (estas menos prováveis).



**Figura 3.14- [a] Microporosidade interna ao agregado no Latossolo Vermelho distrófico 1. [b] Superfície de grânulo com estrutura fechada e cristais lamelares aderidos na porção externa do mesmo, Latossolo Vermelho distrófico 2.**



**Figura 3.15 - Cristais agregados na porção externa de agregado granular no Latossolo Vermelho distrófico 2. [b] Macroporosidade associada a espaço intergranular no Cambissolo Háplico distrófico.**

### 3.4.2 Percolados

Neste tópico são discutidos resultados das análises químicas realizadas nas amostras de percolados, coletadas periodicamente na saída das colunas, por um período de 147 dias. Além, dos resultados obtidos e que são apresentados nos próximos itens, é importante mostrar que independente do tipo de solução infiltrante utilizada, os solos têm momentos iniciais diferentes de gotejamento.

É possível verificar na Tabela 3.7 que o intervalo de início de gotejamento da solução lixiviada, em alguns casos, chegou a uma diferença de 1 (um) mês. Possivelmente, esta diferença se dá pelos espaços vazios ocasionados pela macroporosidade, que pode ser oriunda das estruturas dos solos, da pedregosidade e rochiosidade existentes em alguns tipos de solos, da bioturbação e de fendas relacionadas à contração de argilas.

**Tabela 3.7 - Data de início de gotejamento de solução de lixiviado de cada coluna de solo.**

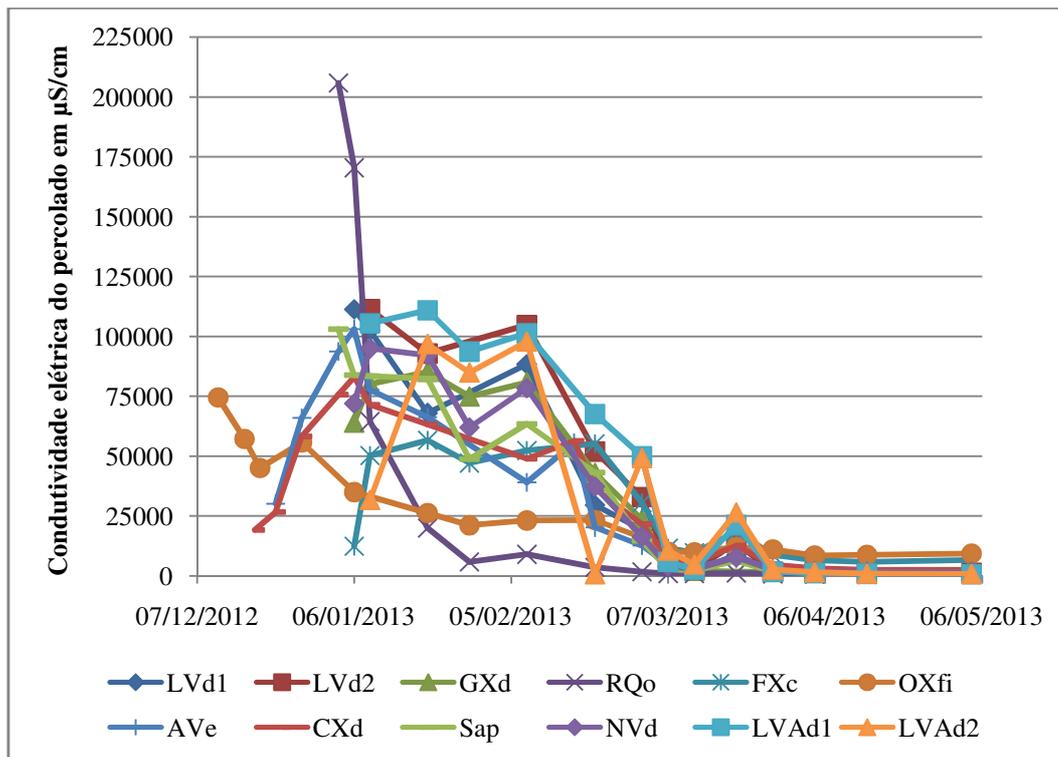
LVd <sub>1</sub>	LVd <sub>2</sub>	GXd	RQo	FXc	OXfi	AVe	CXd	Sap	NVd	LVAd <sub>1</sub>	LVAd <sub>2</sub>
06/01/13	09/01/13	06/01/13	03/01/13	06/01/13	11/12/12	22/12/12	18/12/12	03/01/13	06/01/13	09/01/13	09/01/13

#### 3.4.2.1 Condutividade Elétrica (C.E.)

A medição da condutividade ocorreu em temperatura ambiente em todas as amostras de percolado coletadas.

Os solos representados no gráfico da Figura 3.16 demonstram uma grande convergência em relação ao comportamento das curvas que formam um platô entre janeiro e fevereiro/2013, com exceção do Neossolo Quartzarênico órtico (RQo) que, além de ser decrescente com diminuição abrupta de C.E., alcança a linha de base após apenas 51 dias do início do experimento.

As curvas do decaimento da condutividade elétrica dos solos estudados podem ser divididas em pelo menos 2 (dois) grupos, um em que os valores iniciais e máximos de condutividade são o mesmo ponto (Tabela 3.8) e outro em que esses pontos são distintos (Tabela 3.9).



**Figura 3.16- Resultados de condutividade elétrica dos percolados de solos.**

**Tabela 3.8 - Grupo 1 µS/cm.**

Solos	LVd <sub>1</sub>	LVd <sub>2</sub>	RQo	OXfi	Sap
<b>Inicial</b>	111.250	111.333	205.800	74.466,7	103.000
<b>Final</b>	1.472	1.275	685	9.340	1.407

**Tabela 3.9 - Grupo 2 µS/cm.**

Solos	GXd	FXc	AVe	CXd	NVd	LVAd <sub>1</sub>	LVAd <sub>2</sub>
<b>Inicial</b>	64.000	12.345	30.030	19.120	72.000	105.400	31.700
<b>Final</b>	1.140	6.630	1.693	2.480	1.513	648	709
<b>Valor Máximo</b>	85.100	56.600	102.950	83.000	94.950	110.900	97.800

Dentre os percolados dos solos analisados por C.E., o OXfi é o solo que melhor retém íons da solução infiltrada, sua curva inicia decrescente, atinge um patamar mais homogêneo de valores que dura 32 dias, indicando que os íons presentes na solução infiltrada estão sendo lixiviados de forma gradual e suave, e após decrescer mais um pouco, os valores de C.E. atingem uma linha de base paralela ao *background*, apontando que ainda existem íons a serem lixiviados de forma gradual (parte dos íons que ficaram retidos no início da percolação). Ao passo que o RQo é o solo que exibe a pior capacidade de retenção dos íons, uma vez que tem valor inicial maior que o dobro dos valores máximos dos demais solos. Esse comportamento do RQo já era esperado, considerando que este solo não possui estruturação, a granulometria é mais grossa, a composição mineralógica é dominada por quartzo e sua composição química é pouco reativa.

Vale ressaltar que os demais solos apresentaram um platô no mesmo período, pelo período de aproximadamente 1 mês, com valores de condutividade compreendidos entre 39.000 e 110.900  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Sendo que no mês de março todos alcançaram a linha de base com valores inferiores a 9.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  com exceção de 20/03/2013 que apresentou um pequeno pico nestes solos.

### 3.4.2.2 Emissão Atômica (Na)

A Figura 3.17 apresenta os resultados de concentrações de sódio em percolados de solos.

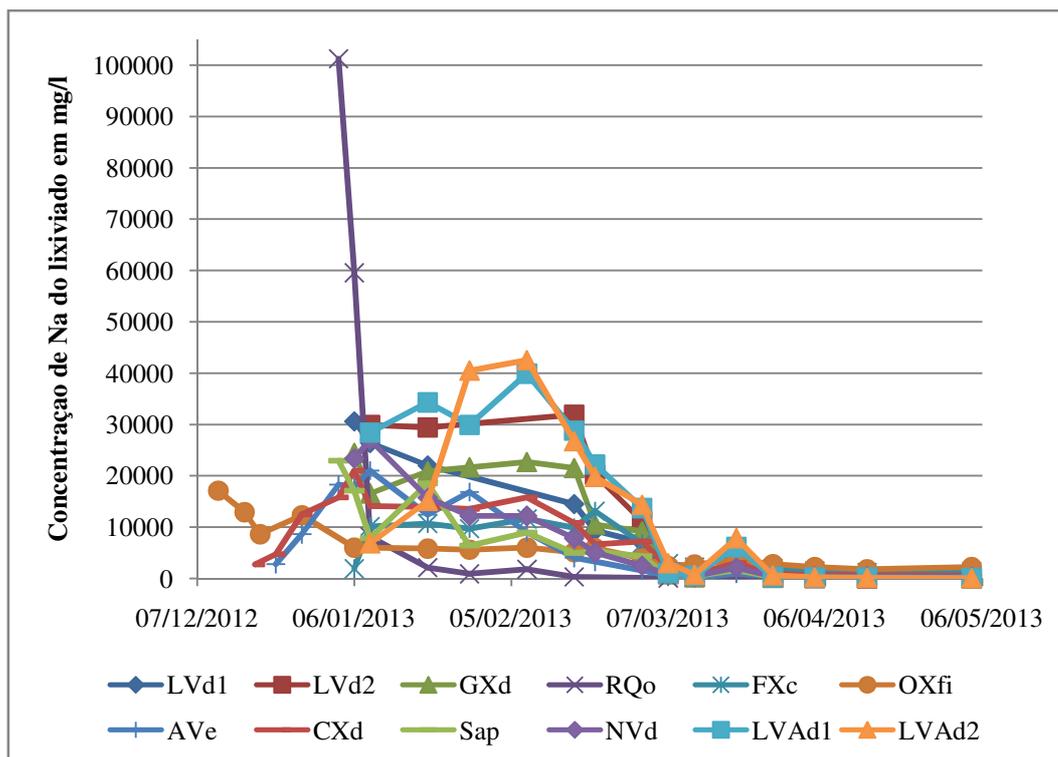


Figura 3.17 - Resultados de absorção atômica para Sódio dos percolados de solos.

Assim como nos resultados de condutividade elétrica, os resultados das concentrações de sódio foram divididas em 2 (dois) grupos, um em que os valores iniciais e máximos de condutividade são coincidentes (Tabela 3.10) e outro em que esses pontos são distintos (Tabela 3.11).

#### Grupo 1

Solos	LVd <sub>1</sub>	GXd	RQo	OXfi	Sap
<b>Inicial</b>	30.600	24.400	101.250	17.100	22.950
<b>Final</b>	91	60	16	2.200	282

## Grupo 2

Solos	LVd <sub>2</sub>	FXc	AVe	CXd	NVd	LVAd <sub>1</sub>	LVAd <sub>2</sub>
Inicial	29.900	1.900	2.800	2.700	23.400	28.400	6.800
Final	14	1.350	297,5	540	308	92,5	75
Valor Máximo	31.900	13.100	21.000	21.000	27.000	39.900	42.550

Alguns destes solos têm um acréscimo significativo inicial e posterior decréscimo, outros iniciam com uma sequência de concentrações semelhantes na curva e posterior decréscimo e, por último, o OXfi e o RQo mostram uma queda decrescente desde o início sendo a primeira mais suave e a segunda mais abrupta.

De forma geral, as análises de sódio se mostraram bastantesemelhantes às curvas formadas pelos dados de condutividade elétrica. Evidenciam também a formação do platô e da linha de base ao final.

O RQo tem o mesmo padrão decrescente abrupto, alcançando a linha de base, com valores de concentração de sódio se mantendo inferiores a 2.000 mg/l, em apenas 19 dias da primeira coleta. As concentrações de sódio nas amostras de percolados no RQo, além de apresentarem o maior valor máximo de concentração de todos os solos estudados, mostrou uma queda extremamente significativa e rápida desde a primeira coleta até a terceira, em um prazo inferior a uma semana, variando de 101.250 a 8.150 mg/l. Solos como o RQo que não apresentam características com grande capacidade de aumentar a CTC ou CTA têm poucas chances de serem bons retentores.

NoOXfias concentrações em Na apresentam decréscimo suave, tendendo a uma linha de base praticamente do início ao fim. As colunas de OXfie FXcse mostraram como os melhores retentores de sódio uma vez que todos as suas concentrações registradas foram inferiores a 17.100 mg/l, mesmo que as concentrações de base do OXfi tenham um valor aproximado de 2.000 mg/l.

Apesar do NVdter um acréscimo de concentração de sódio pouco representativo entre a primeira e a segunda coleta, a curva deste solo apresentou uma tendência mais uniforme de decréscimo se comparado com as outras curvas analisadas neste tópico. Tanto a coluna de lixiviação doNVdquanto a do Sap, foram melhoresretentoras de sódio do que dos demais em solução, como pode ser visualizado no gráfico de condutividade elétrica.

As curvas de percolados referentes ao LVd apresentam, predominantemente, um decréscimo, sendo que a da coluna de LVd<sub>2</sub> apresenta inicialmente um pequeno acréscimo e posteriormente um padrão mais abrupto de decaimento de concentração e, assim como nos dados de condutividade, no caso do LVd a parte mais superficial retém melhor o sódio do que a parte mais profunda.

No caso do LVAd ocorre o contrário, onde primeiramente há um acréscimo na curva. A curva do LVAd<sub>2</sub> tem um comportamento distinto dos demais resultados das colunas de lixiviação, pois os maiores valores encontrados não formam um platô bastante evidente por ter

apenas 2 pontos. Ademais, o LVAd se apresentou, de forma geral, como o segundo pior solo para retenção de íons de sódio, só não sendo pior do que o RQo.

A partir de 07/03/2013 todos os solos tenderam a certa estabilização (linha de base), com exceção do dia 20/03/2013 que, novamente, apresentou um pequeno acréscimo na linha de base .

### 3.4.2.3 Cromatografia Iônica (CI)

Os resultados do ânion cloreto estão apresentados na Figura 3.18. Vale informar que alguns resultados foram perdidos e, por isso, pode haver alguma variação na forma da curva.

