

## RESSALVA

Atendendo solicitação da autora, o texto completo desta tese será disponibilizado somente a partir de 22/04/2023.

CARLA VANESSA DE SOUSA COELHO

Gênese e caracterização geoquímica e mineralógica para  
a prospecção de argilas altamente aluminosas  
(Formação Marília)

TESE DE DOUTORADO

Rio Claro – SP

2021

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
"JULIO DE MESQUITA FILHO"  
Instituto de Geociências e Ciências Exatas  
Câmpus de Rio Claro

Carla Vanessa de Sousa Coelho

**GÊNESE E CARACTERIZAÇÃO GEOQUÍMICA E MINERALÓGICA PARA  
A PROSPECÇÃO DE ARGILAS ALTAMENTE ALUMINOSAS  
(FORMAÇÃO MARÍLIA)**

Tese de Doutorado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Geociências e Ciências Meio Ambiente

Orientadora: Profa. Dra. Vania Silvia Rosolen

Rio Claro - SP

2021

C672g

Coelho, Carla Vanessa de Sousa

Gênese e caracterização geoquímica e mineralógica para a  
prospecção de argilas altamente aluminosas (Formação Marília) /  
Carla Vanessa de Sousa Coelho. -- Rio Claro, 2021

132 p. : il., tabs., fotos, mapas

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp),  
Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro

Orientadora: Vania Silvia Rosolen

1. Geoquímica. 2. Prospecção. 3. Geomorfologia. 4. Áreas úmidas.  
5. Latossolo - Gleissolo. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de  
Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

CARLA VANESSA DE SOUSA COELHO

GÊNESE E CARACTERIZAÇÃO GEOQUÍMICA E MINERALÓGICA PARA A PROSPECÇÃO DE ARGILAS  
ALTAMENTE ALUMINOSAS (FORMAÇÃO MARÍLIA)

Tese de Doutorado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Geociências e Meio Ambiente

Comissão Examinadora

---

Profª. Dra. VANIA SILVIA ROSOLEN  
IGCE / UNESP/Rio Claro (SP)

---

Prof. Dr. CESAR AUGUSTO MOREIRA  
IGCE / UNESP/Rio Claro (SP)

---

Prof. Dr. DIEGO DE SOUZA SARDINHA  
ICT / UNIFAL/Poços de Caldas (MG)

---

Prof. Dr. ILIO RODARTE FARIA JÚNIOR  
UFU / Monte Carmelo (MG)

---

Prof. Dr. GUILHERME TAITSON BUENO  
IESA / UFG/Goiânia (GO)

Conceito: Aprovado.

Rio Claro/SP, 22 de Abril de 2021.

## Agradecimentos

Primeiramente gostaria de agradecer à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP, que financiou os projetos que permitiram a execução desta pesquisa (Processos nº 2014/01131-4 e nº 2017/14168-1) disponibilizando recursos para a realização dos campos, análises químicas e mineralógicas. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Pela CAPES (Processo 88882.434033/2019-0) foi concedida a bolsa de doutorado no programa de Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” campus Rio Claro (UNESP).

Agradeço também toda a equipe de docentes e de funcionários da UNESP, que fizeram parte de minha formação, desde a graduação até hoje. A toda a equipe do NUPEGEL, da ESALQ por todo o auxílio técnico e conceitual nas etapas de análises químicas. Ao Professor César Augusto Moreira (UNESP) por todo o auxílio na coleta e tratamento dos dados geofísicos. Ao Professor Guilherme Taitson Bueno (UFG) por toda a colaboração durante os trabalhos de campo.

Esta pesquisa só foi possível graças ao apoio e dedicação da Professora Vânia Silvia Rosolen que ao longo de todos estes anos me orientou, sempre de forma leve e com muita dedicação. Com ensinamentos e conversas que iam além da pesquisa, minha trajetória acadêmica e pessoal foi e será infinitamente melhor graças a você, Professora! Obrigada por todo o apoio sempre.

A todos os colegas, amigos e família que fizeram parte desta caminhada desde a graduação até o Doutorado, obrigada pelo suporte por todo esse tempo! Em especial agradeço aos amigos feitos na geologia, e que hoje fazem parte da minha segunda família: Thamiris, Victor, Raquel, Michele e Eduardo, sem vocês nada seria igual. Por fim, agradeço às pessoas que me apoiaram incondicionalmente ao longo desses anos: família obrigada por tudo!