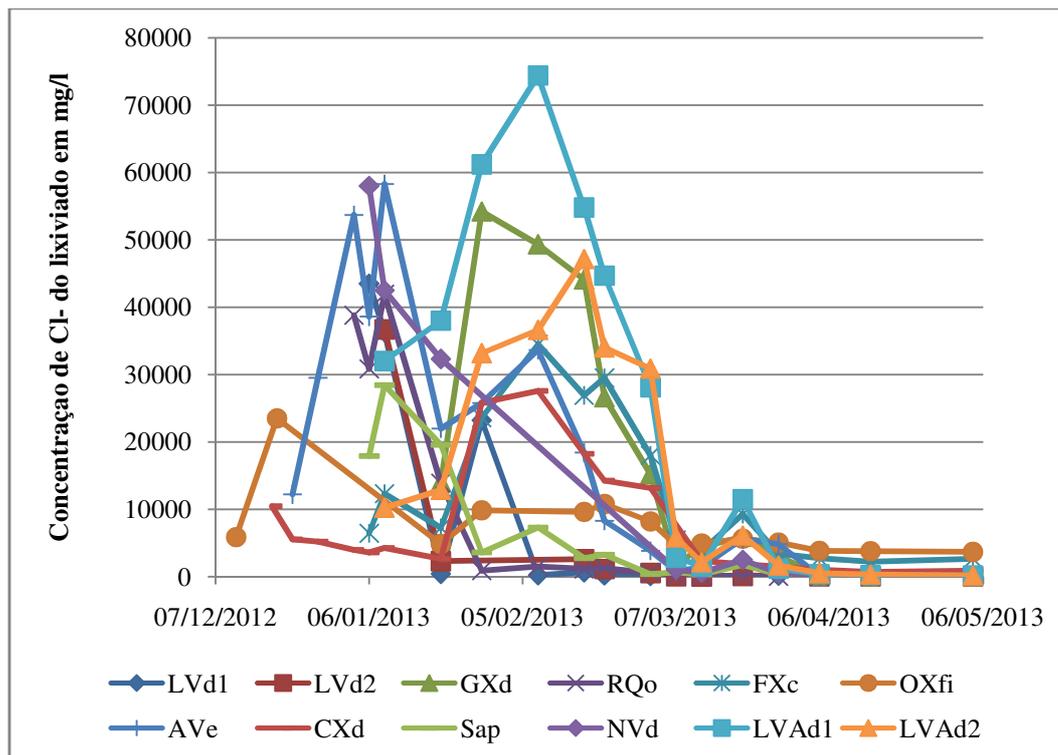


Figura 3.18 - Resultados de cromatografia iônica para Cloreto dos percolados de solos.

No AVe, os resultados mostram uma variação de acréscimos e decréscimos inicialmente abruptos e um comportamento predominantemente decrescente a partir de 08/02/2013. As colunas de GXd e de LVAd apresentaram um crescimento bastante abrupto e posterior decréscimo também abrupto, principalmente no caso do LVAd<sub>1</sub> onde o ângulo da curva foi praticamente vertical. Enquanto no LVAd<sub>1</sub> o decaimento começou no início de fevereiro, no GXd o decréscimo ocorreu no final de janeiro sendo inicialmente mais suave e intensificando sua queda em seguida.

No caso do NVd, apesar da ausência de alguns dados na porção central da curva, pode-se perceber que desde o início há uma tendência decrescente. Todos os solos representados na Figura 3.18 mostraram propensão ao equilíbrio a partir de 07/03/2013, com valores bem menores que os picos iniciais registrados. Com exceção de 20/03/2013 que apresenta um leve aumento recorrente em diversos métodos e solos.

Dentro dos resultados apresentados, a coluna superior do LVAd<sub>1</sub> representa o solo com menor capacidade de retenção de cloreto de todos os solos analisados, seguido neste grupo por AVe, GXd e NVd.

OLVd mais profundo (LVd<sub>2</sub>) e o RQo mostram comportamento semelhante, sendo as concentrações de Cl<sup>-</sup> dos percolados decrescentes e abruptas, logo no fim de janeiro com tendência a estabilização com valores aproximadamente 15 a 47 vezes menores que as maiores concentrações registradas, respectivamente. O LVd<sub>1</sub>, no primeiro mês, mostrou valores de concentração mais altos com decréscimo abrupto em meados de fevereiro e estabilização de concentrações baixas a partir de 21/02/2013. ORQo e o LVd<sub>2</sub> tem um decréscimo até a linha de base bem mais suave que o LVd<sub>1</sub>.

OCXd e o FXc apresentam desempenho parecido, com algumas concentrações iniciais mais baixas, seguido por acréscimo abrupto e logo um decaimento também abrupto, tendendo ao equilíbrio das concentrações no mês de março.

Com exceção da primeira coleta dos percolados do Sap, o comportamento da curva é predominantemente decrescente e, a partir do início de março, a estabilização das concentrações ocorre com os menores valores de concentrações encontradas, assim como o LVd<sub>2</sub> e o RQo.

Já a curva das concentrações de Cl<sup>-</sup> do OXfi não mostra um padrão específico, uma vez que intercala concentrações variáveis. Entretanto, a partir de 20/01/2013 a amplitude não varia tanto se comparada à amplitude entre picos maiores e menores do FXc e CXd. Assim como vários solos em diferentes métodos, a partir de março a curva do OXfi aproximou-se de um equilíbrio de concentrações, com um ligeiro aumento de concentração em 20/03/2013, assim como Sap e FXc.

A retenção de ânions é atribuída a questões elétricas dos solos, ou seja, a cargas positivas presentes na superfície de certos minerais neoformados como gibbissita e hematita, muito presentes em solos tropicais, que, por neutralização, fixa os ânions dispersos na solução.

## 4 DISCUSSÕES

### 4.1 Avaliação dos Solos Estudados Quanto à Capacidade de Retenção

Com o propósito de discutir os resultados obtidos e assim hierarquizar os solos quanto a sua capacidade de retenção é importante ponderar as características que auxiliam na retenção dos íons de cada solo estudado de forma individualizada.

De acordo com os resultados, focar em apenas uma variável, como por exemplo a estruturação do solo, é uma tarefa muito complexa, considerando que as amplas variações de comportamento dos íons observadas nos diferentes solos, sugerem que cada íon se comporta de forma diferente em cada solo estudado. Além disso, é possível identificar que uma série de características (mineralogia, matéria orgânica, pH, entre outros) influencia em graus variáveis de acordo com a complexidade do meio e em função das diferentes interações de cada íon com o meio.

Desta forma, decidiu-se por discutir de forma integrada o comportamento da solução infiltrada e seus íons dentro de cada solo, tentando reconhecer qual ou quais variáveis poderiam influenciar naquele resultado.

Os solos e suas respectivas características físicas, químicas e mineralógicas podem ser visualizados de forma agrupada na Tabela 4.1. Vale ressaltar que a linha da tabela que trata separadamente a matéria orgânica, está relacionada tanto à perda ao fogo de forma parcial como, principalmente, a avaliação visual quando da coleta dos solos.

**Tabela 4.1- Compilação de solos e suas respectivas características.**

Solos		LVd <sub>1</sub>	LVd <sub>2</sub>	GXd	RQo	FXc	OXfi	AVe	CXd	Sap	NVd	LVAd <sub>1</sub>	LVAd <sub>2</sub>
Textura (%)	Areia	60,0	62,5	37,5	67,5	20,0	42,5	25,0	20,0	17,5	22,5	50,0	45,0
	Silte	10,0	10,0	10,0	7,5	27,5	20,0	15,0	17,5	37,5	12,5	17,5	20,0
	Argila	30,0	27,5	52,5	25,0	52,5	37,5	60,0	62,5	45,0	65,0	32,5	35,0
Minerais de argila	1:1	sim	sim	sim	sim	sim	sim	sim	sim	sim	sim	sim	sim
	2:1 (ilita)				sim								
	Expansíveis				sim		sim					sim	
	Gibbsita	sim	sim	sim	sim						sim	sim	sim
Sólidos de Fe amorfo											sim	sim	sim
Matéria Orgânica				sim			sim						
Composição química - óxidos (%)	Si	74,86	79,38	49,02	81,11	49,57	55,42	56,03	49,31	50,81	46,16	34,77	31,92
	Al	12,84	12,67	32,40	8,83	15,70	22,84	19,55	23,42	25,93	22,79	31,31	33,62
	Fe	4,54	4,98	1,50	4,32	8,66	1,44	8,66	12,98	10,10	16,15	13,26	13,63
	Mg	0,07	0,07	0,00	0,06	0,57	0,07	1,55	0,80	0,40	0,61	0,00	0,02
	K	0,18	0,19	0,04	0,32	2,25	0,07	3,69	2,44	1,32	1,48	0,05	0,04
	Ti	0,75	0,73	1,86	0,54	0,80	1,60	0,93	1,13	1,28	1,22	2,03	2,15
	Mn	0,00	0,00	0,01	0,00	0,02	0,01	0,25	0,02	0,06	0,06	0,01	0,01
P.F. (água, M.O., argila) (%)		6,56	1,68	14,89	4,54	22,10	18,45	8,56	9,56	9,72	11,06	18,35	18,40
ΔpH		-2,25	-1,07	-0,97	-1,23	-1,10	-0,52	-1,30	-0,90	-0,43	-1,50	-0,07	0,08
pH do solo		6,62	6,08	5,98	6,82	5,25	4,83	7,63	5,55	6,27	7,03	5,78	6,93

### Latossolo Vermelho distrófico 1 (LVd<sub>1</sub>)

A coluna LVd<sub>1</sub> representa a parte superficial (primeiros 70 cm) do LVd o qual apresenta textura média, lhe conferindo uma área superficial específica menor e, conseqüentemente, uma menor capacidade de troca iônica. Os minerais expansíveis estão ausentes, assim como outros argilominerais com estrutura 2:1 e os sólidos de Fe amorfo. Como esta porção é mais superficial sabe-se que o teor de matéria orgânica apesar de não ser muito elevado, pode influenciar na capacidade de troca iônica. Sua composição é basicamente silicosa, com teores próximos a 75% de SiO<sub>2</sub> e teores de óxidos de Al e Fe mediano (12,84%) e baixo (4,54%), respectivamente. A perda ao fogo/teor de matéria orgânica é a menor registrada. O pH deste Latossolo mostra-se mais próximo do pH neutro, já o ΔpH deste solo é o menor observado (-2,25), o que indica uma tendência deste solo em possuir mais cargas negativas disponíveis e, conseqüentemente, uma boa capacidade de troca catiônica (CTC).

Em relação à capacidade de retenção das soluções inorgânicas infiltradas analisadas, Cl<sup>-</sup> e Na<sup>+</sup>, em geral, a capacidade de retenção é baixa. Dentre as características deste solo o ΔpH bastante negativo é o que possibilita alguma retenção de cátion a partir da CTC originária do balanço das cargas elétricas do solo. Já para a retenção de ânions, a presença de gibbsita apresentando carga positiva possibilita esta adsorção (Kokovich & Ribeiro Junior 2008).

### Latossolo Vermelho distrófico 2 (LVd<sub>2</sub>)

A coluna LVd<sub>2</sub> é a parte mais profunda (entre 70 e 140 cm) do LVd e também possui textura média, ou seja, apresenta uma menor capacidade de troca iônica comparado a solos mais argilosos. Sua composição é basicamente silicosa, com teores próximos a 80% de SiO<sub>2</sub> e teores de óxidos de Al e Fe mediano (12,67%) e baixo (4,98%), respectivamente, característica similar à observada na seção superior do perfil. A perda ao fogo/teor de matéria orgânica é uma das menores registrada e, comparativamente com a porção superficial, possui menor teor como esperado por sua profundidade. Ausência de minerais 2:1, inclusive expansíveis, e sólidos de Fe amorfo. O pH deste solo mostra-se um pouco mais alto do que o esperado para Latossolos (pH ~ 6), já o ΔpH deste solo também é negativo, indicando carga negativa, entretanto, capacidade essa menor que a da porção mais superficial deste solo.

Em relação à capacidade de retenção da solução infiltrada analisada LVd<sub>2</sub> não demonstra boa retenção, inclusive retém menos que a seção superior. Essa variação de retenção de cátions entre os níveis mais superficial e profundo pode ser explicada pela diminuição do ΔpH, que apesar de negativo, é menos negativo se comparado ao do LVd<sub>1</sub>. Provavelmente, os cátions são parcialmente retidos a partir da CTC devido às cargas negativas disponíveis no meio. A retenção dos ânions pode estar relacionada à adsorção pela gibbsita e hematita, por seu ΔpH ser maior que o registrado na porção mais superficial e pelo pH deste solo ser menor que o da porção superficial, contribuindo com o aumento da capacidade de adsorção de íons como poderá ser visto mais a frente quando da hierarquização dos solos.

### Gleissolo Háptico distrófico (GXd)

O GXd apresenta textura argilosa, o que lhe confere uma área superficial específica (A.S.E.) maior e, conseqüentemente, uma maior capacidade de troca iônica. O teor de matéria orgânica neste solo por sua característica pedológica é mais alta que dos demais solos, com exceção do OXfi. O fato do GXd possuir uma quantidade expressiva de matéria orgânica em sua composição, aumenta bastante sua capacidade de troca iônica, ou seja, de retenção tanto de ânions internamente como de cátions superficialmente. Este tipo de solo apresenta ausência de minerais expansíveis e sólidos de Fe amorfo. Sua composição é bastante aluminosa (32,4%), com teores de sílica e titânio mediano (49,02%) e alto (1,86%), respectivamente. A perda ao fogo/teor de matéria orgânica (M.O.) é mediana, sendo que boa parte desta característica está preferencialmente ligada ao teor M.O. mais alto. O pH deste solo mostra-se levemente ácido (<6), já o  $\Delta$ pH deste solo também é negativo, porém não tão baixo quanto o observado no LVd, indicando uma maior quantidade de cargas negativas disponíveis.

O GXd e o OXfi apesar de estarem drenados e, por este motivo, terem aumentado sua macroporosidade, mostram comportamento distinto em relação à retenção das cargas iônicas introduzidas. Onde o OXfi retém de forma bastante considerável os íons da solução infiltrada, enquanto o GXd apresenta baixa capacidade de retenção.

### Neossolo Quartzarênico órtico (RQo)

O RQo apresenta textura média/arenosa, sendo a típica esperada para este tipo de solo. Entretanto, essa textura registrada está relacionada a uma mistura dos 70 cm de solo coletados, que por causa dos horizontes mais superficiais teve seu teor de argila aumentado. Essa granulometria média diminui a A.S.E., e conseqüentemente, diminui a capacidade de troca iônica. A perda ao fogo e o teor de M.O. são pequenas. Apesar da ausência de sólidos de Fe amorfo e de matéria orgânica em quantidade significativa, há a presença de minerais expansíveis como vermiculita, que tem a tendência de aumentar a CTC. Como seria esperada, sua composição é extremamente silicosa (81,11%), enquanto os teores dos demais componentes óxidos são relativamente baixos (Al: 8,83%) e (Fe: 4,32%). O pH deste solo está bem próximo à neutralidade (6,82), enquanto o  $\Delta$ pH permanece negativo como a grande maioria dos solos analisados. O fato do  $\Delta$ pH dos solos ser negativo indica a predisposição deste solo a troca cátions devido a uma maior quantidade de cargas negativas disponíveis.

O RQo apresenta baixa capacidade de retenção dos íons, como indicado pelas altas concentrações e condutividade iônicas dos primeiros percolados. Podemos ver a quase ausência de retenção dos cátions e ânions, por conseguinte, pode-se dizer que em relação à capacidade de retenção de íons esse solo retém muito menos do que os solos com baixa capacidade de retenção, sendo considerado um extremo. A textura mais arenosa e o alto teor de sílica, que têm baixa capacidade de troca iônica, podem explicar esse comportamento. Este solo não costuma ter um horizonte A com quantidade de matéria orgânica significativa, além disso, não foi identificada a

presença de sólidos amorfos de óxido de ferro, características que podem conferir uma maior capacidade de troca iônica.

#### Plintossolo Háptico concrecionário (FXc)

O FXc apresenta textura argilosa, o que resulta em maior capacidade de troca iônica. Ausência de minerais expansíveis e sólidos de Fe amorfo e M.O. inexpressiva, devem limitar a capacidade de troca iônica, porém a presença de ilita aumenta a CTC. É um solo com SiO<sub>2</sub> médio (49,57%), teores de alumínio (15,70%) e ferro (8,66%) medianos e magnésio (0,57%) e potássio (2,25%) relativamente mais altos, maiores que nos solos analisados anteriormente. A perda ao fogo é a maior registrada, porém seu alto teor está relacionado à quantidade de água e de argilominerais presentes na amostra. O pH deste solo é o segundo mais baixo dentre os solos estudados, já o ΔpH do FXc é negativo, porém não tão baixo como do LVd<sub>1</sub>, indicando menor carga negativa.

Em relação à capacidade de retenção dentre os íons analisados apenas o sódio é bem retido, inclusive apresenta curva com as menores concentrações registradas para este elemento. É possível que a excelente retenção do sódio esteja relacionada à capacidade de troca com o K<sup>+</sup> contido na amostra em alto teor (K<sub>2</sub>O<sub>tot</sub>: 2,25%), porém seria necessário avaliar o teor de K<sup>+</sup> trocável desse solo e comparar as concentrações dos percolados em Na<sup>+</sup> e em K<sup>+</sup> para verificar se está realmente sendo disponibilizado na solução após a suposta troca iônica. Ademais, a presença de ilita aumenta a CTC do solo.

#### Organossolo Háptico fíbrico (OXfi)

O OXfi apresenta textura média, o que diminui sua capacidade de troca iônica, devido à diminuição da A.S.E.. Em sua composição há a presença de argilominerais com estrutura 2:1, como ilita e vermiculita, e alto teor de M.O. É um solo com teor de SiO<sub>2</sub> médio (55,42%), teores de alumínio alto (22,84%) e de ferro baixo (1,44%). A perda ao fogo é uma das maiores registradas, o que é esperado em função do elevado conteúdo em matéria orgânica. O pH deste solo é mais ácido, devido à grande quantidade de matéria orgânica em sua composição, já o ΔpH apesar de negativo, é bem maior (-0,52) que a maioria dos demais solos, indicando que a disponibilidade de cargas negativas no meio é mais restrita e, desta forma, diminuindo a preferência da troca iônica por cátions.

Considerando que este solo foi coletado em um ambiente previamente drenado (com rebaixamento do nível freático) sua estruturação granular média a grossa grumosa ficou bastante evidente, aumentando, assim, a macroporosidade de forma considerável.

Em função da macroporosidade espera-se que a sua capacidade de retenção dos íons seja restrita, entretanto os resultados evidenciam o papel da matéria orgânica e argilominerais 2:1 como elemento de retenção quando presente de forma abundante nos solos.

Especificamente, em relação à capacidade de retenção, é possível que tenha havido troca de cátions bivalentes (já presente no solo, no complexo argilo-húmico) por dois cátions monovalentes. Aumentando assim, a retenção dos cátions monovalentes, porém deteriorando a estrutura do solo. Ademais, a microporosidade existente no interior da estrutura granular e grumosa e, principalmente, matéria orgânica e mineralogia se mostraram suficientes para contribuir para a sua capacidade de retenção por retenção de íons por adsorção, troca iônica e de interação intercamada mineral.

#### Argissolo Vermelho eutrófico (AVe)

O AVe apresenta textura muito argilosa, característica que lhe confere ampla capacidade de troca iônica devido ao aumento da área específica. Ausência de minerais expansíveis e sólidos de Fe amorfo e M.O. inexpressiva devem limitar a capacidade de troca iônica, porém a presença de illita aumenta a CTC. É um solo com conteúdo de SiO<sub>2</sub> médio (56,03%), teores de alumínio (19,05%) e ferro (8,66%) medianos, e magnésio (1,55%), potássio (3,69%) e manganês (0,25%) com os teores mais altos em meio aos registrados. A perda ao fogo registrada foi mediana. O pH deste solo é o mais alto dos solos estudados, já o ΔpH do AVe, além de ser negativo, é o terceiro menor (-1,5), indicando uma maior capacidade de troca os cátions em relação aos demais.

No que se refere à capacidade de retenção, este solo apresenta capacidade mediana quando comparado aos demais. Como afirmado anteriormente, os íons K<sup>+</sup> e Mg<sup>2+</sup> podem participar da troca de íons, porém são necessárias mais informações acerca da partição sólida desses elementos nos solos e, mais especificamente, do compartimento trocável e do teor em K e Mg das soluções de lixiviado. A capacidade de retenção destes solos pode estar relacionada à disponibilidade de cargas negativas do solo identificadas nos valores negativos de ΔpH. Além disso, a presença de gibbsita possibilita a retenção aniônica dos íons presentes na solução infiltrada com o solo em função das cargas associadas a este mineral.

#### Cambissolo Háptico distrófico (CXd)

O CXd apresenta textura muito argilosa, ou seja, possui alta capacidade de troca iônica. Presença de illita, que tende a aumentar a CTC, quantidade de matéria orgânica inexpressiva e ausência de vermiculita e sólidos de Fe amorfo. É um solo com médio teor de sílica (49,31%), teores de alumínio (23,42%) alto, ferro (12,98%) e potássio (2,44%) muito altos e magnésio (0,80%) médio. A perda ao fogo registrada é mediana. O pH deste solo é um dos mais baixos (5,5), já o ΔpH do CXd, além de negativo, está na média dos valores encontrados (-0,90).

Em relação à capacidade de retenção dos íons analisados, este solo apresenta capacidade significativa de retenção da solução infiltrada. A presença de illita e o fato de ser um solo menos lixiviado comparando os Latossolos e Argissolos influencia de maneira significativa. O pH bastante baixo também pode ter influenciado na retenção dos íons.

### Saprolito (Sap)

O Sap coletado como é oriundo de rochas pelíticas apresenta textura argilosa. Vale destacar que dentre os solos estudados, este foi o material que apresentou maior quantidade de silte (o que é coerente com sua proximidade com material parental pelítico). A presença de ilita e hematita possibilita tanto a capacidade de troca catiônica como aniônica. Sólidos de Fe amorfo e minerais expansíveis não são encontrados nesse solo, assim como matéria orgânica e/ou atividade biológica como já esperado para este tipo de horizonte pedogenético (rocha alterada). O teor de sílica também é médio (50,81%) como na maioria dos solos estudados, teores de alumínio (25,93%) e ferro (10,10%) altos e magnésio (0,40%) e potássio (1,32%) medianos. A perda ao fogo registrada é mediana. O pH deste solo está na média dos valores (6,27), já o  $\Delta$ pH apesar de negativo é maior (-0,43) que a maioria dos solos aproximando-se da estabilização do balanço de cargas positivas e negativas disponíveis no meio. Como agente retentor do cloreto e do sódio sua capacidade está ligada, principalmente, à presença de ilita e hematita.

### Nitossolo Vermelho distrófico (NVd)

A textura muito argilosa do NVdlhe confere uma grande área específica, ou seja, maior capacidade de troca iônica, adsorção e absorção. Neste solo é verificada a presença de gibbsita, ilita e de sólidos de ferro amorfo que podem auxiliar na troca iônica e na adsorção da solução infiltrada, tanto positivas como negativas. Não são detectados minerais expansivos e matéria orgânica expressiva para influenciar significativamente na capacidade de retenção do solo. Em termos de composição química, é um solo com teores não muito altos de sílica (46,16%), medianos para potássio (1,48), magnésio (0,61) e titânio (1,22) e muito altos para alumínio (22,79%) e ferro (16,15). A perda ao fogo se mantém na média, em comparação aos demais solos estudados. O pH deste solo é neutro (7,03), entretanto o  $\Delta$ pH do NVd é o segundo menor registrado (-1,5), indicando uma das melhores CTC dentre os solos estudados.

Este solo apresentabaixa capacidade de retenção dos íons analisados, mesmo quando próxima da média como foi o caso do cloreto. As características deste solo, como a grande A.S.E., a textura argilosa;a presença de ilita e gibbsita; e baixo  $\Delta$ pH, podem induzir à ideia de que este solo é um excelente retentor, entretanto não é isso o que nos mostram os resultados obtidos.

### Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico 1 (LVAd<sub>1</sub>)

O LVAd<sub>1</sub> representa a parte superficial (primeiros 70 cm) do LVAd o qual exhibe textura média, lhe conferindo uma menor A.S.E.e, conseqüentemente, menor capacidade de troca iônica. A vermiculita está presente, assim como a gibbsita e os sólidos de Fe amorfo. Como esta porção é mais superficial sabe-se o conteúdo de M.O., embora não muito alto, pode influenciar na capacidade de retenção de íons. Este solo apresenta baixo teor de sílica em sua composição (34,77%), enquanto os teores de alumínio (31,31%) e ferro (13,26%) são muito elevados. A quantidade de titânio também é alta (2,03%), porém este elemento, além de não ser um dos constituintes maiores, não apresenta influência na capacidade de retenção dos íons por estar

associado a um mineral estável (rutilo). A perda ao fogo é bastante significativa, possivelmente pela quantidade de argila total que possui em sua matriz. O pH deste LVAd<sub>1</sub> é mais ácido se comparado com a maioria dos solos estudados, já o ΔpH, apesar de negativo, é próximo de 0 (-0,07), o que indica equilíbrio no balanço de cargas do solo, não ocasionando em preferência de troca por cátions ou ânions.

Em relação à capacidade de retenção da solução infiltrada analisada, os íons apresentam baixa retenção. Dentre as características deste solo a presença de gibbsita, vermiculita e sólidos de ferro amorfo, além do baixo pH, possibilitam a retenção da solução infiltrada.

#### Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico 2 (LVAd<sub>2</sub>)

A coluna LVAd<sub>2</sub> compõe a parte mais profunda (entre 70 e 140 cm) do LVAd e também apresenta textura média. Em sua fase sólida mostra ausência de argilominerais com estrutura 2:1 e presença de sólidos de Fe amorfo e gibbsita, que auxiliam na capacidade de troca aniônica. Dentre os solos estudados, este é o que apresenta menor teor de sílica em sua composição (31,92%), em compensação os teores de alumínio (33,62%) e ferro (13,63%) são muito altos, indicando que a gibbsita e os mineraloides de ferro ocorrem em conteúdo significativo. A quantidade de titânio também é alta (2,15%). A perda ao fogo é também bastante significativa. O pH deste solo mostra-se um mais alto do que o esperado para Latossolos (6,93), inclusive bem mais alto do que a porção superficial, já o ΔpH deste solo é o único positivo registrado. A influência do ΔpH positivo só não é maior na capacidade de retenção dos ânions, pois o valor está muito próximo de 0 (0,08), e como explicado na porção superior, há uma tendência de equilíbrio das cargas presentes originalmente no solo.

A capacidade de retenção deste solo em profundidade é pequena. O cloreto é melhor retido do que o sódio se comparado aos demais solos. Esta retenção pode estar ligada, principalmente, à presença de gibbsita e sólidos de Fe amorfo.

## **4.2 Análise Integrada dos Solos Estudados**

Com o intuito da hierarquização dos solos quanto à sua capacidade de retenção de contaminantes inorgânicos optou-se, em função da complexidade das informações apresentadas, que os melhores resultados para sua determinação, de forma integrada, seriam a partir dos dados obtidos para condutividade elétrica, uma vez que, esta avalia de forma unificada todas as cargas contidas em solução, tanto positivas quanto negativas, sem fazer distinção entre elas. Além disso, pode-se identificar algumas das características que mais interferiram na capacidade de retenção.

A Figura 3.16 apresentou as curvas contínuas de condutividade elétrica (μS/cm) derivadas dos resultados obtidos para cada solo. Quando se comparou as Figuras 3.16, 3.17 e 3.18 foi possível perceber que de acordo com a amplitude e formato das curvas, o Sódio foi o elemento que se comportou de forma mais similar a de condutividade elétrica, podendo-se concluir que o sódio influencia mais nos resultados do que o cloreto, mesmo este tendo algumas curvas com comportamentos semelhantes.

Como explicitado no subitem de resultados de percolados o Neossolo Quartzarênico (RQo) e o Organossolo Háplico (OXfi) mostraram comportamento distinto dos demais. Enquanto o RQo se mostrou como um péssimo retentor que, com sua curva decrescente bastante abrupta, praticamente não reteve solução infiltrada, deixando lixiviar o suficiente para, em 64 dias após a primeira coleta (205.800  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), em 07/03/2013 alcançar uma linha de base (<1.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) indicando que, apesar dos íons terem sido praticamente totalmente lixiviados, o solo mostrou pouco da sua capacidade de retenção, liberando gradualmente os íons remanescentes da solução infiltrada. Já o OXfi, apresentou a maior capacidade dentre os solos analisados, com uma curva decrescente bastante suave, alcançando a tendência à formação da linha de base após 87 dias da primeira coleta (74.466,7  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). E mesmo com valores de condutividade da linha de base relativamente altos próximos a 10.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  foi possível perceber que a liberação de íons ocorreu de forma gradual e suave. Esses 2 (dois) solos, por terem apresentado resultados e curvas com comportamentos extremamente distintos dos demais, foram situados nos limites extremos da hierarquização.