## Resumo

O estudo objetivou a prospecção e caracterização geoquímica e mineralógica das argilas altamente aluminosas na região de Uberaba, formadas sobre a Formação Marília. O trabalho foi compartimentado em três escalas de estudo com aplicações de métodos e técnicas complementares: (1) métodos cartográficos e sensoriamento remoto aéreo com o uso de VANT (Veículo Aéreo Não Tripulado); (2) descrições de campo e coletas de amostras para análises químicas e mineralógicas; e (3) ensaios geofísicos. A partir dos resultados cartográficos e do uso VANT, duas áreas foram selecionadas, a primeira uma área úmida situada no topo do platô e a segunda uma área com ligação direta com o sistema de drenagem situada na borda do platô, onde são encontrados os Latossolos e Gleissolos. Para validar o modelo da gênese das argilas altamente aluminosas, que propõe que estes materiais são formados a partir do desmantelamento de couraças ferruginosas em consequência ao aumento da umidade, os ensaios geoquímicos e mineralógicos foram aplicados para sete perfis de solo, duas amostras de couraça e uma de arenito, além de dois perfis previamente estudados. Os resultados mostram que a mineralogia dos materiais é composta pela associação de caulinita, gibbsita, hematita, goethita e quartzo independente do nível de hidromorfia, e que os materiais passam por processo de dessilicificação com aumento na concentração de Al. Com os resultados da tomografia de resistividade elétrica foram confeccionados modelos 2D e 3D para as duas áreas que mostrou os padrões de distribuição dos horizontes saturados em água, a elevação do nível freático acima da superfície topográfica no período de chuva cria as condições ideais para a redução do Fe que é facilmente transportado para as partes mais baixas do platô. Além dos horizontes com água, foi delimitada a superfície da couraça, reforçando a hipótese de que a formação dos materiais altamente aluminosos está associada à presença de níveis ferruginosos encouraçados. O modelado plano da chapada, sob condições climáticas adequadas e prolongadas, favoreceu a formação de cobertura encouraçada ferruginosa. Após o término da deposição sedimentar, a superfície foi truncada por longos períodos de erosão que aplainaram o relevo. Atualmente, o clima é tropical com forte sazonalidade e aumento da umidade. Esta nova condição hídrica, de saturação, somada às condições de estabilidade tectônica e vegetação exerce influência na lixiviação e na perda ferro, proporcionando a formação dos horizontes com argilas altamente aluminosas e os resultados geoquímicos, mineralógicos e geofísicos demonstram essa relação.

**Palavras-chave:** Argila altamente aluminosa. Couraça ferruginosa. Latossolo. Gleissolo. Geofísica. Sensoriamento remoto.

## Abstract

This study aimed the prospection and geochemical and mineralogical characterization of high alumina clays in Uberaba region, developed above the Marilia Formation. The study was compartmentalized in three work scales, applying complementary methods and techniques: (1) cartographic tools and aerial remote sensing, using with unmanned aerial vehicle (UAV); (2) field descriptions and sample collection for chemical and mineralogical analysis; and (3) geophysical testing. With the cartographic and UAV results, two areas were selected, the first a wetland located at the top of the plateau and the second an area with direct connection to the drainage system at the edge of the plateau, where Oxisols and Gleysols are found. To validate the genesis model for the high alumina clays, which suggests that these materials are developed from the dismantling of ferruginous duricrusts as a consequence of the increase in humidity, the geochemical and mineralogical tests were applied to seven soil profiles, two duricrust and one sandstone sample, as well as two previously studied profiles. The results showed that the materials mineralogy is composed by the association of kaolinite, gibbsite, hematite, goethite and quartz despite the hydromorphic degree, and that the materials go thru a desilicification process with increase of Al concentration. With the results of the electrical resistivity tomography models 2D and 3D were assembled for the two sites and it showed the distribution patterns of the horizons saturated with water, the increase of the groundwater level above the topographic surface in the rain period creates the ideal conditions for Fe reduction, which is easily transported to the lower levels of the plateau. Besides the water saturated horizons, the duricrust surface was delineated, reinforcing the hypothesis that the development of the high alumina materials is connected to the presence of the iron-rich duricrusts. The flat shaped form of the plateau, under adequate and prolonged climatic conditions favored the development of ferruginous duricrusts. After the end of the sedimentary deposition, the surface was truncated by long periods of erosion that leveled the relief. Presently the climate is tropical with strong seasonality and increase of humidity. This new hydric condition, of saturation, added to the tectonic stability conditions and vegetation exerts influence in iron loss and lixiviation, allowing the formation of the high alumina clay horizons and the geochemical, mineralogical and geophysical results demonstrate this relation.