Ainda na avaliação dos resultados, a partir das curvas dos demais solos, evidenciou-se a tendência à formação de linha de base que, pela quantidade de pontos em uma mesma curva com valores bastante aproximados, mostraram uma propensão a não haver mudanças substanciais em relação aos valores de condutividade. OXfi, AVe e CXd apesar de apresentarem uma maior permeabilidade, como evidenciado pelo início de gotejamento (Tabela 3.7), se mostraram como parte integrante dos melhores retentores, servindo de exemplo para comparação entre seus parâmetros com demais solos, tanto os melhores quanto os piores retentores.

A partir da avaliação integrada desses resultados foi possível perceber o padrão de formação de um platô, compreendido principalmente entre os meses de janeiro e fevereiro, indicando que, mesmo com as curvas dos solos apresentando seus maiores valores de condutividade, os solos tiveram capacidade de liberar os íons de forma gradual no sistema, independentemente das suas variações composicionais, mineralógicas, de pH, granulométrica, de estruturação e teor de matéria orgânica.

Desta forma, a partir do comportamento das curvas mostradas na Figura 4.1 foi possível agrupar os solos em quatro grupos distintos, em função dos valores máximos alcançados:

- Neossolo Quartzarênico órtico - não retém praticamente nada das soluções iniciais;
- Organossolo Háplico - considerado o melhor solo como retentor de cargas químicas;
- Argissolo, Cambissolo, Plintossolo e saprolito, são considerados de capacidade moderada de retenção;
- Latossolo Vermelho, Latossolo Vermelho-Amarelo, Gleissolo e Nitossolo apresentam baixa capacidade de retenção de íons.

Por consequência, foi possível propor uma hierarquização em relação à capacidade de retenção dos solos estudados juntamente com a enumeração das características mais influentes

para a retenção dos íons contidos na solução de infiltração . A ordenação a partir das curvas de condutividade elétrica considerou que os solos que retiveram melhor a solução infiltrada apresentam menores valores médios de condutividade, compreendidos dentro de cada patamar nas respectivas curvas.

Dentre os solos estudados a hierarquização alcançada a partir dos resultados, com relação à capacidade de retenção foi:

**RQo<<<< LVAd<sub>1</sub>< LVAd<sub>2</sub>< LVd<sub>2</sub>< LVd<sub>1</sub>< NVd < GXd << Sap < AVe < CXd < FXc <<< OXfi**

As características que ficaram destacadas quanto a sua capacidade de influenciar a capacidade de retenção de forma positiva ou negativa, foram a mineralogia, textura e teor de matéria orgânica. Dividindo-se os solos de forma geral em primeiro grupo de melhores retentores e um segundo grupo com os piores retentores, podemos perceber que os melhores retentores têm em comum a presença de matéria orgânica, ilita e/ou textura mais fina, de muito argilosa a argilosa. Com exceção do OXfi, que apesar de ter apresentado uma textura média, teve essa desvantagem compensada pelo alto teor de matéria orgânica, presença de ilita e de vermiculita, tendo a melhor retenção registrada. O grupo de solos que retiveram menos os íons da solução infiltrada, apresentou ausência dos parâmetros que influenciaram na retenção e a textura é mais grossa (média), com exceção do RQo que mesmo apresentando traços de ilita e vermiculita em sua composição, foi considerado o pior retentor por sua característica mineralógica mais inerte (dominada por quartzo), ausência de estruturação e textura mais grossa.

Vale ressaltar a importância do atraso na lixiviação da contaminação a qual indicou que, independente do contaminante inorgânico presente no meio, alguns solos protegem mais o aquífero temporalmente do que outros. Isso acontece devido ao retardamento do gotejamento relacionado a cada tipo de solo. As características que aumentariam a vulnerabilidade do aquífero à contaminação são aqueles que apresentam principalmente, grande macroporosidade, rochiosidade, pedregosidade, entre outras características que aumentem a permeabilidade do solo.

A diferença de intervalo de gotejamento inicial após o início da simulação de precipitação de chuva varia de 03 a 32 dias. Ter esse tipo de informação auxilia na hora em que houver um acidente (contaminação) para determinar que tipo de tratamento poderá ser feito, se será melhor fazer algum tipo de remediação ou retirada do solo.

## 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Analisando-se conjuntamente os dados obtidos foi possível verificar que há grande diferença de comportamento entre os solos, como pôde ser visto nos resultados de condutividade elétrica, onde 3 (três) solos apresentaram condutividade baixa e o resto mostrou maior atraso de gotejamento, porém com condutividade alta. Analisando com mais detalhes e buscando correlacionar o comportamento com as principais características físico-químicas dos solos, verificamos que as variáveis influenciaram de forma distinta, de acordo com cada íon presente na solução infiltrada e com as especificidades de cada tipo de solo, mostrando ampla complexidade de avaliação dos resultados e dificuldade de se chegar a uma única variável dominante.

Uma vez que foi percebida a dificuldade de distinção do comportamento dos elementos mono e bivalentes, a condutividade se tornou um excelente parâmetro para poder avaliar o efeito da contaminação e, principalmente, a sua lixiviação ao longo do tempo.

Considerando preferencialmente os resultados de condutividade elétrica por representar a totalidade dos íons dissolvidos em solução, foi possível verificar que dentre as características presentes nos solos que não há uma variável principal. Mesmo tentando unificar os íons presentes na solução infiltrada, utilizando os dados de condutividade elétrica, a complexidade do meio não permitiu isolar uma propriedade principal que interferisse na sua capacidade de retenção dos mesmos. O comportamento dos íons vai depender do somatório de características contidas no solo, como por exemplo:  $\Delta\text{pH}$ , pH do solo, mineralogia, composição química, estruturação, granulometria, quantidade de matéria orgânica, entre outros.

O estudo mostrou que possivelmente os solos mais evoluídos (Latosolos) são ricos em fases sólidas não minerais, pois apesar de enriquecimento em ferro total (mostrado nas análises de Fluorescência de Raios-X) os solos não mostram nenhuma fase mineral com estrutura definida de óxidos ou hidróxidos de ferro (nos resultados de Difração de raios X).

A partir dos resultados obtidos sugere-se que, de forma geral, para a retenção de cátions, o parâmetro que mais influenciou foi a presença de argilominerais com estrutura 2:1, como vermiculita e ilita, principalmente; para a retenção dos ânions, a presença de gibbsita e/ou oxihidróxido de ferro mostrou alguma capacidade de retenção, porém sem influenciar no resultado geral da retenção; e no caso das cargas, tanto positivas como negativas, as características mais representativas foram a quantidade de matéria orgânica; a presença de sólidos amorfos de ferro; o pH e o  $\Delta\text{pH}$  do solo. Devido a maior CTC das argilas 2:1 e matéria orgânica os resultados estão de acordo com a literatura, assim como no caso da gibbsita que aumenta a CTA (Kokovich & Ribeiro Junior 2008).

Por isso é importante que essas características sejam verificadas antes de se escolher algum método para determinação de vulnerabilidade de contaminação de aquíferos ou para remediação da contaminação.

Ademais, vale ressaltar a importância do intervalo de gotejamento, ou seja, do retardo de tempo que os solos apresentaram entre si para iniciar a produção do percolado. É possível que, em solos do grupo que mostraram um maior tempo do início das precipitações até a primeira coleta de material lixiviado, se tenha mais tempo para tentar remediar a situação antes que possíveis cargas contaminantes cheguem ao nível freático, assim, diminuindo a vulnerabilidade a contaminação dos aquíferos.

A partir dos resultados de condutividade elétrica foi possível chegar a uma hierarquização dos solos estudados quanto à sua capacidade de retenção. Neste caso, os solos puderam ser ordenados de forma crescente de capacidade de retenção da seguinte maneira:  $RQ_0 \lll LVA_{d1} < LVA_{d2} < LVD_2 < LVD_1 < NVd < GXd \ll Sap < AVe < CXd < FXc \lll OXfi$ . Este ordenamento é válido para os solos estudados, pois mudanças no manejo ou no padrão de uso podem interferir na capacidade dos solos de retenção de eventuais cargas contaminantes inorgânicas. Além disso, foi possível identificar que as características mais marcantes para a retenção de íons dissolvidos em solução foram presença de argila, matéria orgânica e textura.

Considerando os resultados obtidos, a complexidade do sistema – solo e a falta de informações e estudos que abordem o assunto de forma mais completa, sugere-se que os estudos acerca da influência das características físico-químicas presentes em solos tropicais sejam mais bem estudadas, principalmente relacionando a capacidade de retenção de cargas contaminantes de diferentes naturezas químicas.

Diminuindo-se a quantidade de variáveis é mais fácil a avaliação para se chegar a uma conclusão mais assertiva quanto influência de cada característica do solo com cada tipo de contaminante. Desta forma, sugere-se que, na continuidade dos estudos utilizando colunas, os solos recebam apenas um tipo de solução infiltrante.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

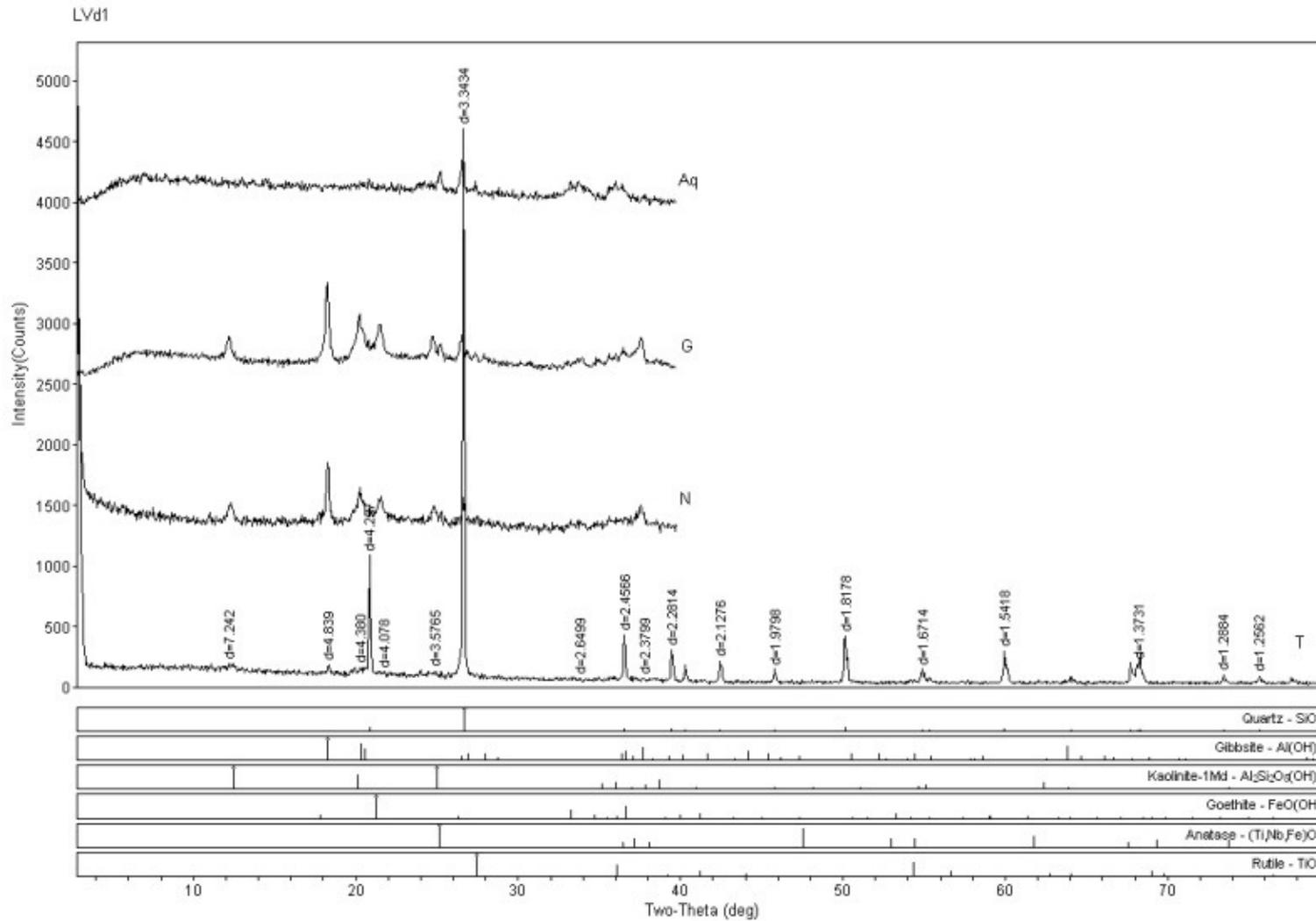
- Aller, L.; Bennet, T.; Lehr, J.H.; Petty, R.J. 1987. DRASTIC: a standardised system for evaluating groundwater pollution potential using hydrologic settings. US EPA Report, 600/2-87/035, Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory, Ada, OK.
- Barboza, A.E.C.; Rocha, S.F.; Guimarães, W.D. 2012. Estudo preliminar da vulnerabilidade do aquífero livre localizado na região de Ponta da Fruta, Vila Velha – ES. In: Anais do XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2011. Florianópolis: INPE, 2007. p. 3279-3286. Disponível em: <[http://marte.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr\\_@80/2006/11.16.00.42/doc/3279-3286.pdf](http://marte.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr_@80/2006/11.16.00.42/doc/3279-3286.pdf)>. Acesso em: 3 de jun. 2012.
- Campos, P.M.; Lacerda, M.P.C.; Papa, R.A. 2008. Difractometria de raios-x aplicada na identificação de gibbsita e caolinita em latossolos do Distrito Federal. In: Simpósio Nacional Cerrado, IX. Brasília, p.1-7.
- Campos, J.E.G. 2012. Caracterização Hidrogeológica do Distrito Federal. In: Zoneamento Ecológico Econômico do Distrito Federal. Volume II: Meio Físico. SEDHAB- GDF.
- Campos, J.E.G.; Dardenne, M.A.; Freitas-Silva F.H.; Martins-Ferreira, M.A.C. 2013. Geologia do Grupo Paranoá na Porção Externa da Faixa Brasília. Braz. J. Geol, São Paulo 43(3):461-476p.
- Civita, M. 1994. Le carte della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento. Teoria and practica (Aquifer vulnerability maps to pollution). Pitagora, Bologna.
- Civita, M.; De Maio, M. 2004. Assessing and mapping groundwater vulnerability to contamination: The Italian "combined" approach. Geofísica Internacional. 43(4): p.513-532.
- Cunha, L.S. 2009. Proposição de Metodologia para a Gestão de Aquíferos Costeiros: Aplicação na região de influência do Complexo Portuário do Pecém - Ceará. Tese de Doutorado. Universidade de Brasília.
- Dardenne, M.A. 1978. Síntese sobre a estratigrafia do Grupo Bambuí no Brasil Central. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 30, Recife, *Anais*, 2: 597-610.
- Doerfliger, N.; Zwahlen, F. 1997. EPIK: a new method for outlining of protection areas in karstic environment. In: Gunay G, Jonshon AI (eds) International symposium and field seminar on "karst waters and environmental impacts". Antalya, Turkey. Balkema, Rotterdam, pp 117-123.
- Embrapa. 2006. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Rio de Janeiro. 338p.
- EMBRAPA. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 2.ed. Centro Nacional de Pesquisa de Solos, Rio de Janeiro, 2006. 306p.

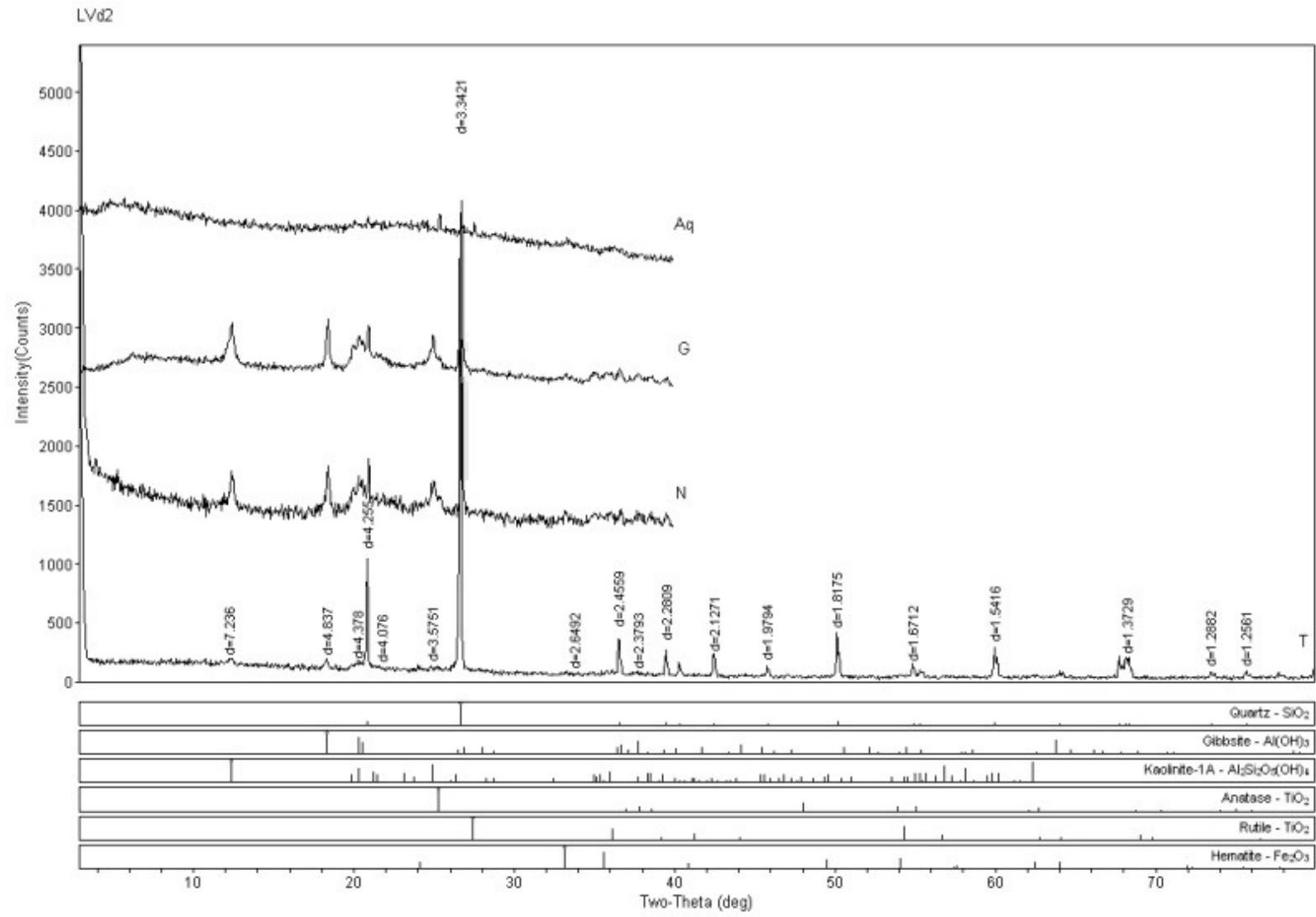
- Foster, S.; Hirata, R.; Gomes, D.; D'Elia, M.; Paris, M. 2006. Proteção da qualidade da água subterrânea: um guia para empresas de abastecimento de água, órgãos municipais e agências ambientais. Banco Internacional de Reconstrução e Desenvolvimento/Banco Mundial. São Paulo, Brasil.
- Foster, S.S.D. 1987. Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. In: Duijvenbooden W van, Waegeningh HG van (eds) TNO Committee on Hydrological Research, The Hague. Vulnerability of soil and groundwater to pollutants, Proceedings and Information. 38:69-86.
- Foster, S.S.D.; Hirata, R. 1988 Groundwater pollution risk assessment. Pan American centre for sanitary engineering and environmental sciences, Lima, 73 pp.
- Foster, S.S.D.; Hirata, R.C.A. 1988. Groundwater pollution risk assessment: a methodology using available data. WHO-PAHO/HPE-CEPIS Technical Manual, Lima.
- Fritch, T.G.; McKnight, C.L.; Yelderman Jr; Dworkin, S.I.; Arnold, J.G. 2000. A predictive modeling approach to assessing the groundwater pollution susceptibility of the Paluxi Aquifer, Central Texas, using a Geographic Information System. Environ Geol. 39(9):1063-1069.
- Gogu, R.C.; Dassargues, A. 2000. Current trends and future challenges in groundwater vulnerability assessment using overlay and index methods. Environ Geol 29(6):549-559.
- Gomezdelcampo, E.; Dickerson, R. 2007. A modified DRASTIC model for Siting Confined Animal Feeding Operations in Williams County, Ohio, USA. Environ Geol 46(5):149-159.
- Guo, Q.; Yanxing Wang, Y.; Gao, X.; Ma, T. 2007. A new model (DRARCH) for assessing groundwater vulnerability to arsenic contamination as basin scale: a case study in Taiyuan basin, northern China. Environ Geol. (52): p.923-932.
- Heredia, O.S; Cirelli, A.F. 2007. Groundwater chemical pollution risk: assessment through a soil attenuation index. Environ Geol (53): p.249-255.
- Hirata, R.C.A. 2012. Oito perguntas e oito tentativas de respostas sobre a vulnerabilidade à poluição de aquífero. In: I Seminario - Taller: Protección de Acuíferos frente a la contaminación, Toluca, Mexico. 2001. Disponível em <<http://tierra.rediris.es/hidrored/ponencias/Hirata.html>>. Acesso em 03 de jun. de 2012.
- INMET. Disponível em: <[http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/graficos Climáticos](http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/graficosClimaticos)>. Acesso em 05 dez. 2012.
- Kokovich, P.F.; Ribeiro Junior, P. J. A. 2008. Origem das cargas nos solos. Trabalho acadêmico – Departamento de Engenharia Florestal, Universidade do Estado do Mato Grosso. Mato Grosso. Disponível em: <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAAPUUA/origem-das-cargas-nos-solos>>. Acesso em 08 de out. de 2017.

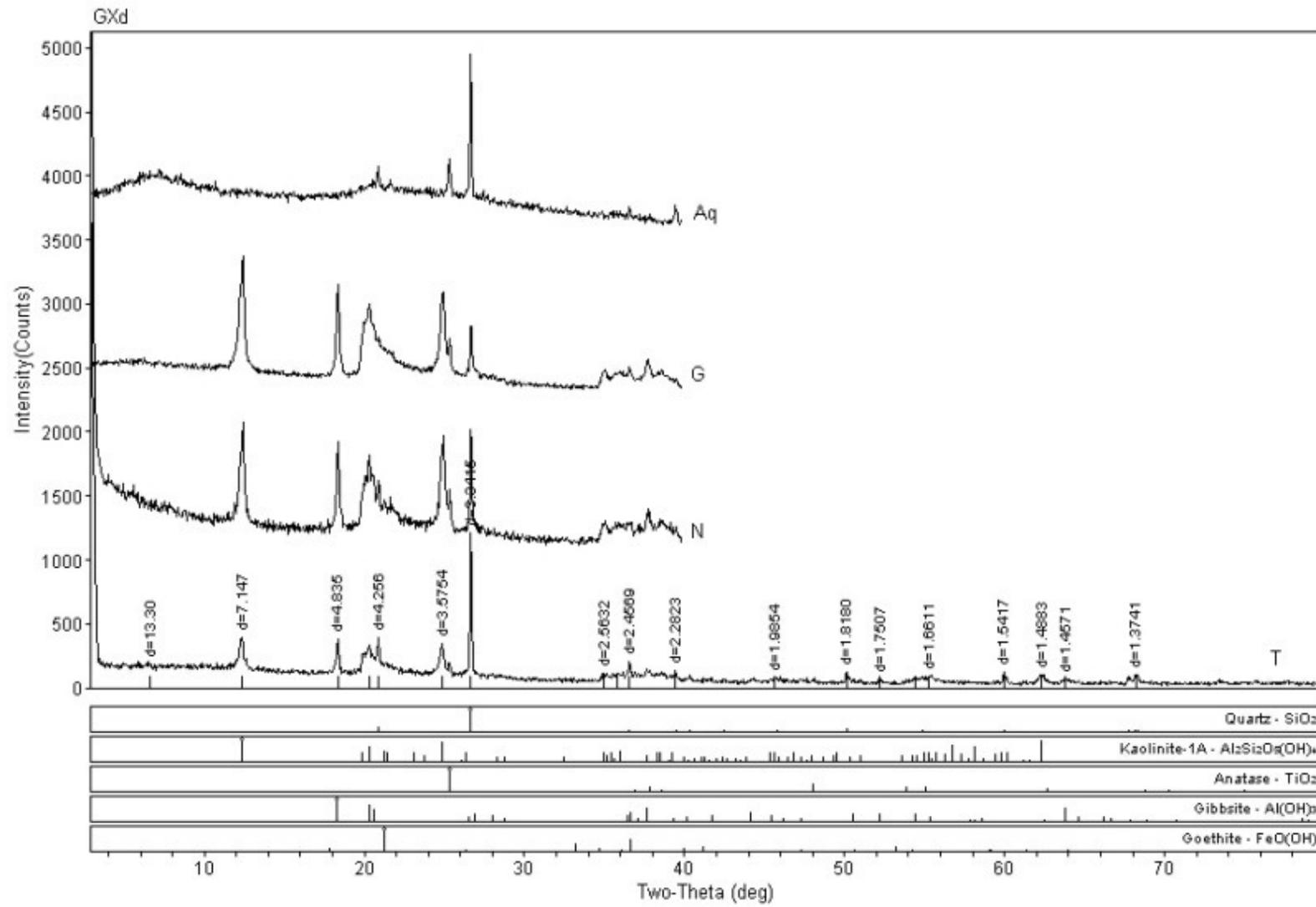
- Maia, P.H.P.; Cruz, M.J.M. 2011. Um novo método para avaliar a vulnerabilidade de aquíferos. *Braz. Jour. Aquat. Sci. Technol.*, 15(2):29-40.
- Martfeld, M. I. D. Avaliação da qualidade de água no alto curso do Rio Xingu: Bacia do Rio das Pacas, Querência - MT. 98f. Dissertação (Mestrado em Geociências Aplicadas) – Universidade de Brasília, Brasília, 2012.
- Navulur, K.C.S.; Enger, B.A. 1996. Predicting spatial distributions of vulnerability of Indiana state aquifer systems to nitrate leaching using a GIS. *In: Third International Conference and Workshop on Integrating GIS and Environmental Modeling*, Santa Fe, NM. 1996. p. 21-26.
- Panagopoulos, G.P.; Antonakos, A.K.; Lambrakis, N.J. 2006. Optimization of the DRASTIC method for groundwater vulnerability assessment via the use of simple statistical methods and GIS. *Hydrogeol. J.* (14):894-911.
- Resende, M.; Curi, C.; Rezende, S. B. de; et al. *Pedologia: base para distinção de ambientes*. 3.ed. Viçosa: NEPUT, 1999. 338p.
- Rodríguez, R.C. 2004. The role of urban areas in aquifer vulnerability assessments: The Salamanca Mexico case. *Geophysics International* 43(4):583-589.
- Ross, M.; Martel, R.; Lefebvre, R.; Parent, M.; Savard, M.M. 2004. Assessing rock aquifer vulnerability using downward advective times from a 3D model of surficial geology: A case study from St. Lawrence Lowlands, Canada. *Geofísica Internacional*. 43(4):591-602.
- Russo, A.S. 2009. Estimativa da vulnerabilidade de aquíferos utilizando sistemas de informações geográficas e geoestatística - UGRHI - PCJ. 2009. 75f. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 75p.
- Secunda, S.; Colin, M.L.; Melloul, A.J. 1998. Groundwater vulnerability assessment using a composite model combining DRASTIC with extensive agricultural land use in Israel's Sharon region. *Journal of Environmental Management*. (54):39-57.
- Van Stempvoort, D.; Ewert, L.; Wassenaar, L. 1993. Aquifer Vulnerability Index: A GIS - Compatible method for groundwater vulnerability mapping. *Canadian Water Resources Journal*, 18(1):25-37.
- Wang, Y.; Merkel, B.J.; Li, Y.; Hui, Y.; Fu, S.; Ihm, D. 2007. Vulnerability of groundwater in Quaternary aquifers to organic contaminants: a case study in Wuhan City, China. *Environ Geol.* (53): p.479-484.