**Key-words:** High Aluminous clay. Ferruginous duricrust. Oxisol. Gleysol. Geophysics. Remote sensing.



## Índice de Figuras

Figura 1 – Localização da área de estudos, com identificação dos locais do perfil da BR-050 (P4), perfil do centro da depressão (P3), delimitação da área de coletas de dados geofísicos com a disposição dos perfis DTR1 a DTR6 e perfil VTR1 e pontos de coleta de amostras de couraça (VC1) e arenito(P11).....	18
Figura 2– Mapa geológico apresentando as unidades que compõem o Grupo Bauru (BATEZELLI; LADEIRA, 2016). .....	22
Figura 3–Vista do perfil de uma das superfícies de chapada do Triângulo Mineiro.....	27
Figura 4 – Imagem retirada do <i>Google Earth</i> identificando as duas áreas onde foram feitos os levantamentos aéreos com o uso de VANT's, bem como a coleta de dados para análises químicas, mineralógicas e morfológicas. ....	32
Figura 5 – Localização e distribuição das trincheiras na Área 1, nas quais foram coletadas as amostras de solo. ....	34
Figura 6 – Localização e distribuição dos pontos de coleta da Área 2, onde foi encontrado resquícios de couraça e arenito.....	35
Figura 7 – Distribuição e arranjo das linhas geofísicas da área 1. Modificado de Furlan, <i>et al.</i> 2020.....	38
Figura 8 – Distribuição e arranjo das linhas geofísicas da área 2.....	39
Figura 9 – Delimitação das bacias hidrográficas nas quais a área de pesquisa (retângulo vermelho) está inserida, em verde claro a Bacia do Rio Uberabinha e em rosa claro a Bacia do Rio Claro. ....	40
Figura 10– Mapa topográfico da região de Uberaba, Uberlândia e Nova Ponte, com destaque para o centro a área de estudos (retângulo vermelho). Mapa com linhas eqüidistantes em 100 metros. ....	41
Figura 11 – Mapa de declividade em razão de porcentagem de inclinação. Área de estudos delimitada pelo quadrado vermelho, onde se tem maior concentração de declividades inferiores a 7%, com declividades maiores concentradas na porção sudoeste, com delimitação da quebra de relevo entre a superfície da chapada. Declividades entre 7-15% relacionadas aos canais de drenagem e alguns pontos dispersos na superfície do platô. ....	42
Figura 12–Mapa esquemático da área de estudos, com a distribuição de solos delimitando as áreas de ocorrência dos gleissolos, latossolos, bem como as possíveis áreas de exposição de couraça, e a demarcação da Superfície Sul-Americana de King (1956) e a dissecação da	