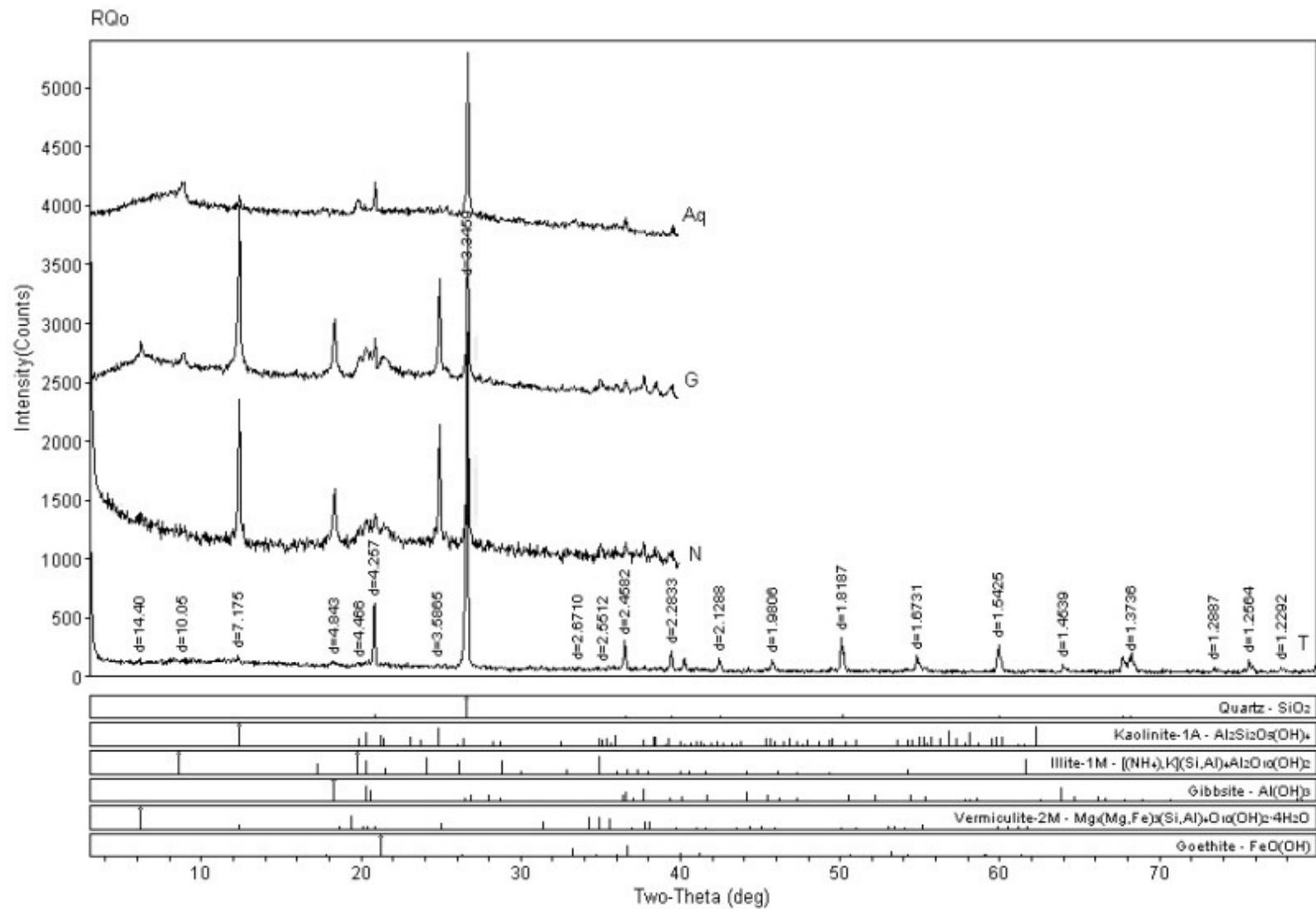
# ANEXOS

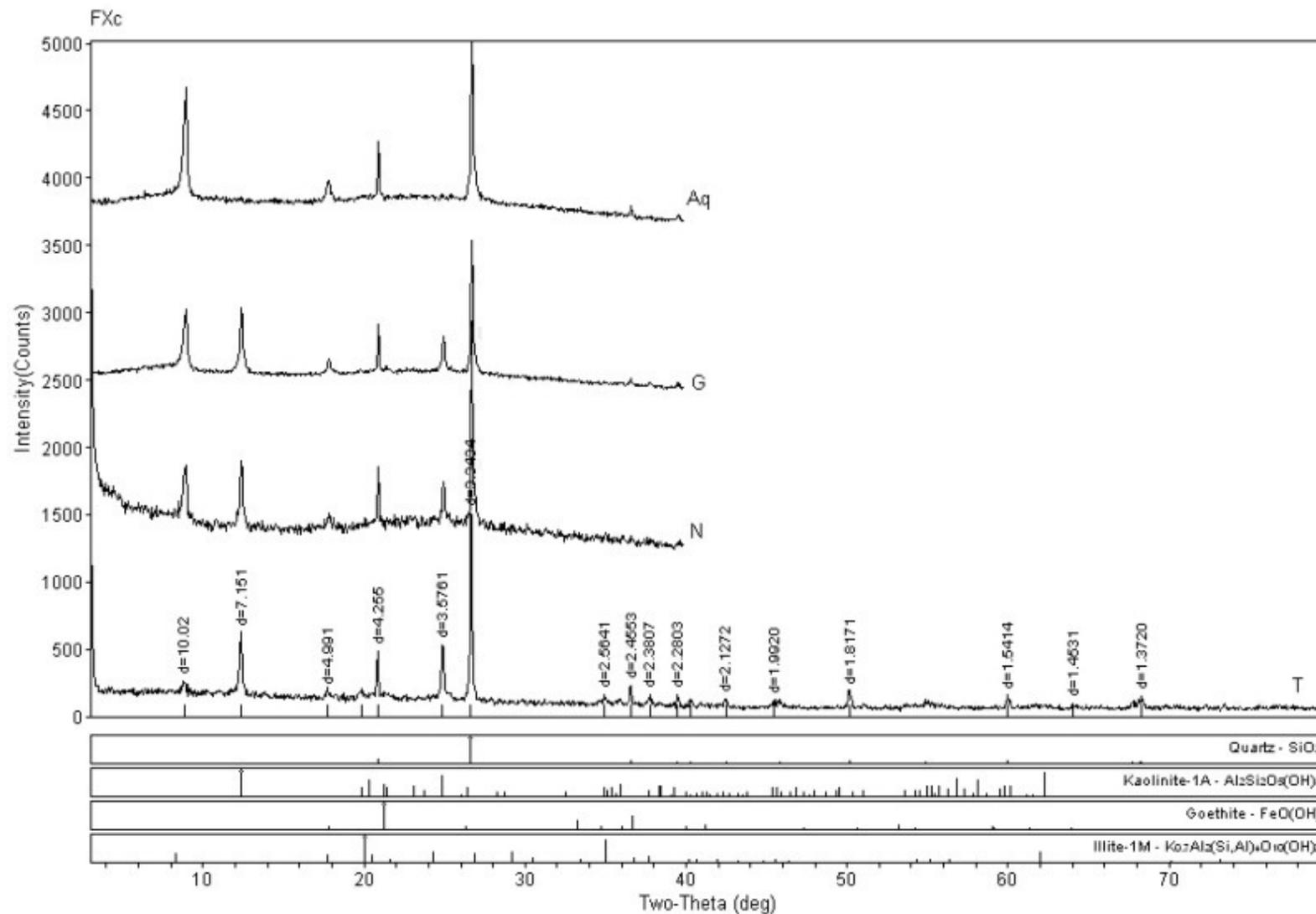
# ANEXO 1 - Difractogramas de Raios X das amostras de solos utilizados nos experimentos de colunas

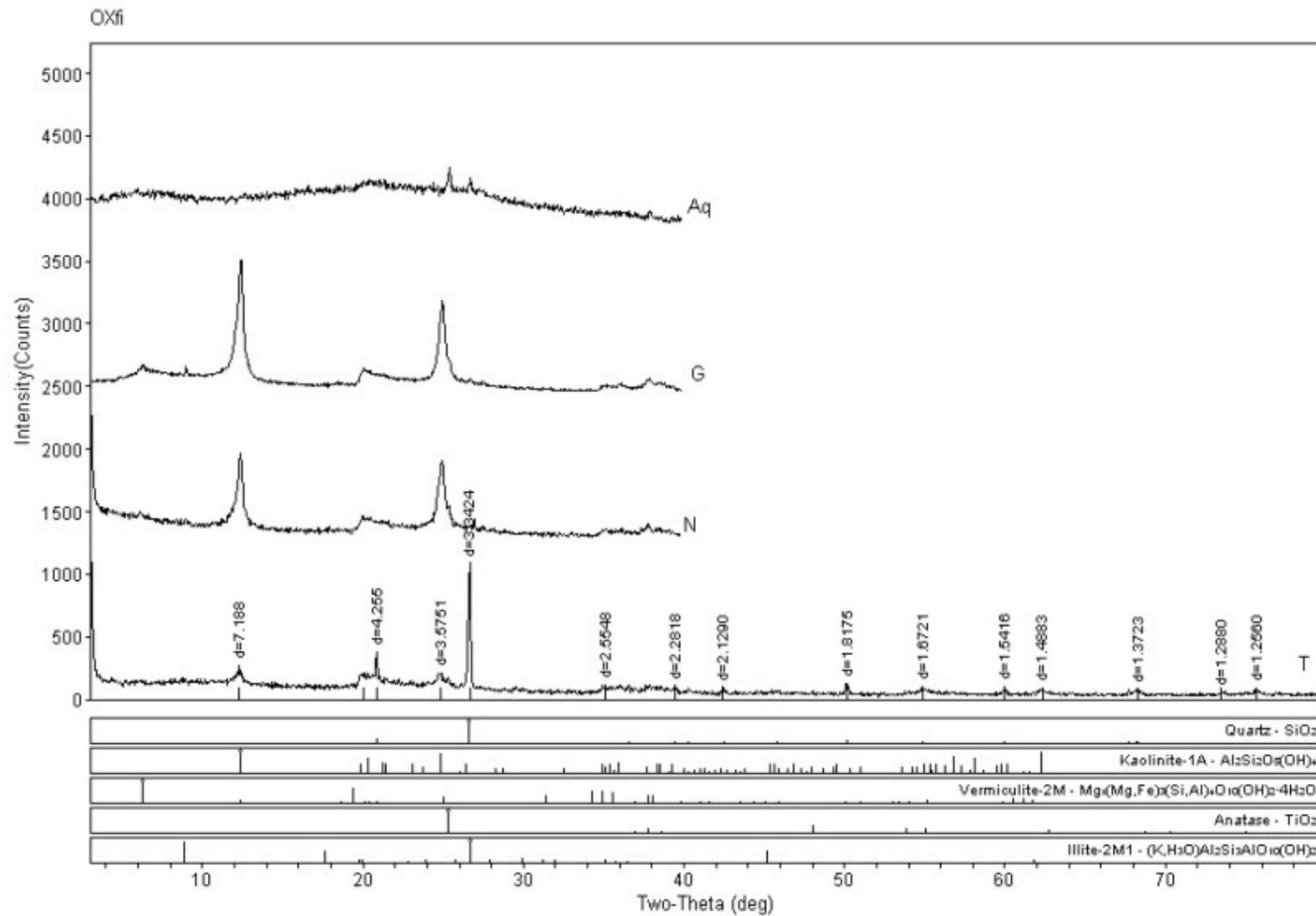


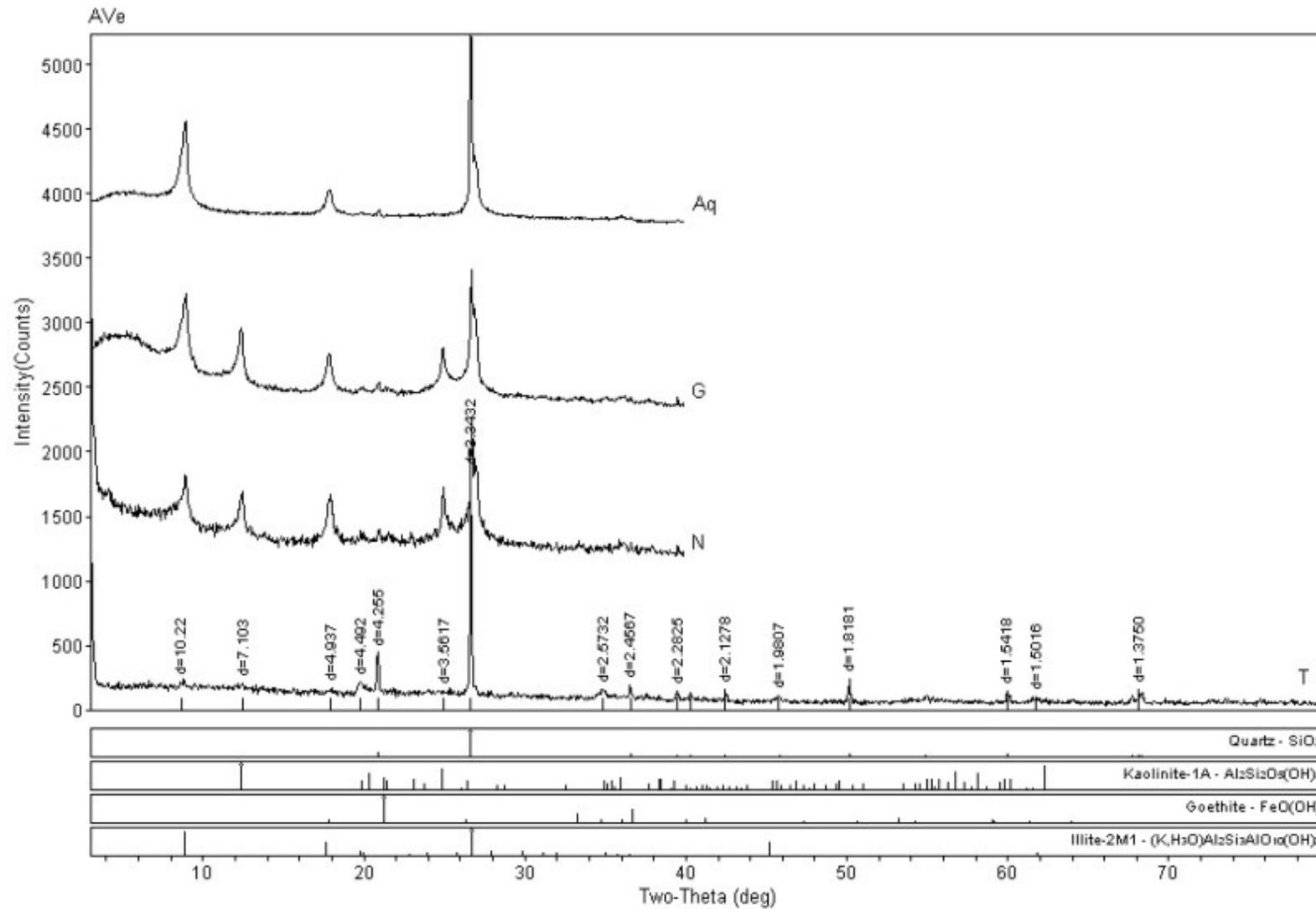


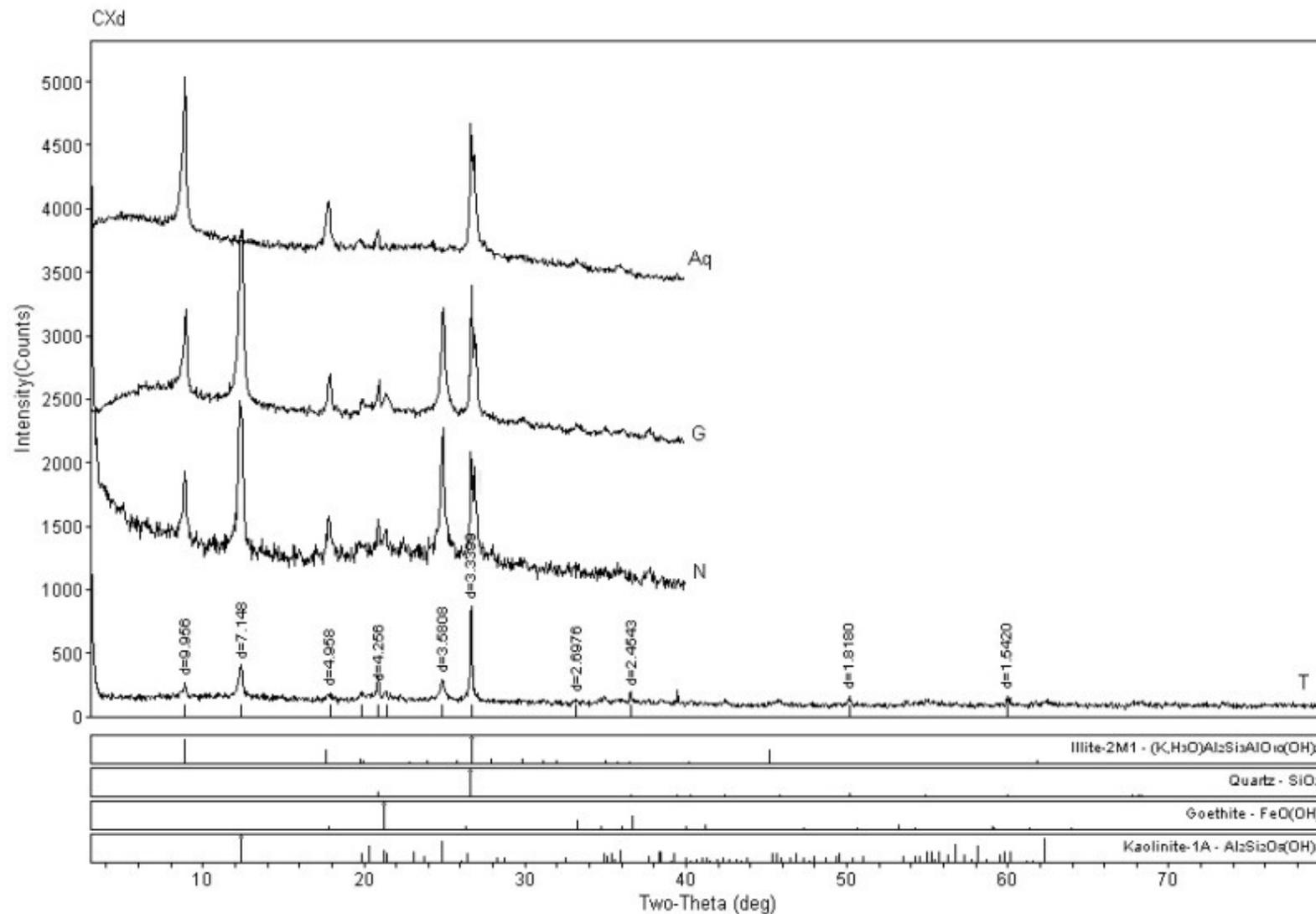


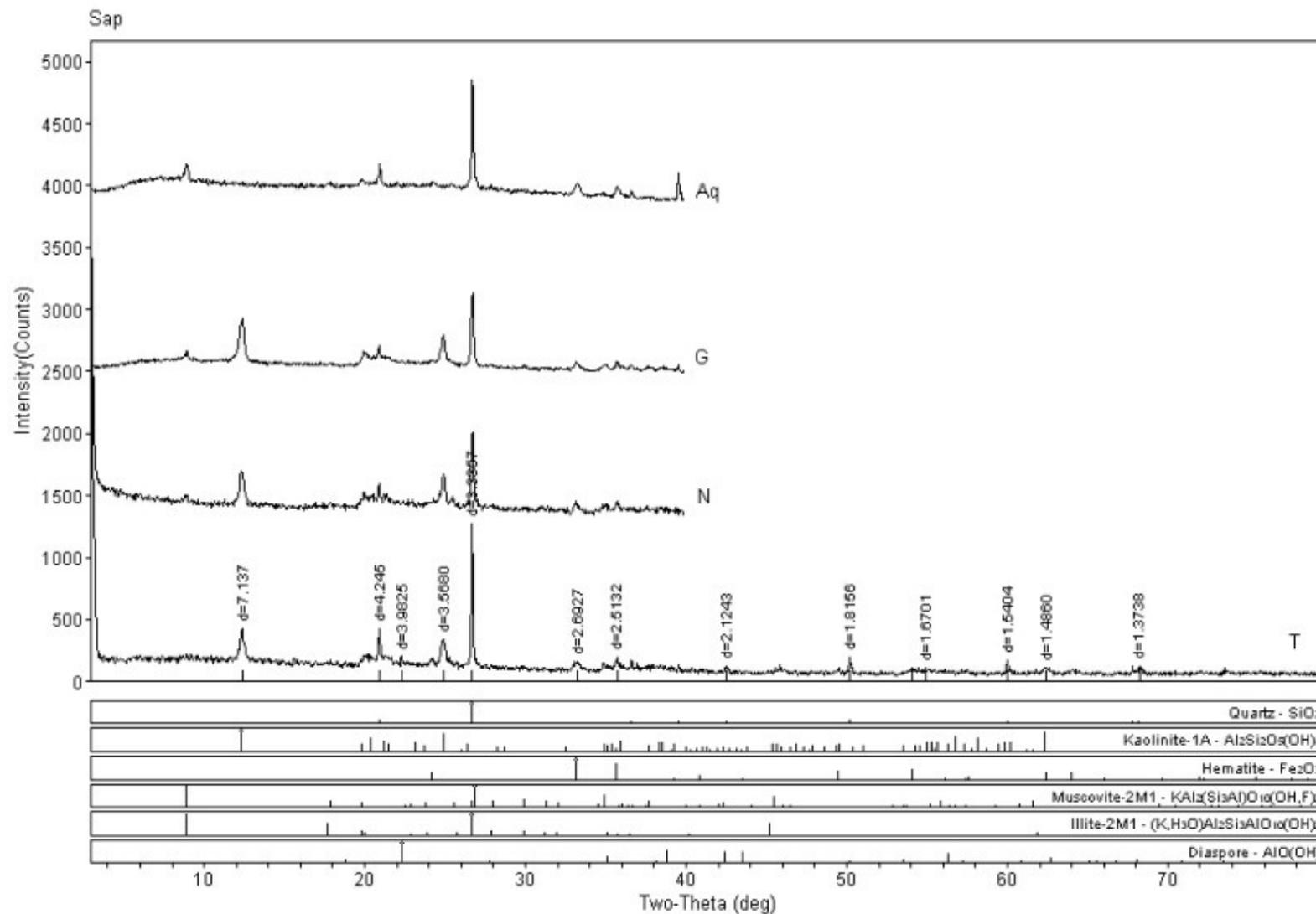


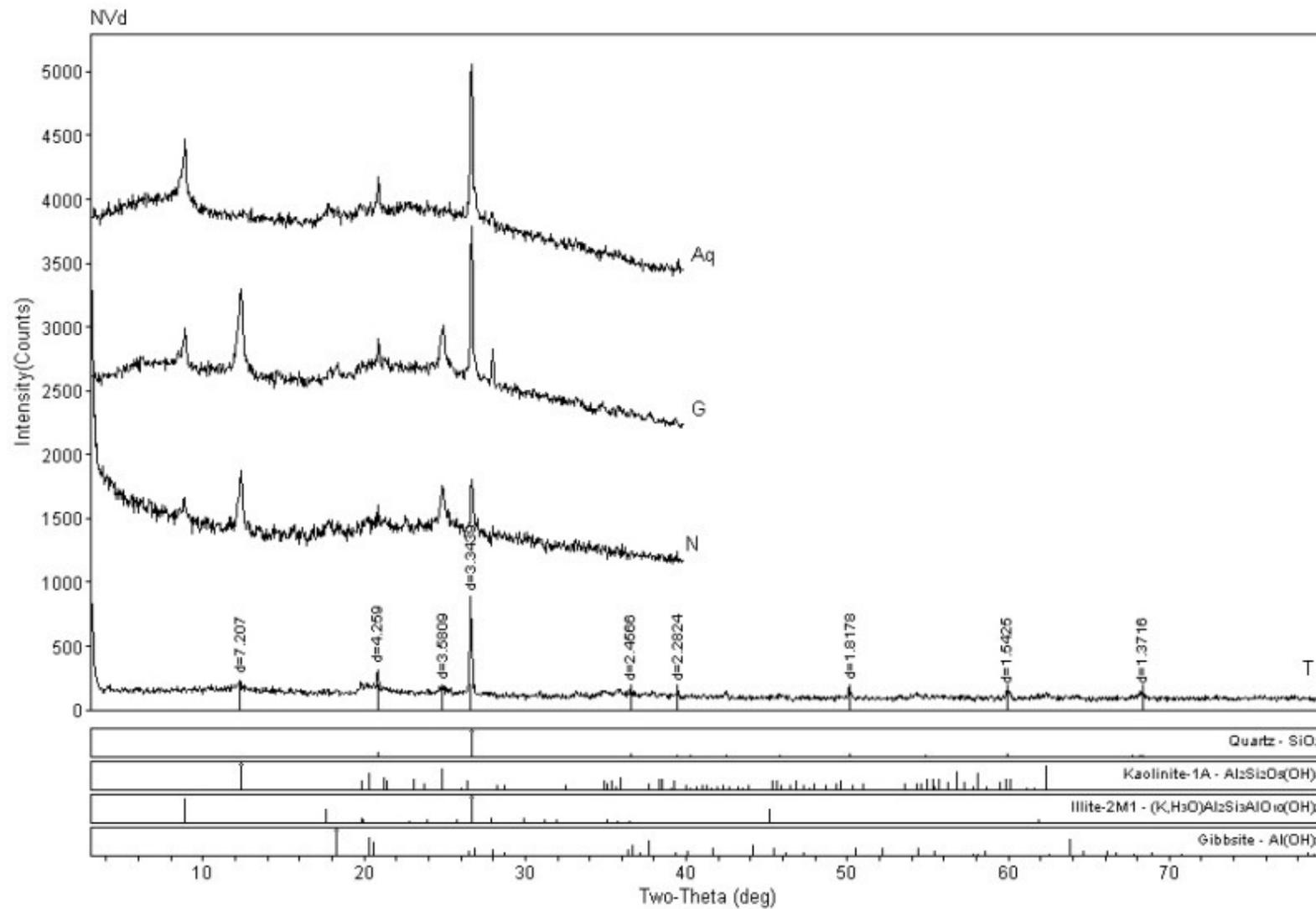


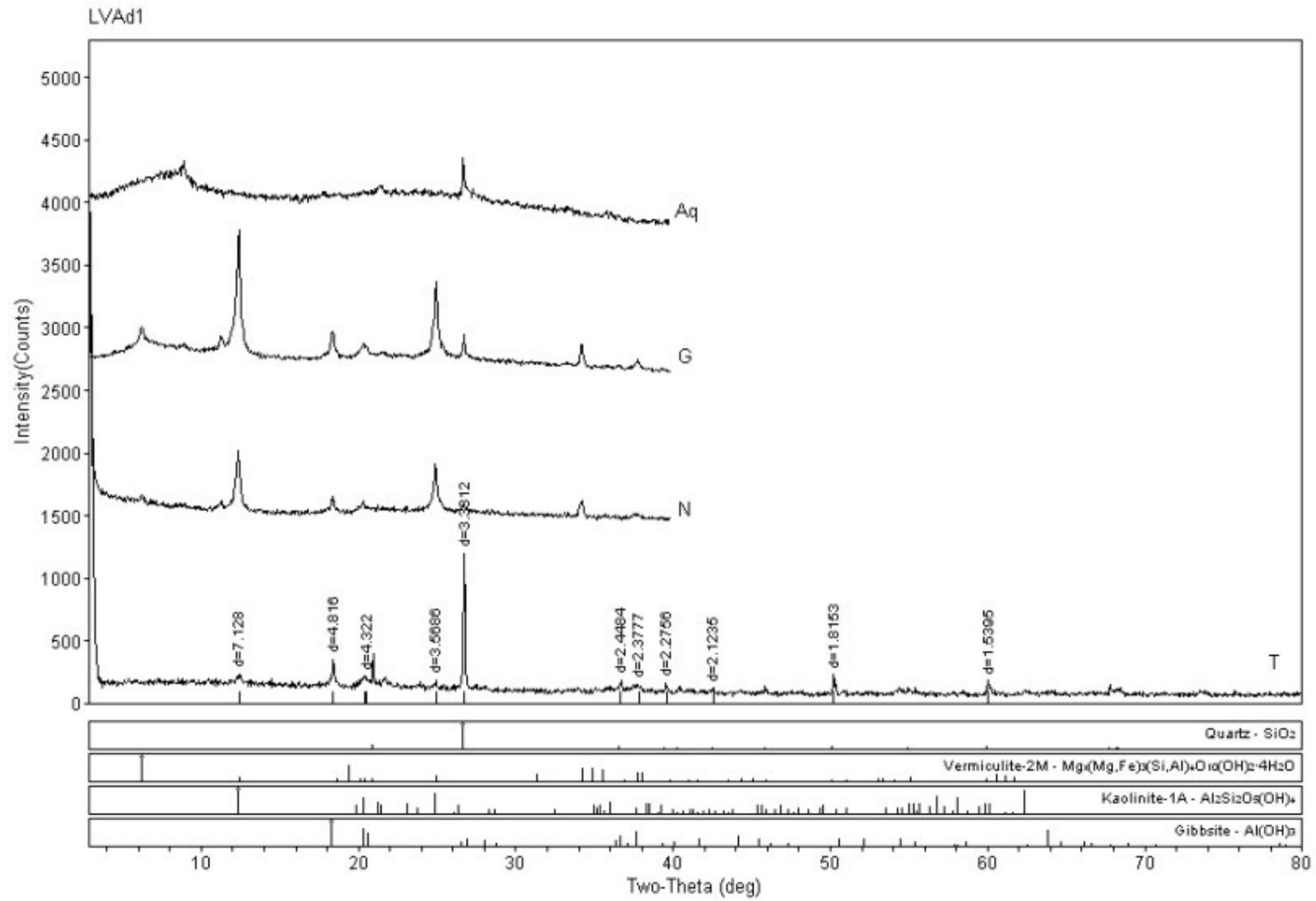


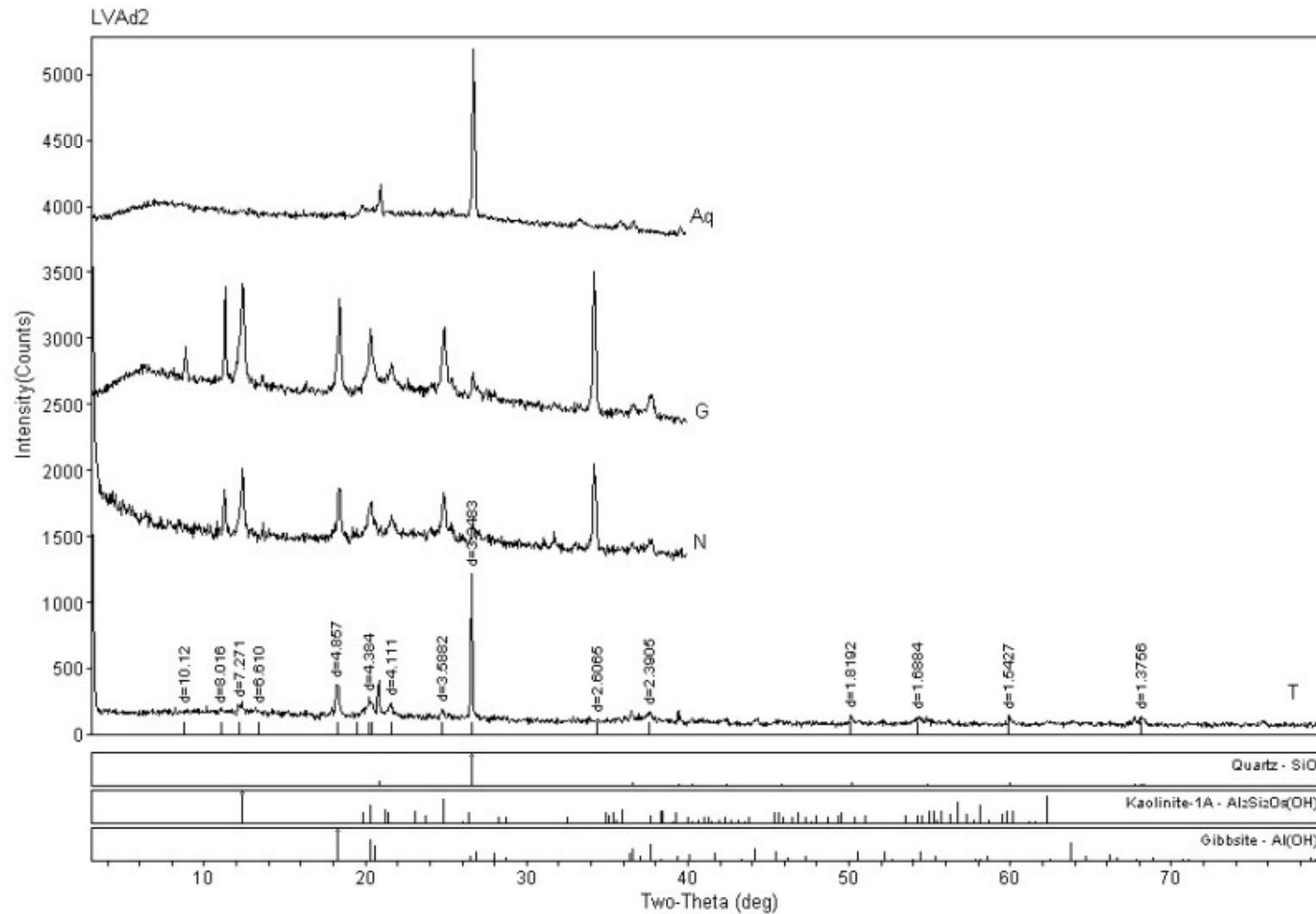












**ANEXO 2–Tabela de Condutividade Elétrica (µS/cm)**

<b>Data de coleta</b>	<b>LVd<sub>1</sub></b>	<b>LVd<sub>2</sub></b>	<b>GXd</b>	<b>RQo</b>	<b>FXc</b>	<b>OXfi</b>	<b>AVe</b>	<b>CXd</b>	<b>Sap</b>	<b>NVd</b>	<b>LVAd<sub>1</sub></b>	<b>LVAd<sub>2</sub></b>
<b>11/12/2012</b>						74466,7						
<b>16/12/2012</b>						57175,0						
<b>18/12/2012</b>								19120,0				
<b>19/12/2012</b>						45025,0						
<b>22/12/2012</b>							30030,0	26605,0				
<b>27/12/2012</b>						55733,3	65900,0	58200,0				
<b>03/01/2013</b>				205800,0			93700,0	75700,0	103000,0			
<b>06/01/2013</b>	111250,0		64000,0	170400,0	12345,0	34966,7	102950,0	83000,0	83800,0	72000,0		
<b>09/01/2013</b>	102400,0	111333,3	80100,0	64450,0	50250,0		77700,0	71350,0	83400,0	94950,0	105400,0	31700,0
<b>20/01/2013</b>	67900,0	92800,0	85100,0	20000,0	56600,0	26256,7	66200,0	63100,0	82300,0	92100,0	110900,0	96700,0
<b>28/01/2013</b>			74900,0	5810,0	47100,0	21090,0			48700,0	62000,0	93600,0	84900,0
<b>08/02/2013</b>	88400,0	104700,0	80700,0	8980,0	52300,0	23100,0	39000,0	48900,0	63400,0	78400,0	101200,0	97800,0
<b>17/02/2013</b>							55600,0	56300,0				
<b>21/02/2013</b>	29600,0	51900,0	43000,0	3610,0	55200,0	23300,0	20190,0	36500,0	43100,0	37300,0	67600,0	64100,0
<b>02/03/2013</b>	19230,0	32900,0	23600,0	1732,0	30500,0	15900,0	12680,0	21540,0	14680,0	16320,0	50000,0	49200,0
<b>07/03/2013</b>	3500,0	4820,0	4250,0	935,0	11550,0	10100,0	4490,0	7440,0	2770,0	4040,0	5880,0	10510,0
<b>12/03/2013</b>	2370,0	2370,0	2102,0	893,0	9660,0	9870,0	3370,0	5520,0	2260,0	2790,0	2690,0	4770,0
<b>20/03/2013</b>	8660,0	13880,0		1207,0	18300,0	12110,0	7370,0	12600,0	6380,0	7690,0	21250,0	26500,0
<b>27/03/2013</b>	2027,0	1740,0	1541,0	838,0	8710,0	11010,0	3080,0	4620,0	1839,0	2380,0	1751,0	2690,0
<b>04/04/2013</b>	1637,0	1422,0	1143,0	638,0	6550,0	8520,0	2270,0	3200,0	1167,0	1751,0	1200,0	1599,0
<b>14/04/2013</b>	1344,0	1206,0	1014,0	594,0	5840,0	8780,0	2042,0	2560,0	1240,0	1492,0	834,0	943,0
<b>04/05/2013</b>	1472,0	1275,0	1140,0	685,0	6630,0	9340,0	1693,0	2480,0	1407,0	1513,0	648,0	709,0

**ANEXO 3–Tabela de Emissão Atômica (mg/l) -Sódio**

<b>Data de coleta</b>	<b>LVd<sub>1</sub></b>	<b>LVd<sub>2</sub></b>	<b>GXd</b>	<b>RQo</b>	<b>FXc</b>	<b>OXfi</b>	<b>AVe</b>	<b>CXd</b>	<b>Sap</b>	<b>NVd</b>	<b>LVAd<sub>1</sub></b>	<b>LVAd<sub>2</sub></b>
<b>11/12/2012</b>						17100,0						
<b>16/12/2012</b>						12900,0						
<b>18/12/2012</b>								2700,0				
<b>19/12/2012</b>						8600,0						
<b>22/12/2012</b>							2800,0	4700,0				
<b>27/12/2012</b>						12300,0	8600,0	12500,0				
<b>03/01/2013</b>				101250,0			18300,0	15800,0	22950,0			
<b>06/01/2013</b>	30600,0		24400,0	59550,0	1900,0	6000,0	17900,0	21000,0	17100,0	23400,0		
<b>09/01/2013</b>	26400,0	29900,0	16500,0	8150,0	10140,0		21000,0	14100,0	7850,0	27000,0	28400,0	6800,0
<b>20/01/2013</b>	22000,0	29400,0	20900,0	2100,0	10700,0	5800,0	12400,0	13900,0	18500,0	15750,0	34300,0	15100,0