paisagem. (Fonte: COELHO, 2017). O ponto P3 está situado entre drenagens em local onde aparecem declividades entre 7-15% apresentados no mapa de declividade (Figura 11).....	43
Figura 13 – Compartimentação de paisagem para a Área 1, elaborado a partir das imagens aéreas obtidas por VANT e com base na distribuição da vegetação, umidade do solo e descrições pedológicas adquiridas em campo. ....	44
Figura 14 – Compartimentação da paisagem para a área do perfil VTR1, a partir dos produtos obtidos por VANT, com as áreas de ocorrência dos Latossolos, Latossolos com couraça ferruginosa e Gleissolos. ....	45
Figura 15 – Modelo digital de elevação 3D com os pontos do topo do platô (DTR) e pontos do VTR1. ....	45
Figura 16– Perfil esquemático do afloramento estudado, no canteiro da rodovia BR-050, km 127. (Fonte: COELHO, 2017) .....	47
Figura 17 – Destaque do horizonte de couraça e ao horizonte plíntico: A) Horizonte de couraça e Horizonte plíntico, no qual o horizonte de couraça parece apresentar relíquias de uma estratificação sedimentar; B) Lentes de argila branca orientadas horizontalmente entre as camadas de deposição sedimentar que, em conjunto com o material argiloso amarelo, com retículo que isola concreções ferruginosas muito duras, vermelhas muito escuras; C) O nível concrecionário é constituído por concreções arredondadas vermelhas escuras ou formando estruturas laminares fraturadas e quebradas, com limites angulosos. Apresentam córtex de alteração vermelho e amarelo. Modificado de (COELHO, 2017).....	48
Figura 18 – Foto geral e foto de detalhe ilustrativa da interligação entre a matriz vermelha, branca e amarela. ....	49
Figura 19– Horizonte orgânico com transição da argila aluminosa desferruginizada (P3Aa), sobreposta a uma camada (P3Hplin) apresentando uma rede de volumes vermelhos escuros endurecidos, vermelhos e amarelos friáveis e cinza claro sobreposta por uma camada de argila aluminosa desferruginizada (Fonte: COELHO, 2017). ....	50
Figura 20 – Foto e croqui do perfil DTR1, com os quatro horizontes classificados em campo: Horizonte O, Horizonte Ag, Horizonte Bg e Horizonte Plíntico. ....	51
Figura 21 – Foto e croqui do perfil DTR2, com os cinco horizontes classificados em campo: Horizonte O1, Horizonte O2 Horizonte Ag, Horizonte Bg e Horizonte Plíntico.....	52
Figura 22 – Foto e croqui do perfil DTR3, mostrando os cinco horizontes classificados em campo: Horizonte O, Horizonte A, Horizonte Ag, Horizonte Bg e Horizonte Plíntico.....	53
Figura 23 – Foto e croqui do perfil DTR4, com os cinco horizontes classificados em campo: Horizonte A1, Horizonte A2, Horizonte Bg e Horizonte Plíntico. ....	54

Figura 24 – Foto e croqui do perfil DTR5, com os cinco horizontes classificados em campo: Horizonte A, Horizonte Ag, Horizonte Bg1, Horizonte Bg2 e Horizonte Plíntico.....	55
Figura 25 – Foto e croqui do perfil DTR6, com os quatro horizontes classificados em campo: Horizonte A, Horizonte B1, Horizonte B2, Horizonte B3. ....	57
Figura 26 – Bloco diagrama de uma topossequência a partir da compilação dos perfis DTR1, DTR2, DTR3, DTR4 e DTR5, ilustrativo da distribuição dos solos na área úmida. ....	58
Figura 27 – Foto e croqui do perfil VTR1, com os quatro horizontes classificados em campo: Horizonte O, Horizonte Ag, Horizonte Bg, e Horizonte Plíntico. ....	58
Figura 28 – Imagem mostrando as coletas de campo, onde em A) couraça fresca (VC1) de coloração vermelha forte; B) e C) couraça parcialmente desmantelada (VC2), com cor amarelada e em D) afloramento de arenito (VA) próximo ao curso da drenagem.....	60
Figura 29 – Modelo de distribuição dos solos da área de estudos, ilustrativo da transição entre as áreas úmidas, a superfície bem drenada do platô e a borda do platô onde ocorre a incisão da drenagem. ....	63
Figura 30 – Distribuição das linhas geofísicas dispostas na área 1, próximo do perfil DTR1, no centro da área úmida com indicação de direção. Modificado de FURLAN, 2019.....	99
Figura 31 – Fotografias da área 1 nas quais são apresentadas: (A) vista lateral da área úmida onde foram feitos os levantamentos geofísicos; (B) fotografia do equipamento e posicionamento da linha geofísica; (C) fotografia de uma das linhas de aquisição de dados..	99
Figura 32 – Distribuição das linhas geofísicas e arranjo de sete linhas na área de estudos, com a incisão da drenagem bem marcada. ....	100
Figura 33 – Modelos de inversão 2-D da área 1, apresentando as linhas 1 a 5. Destacando as áreas com menores valores de resistividade, que são interpretados como zonas de maior umidade. E zonas com valores intermediários a altos, que são interpretados como zonas de impedimento do fluxo vertical. Modificado de FURLAN, 2019. ....	101
Figura 34 – Modelos de inversão 2-D da área 1, apresentando as linhas 6 a 10. Destacando as áreas com menores valores de resistividade, que são interpretados como zonas de maior umidade. E zonas com valores intermediários a altos, que são interpretados como zonas de impedimento do fluxo vertical. Modificado de FURLAN, 2019. ....	102