<b>28/01/2013</b>			21600,0	905,0	9700,0	5600,0	16850,0	13550,0	6400,0	12200,0	29900,0	40450,0
<b>08/02/2013</b>			22700,0	1815,0	11600,0	6000,0	9000,0	15800,0	8950,0	12150,0	39900,0	42550,0
<b>17/02/2013</b>	14500,0	31900,0	21500,0	315,0	9900,0	5090,0	4000,0	10800,0	4950,0	7800,0	28800,0	26750,0
<b>21/02/2013</b>	9300,0	20200,0	10500,0		13100,0	5870,0	3250,0	6650,0	5250,0	5000,0	22200,0	19750,0
<b>02/03/2013</b>	7000,0	11150,0	9200,0		6800,0	3890,0	1540,0	7200,0	4310,0	2500,0	13700,0	14350,0
<b>07/03/2013</b>	595,0	955,0	780,0	50,8	2890,0	2410,0	520,0	2120,0	535,0	750,0	1060,0	2970,0
<b>12/03/2013</b>	285,0	270,0	310,0		2200,0	2710,0	80,0	940,0	400,0	505,0	500,0	760,0
<b>20/03/2013</b>	2170,0	1860,0	2290,0		4380,0	3560,0	920,0	2990,0	1575,0	2090,0	6110,0	7790,0
<b>27/03/2013</b>	210,0	132,5	140,0		1930,0	2780,0	360,0	940,0	280,0	395,0	280,0	610,0
<b>04/04/2013</b>	211,0	63,5	139,0	15,3	1450,0	2210,0	492,5	650,0	232,0	371,0	152,5	242,5
<b>14/04/2013</b>	130,0	25,5	80,0	12,3	1170,0	1770,0	482,5	610,0	251,0	328,0	142,5	115,0
<b>04/05/2013</b>	91,0	14,0	60,0	16,3	1350,0	2200,0	297,5	540,0	282,0	308,0	92,5	75,0

**ANEXO 4–Tabela de Cromatografia Iônica (mg/l) -Cloreto**

<b>Data de coleta</b>	<b>LVd<sub>1</sub></b>	<b>LVd<sub>2</sub></b>	<b>GXd</b>	<b>RQo</b>	<b>FXc</b>	<b>OXfi</b>	<b>AVe</b>	<b>CXd</b>	<b>Sap</b>	<b>NVd</b>	<b>LVAd<sub>1</sub></b>	<b>LVAd<sub>2</sub></b>
<b>11/12/2012</b>						5880,00						
<b>16/12/2012</b>												
<b>18/12/2012</b>								10470,00				
<b>19/12/2012</b>						23500,00						
<b>22/12/2012</b>							12200,00	5540,00				
<b>27/12/2012</b>							29500,00	5210,00				
<b>03/01/2013</b>				38800,00			53700,00	3950,00				
<b>06/01/2013</b>	43500,00			30850,00	6430,00		38600,00	3610,00	17880,00	58000,00		
<b>09/01/2013</b>	36300,00	36700,00		41950,00	12330,00		58300,00	4270,00	28400,00	42500,00	32000,00	10200,00
<b>20/01/2013</b>	40200,00	2300,00	14000,00	13870,00	7260,00	4860,00	22000,00	2620,00	19560,00	32300,00	38000,00	12900,00
<b>28/01/2013</b>			54200,00	880,00	23600,00	9850,00	25750,00	25800,00	3600,00		61200,00	33150,00
<b>08/02/2013</b>			49300,00	1525,00	34500,00		33650,00	27550,00	7300,00		74400,00	36600,00
<b>17/02/2013</b>	23200,00	2610,00	44100,00	1150,00	26900,00	9600,00	18400,00	18250,00	2750,00		54800,00	47150,00
<b>21/02/2013</b>	200,00	1140,00	26600,00	1260,00	29500,00	10780,00	8300,00	14250,00	3250,00		44700,00	34000,00
<b>02/03/2013</b>	635,00	540,00	15200,00	550,00	18000,00	8200,00	3820,00	13150,00	360,00		28100,00	30900,00
<b>07/03/2013</b>	176,25	57,00	1750,00	75,50	5460,00	4660,00	840,00		640,00	1045,00	2810,00	5820,00
<b>12/03/2013</b>	108,75	14,50	4380,00	60,25	3760,00	4910,00	1380,00	2290,00	325,00	550,00	1490,00	2130,00
<b>20/03/2013</b>	638,75	119,75	5920,00	62,75	9290,00	5640,00	5610,00		1740,00	2515,00	11510,00	6120,00
<b>27/03/2013</b>	90,00		3050,00	40,75	3380,00	5040,00	4830,00		325,00	500,00	1170,00	1660,00
<b>04/04/2013</b>	191,00	67,50	170,00	23,00	2720,00	3840,00	170,00	1010,00	63,00	204,00	367,50	492,50
<b>14/04/2013</b>	138,00	42,00	78,00	17,25	2230,00	3790,00	160,00	690,00	63,00	110,00	237,50	340,00
<b>04/05/2013</b>	107,00	42,50	59,00	30,00	2640,00	3670,00	132,50	890,00	68,00	84,00	170,00	172,50