## Índice de Gráficos

Gráfico 1 – Gráfico mostrando a variação no teor de óxidos de SiO <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> e Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> dos solos em relação à profundidade nos perfis estudados. ....	75
Gráfico 2 – Gráfico de balanço transferência geoquímica dos teores de Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , SiO <sub>2</sub> para os perfis estudados. ....	84
Gráfico 3 – Resultados dos cálculos com base nas proporções molares dos óxidos para os índices Sílica-sesquióxido ratio (Kr) e Sílica to alumina ratio (Ki). ....	85
Gráfico 4 – Gráfico CIA ( <i>Chemical Index of Alteration</i> ) para as amostras, indicativo de elevada taxa de intemperismo. ....	86
Gráfico 5 – Diagrama ternário de Schelmann (1994, 2003) (SiO <sub>2</sub> , Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) em proporções moleculares para as amostras dos perfis DTR1 a DTR6, P3 e P4, couraças e com destaque para o Arenito (P11). ....	87
Gráfico 6 - Diagrama ternário de Nesbitt & Young (1982) (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , K <sub>2</sub> O, CaO + Na <sub>2</sub> O) em proporções moleculares para as amostras dos perfis DTR1 a DTR6, P3 e P4, couraças e com destaque para o Arenito (P11). ....	88
Gráfico 7 – Resultados de Difração de Raios X obtidos para as amostras do (A) Perfil DTR1e (B) Perfil DTR2. Legenda: Kln - caulinita; Gbs – gibbsita; Ant – anatásio; Qtz - quartzo; Zrn – zircão; Rt – rutilo; Gt – goethita. ....	90
Gráfico 8 – Resultados de Difração de Raios X obtidos para as amostras dos perfis: (A) Perfil DTR3; (B) Perfil DTR4; (C) Perfil DTR5; e (D) Perfil DTR6. Legenda: Kln - caulinita; Gbs – gibbsita; Ant – anatásio; Gt – Goethita; Qtz - quartzo; Zrn– zircão; Hem - hematita. ....	91
Gráfico 9 – Resultados de Difração de Raios X obtidos para as amostras do Perfil VTR1. Legenda: Kln - caulinita; Gbs – gibbsita; Ant – anatásio; Qtz - quartzo; Gt – goethita; Zrn – zircão; Hem – hematita. ....	92
Gráfico 10 – Resultados de Difração de Raios X obtidos para as amostras do Perfil VTR1: (A) separando manchas amarelas, vermelhas e cinza. (B) as amostras de couraça (C) para as amostras de arenito (V-A1), argila aluminosa do perfil VTR1 (VTR1-55-Bg), e de argila branca encontrada na dissecação (Voçoroca Argila Branca). (D) para as amostras de argila aluminosa do perfil VTR1 (VTR1-55-Bg), e de argila branca encontrada na dissecação (Voçoroca Argila Branca) e do horizonte plúntico (VTR1-119-C1). Legenda: Kln - caulinita; Gbs – gibbsita; Qtz - quartzo; Hem - hematita; Zrn– zircão; Ant – anatásio; Gt – goethita; Ms – muscovita. ....	93

Gráfico 11 – Difractogramas de raios X da amostra bruta do (A) perfil do centro da depressão (P3); e (B) tradagem do perfil P3 (Trad.P3). Legenda: Kln - caulinita; Gbs - gibbsita; Qtz - quartzo; Hem - hematita; Gt - goethita; Ant - anatásio. amostra bruta da.....	94
Gráfico 12 – Difractogramas de raios X da fração argila: (A) do perfil do centro da depressão (P3); e (B) das amostras obtidas por trado (Trad. P3) no perfil do centro da depressão (P3). Legenda: Mca - mineral micáceo; Kln - caulinita; Gbs - gibbsita; Qtz - Quartzo; Hem - hematita; Gt – goethita; Ant - anatásio; Zrn - zircão.....	95
Gráfico 13 – Difractogramas de raios X fração areia do perfil P4 e Trad. P4. Legenda: Kln - caulinita; Hem – hematita, Rt - rutilo; Gt - goethita; Qtz - quartzo; Zrn - zircão. ....	96
Gráfico 14 – Difractogramas de raios X fração argila do perfil P4. Legenda: Kln - caulinita; Gt - goethita; Gbs - gibbsita; Hem - hematita; Ant - anatásio; Qtz - quartzo; Rt - rutilo.....	96
Gráfico 15 - Difractogramas de raios X fração total: (A) das manchas vermelhas do perfil P4 comparadas à mancha vermelha do perfil VTR1; e (B) da mancha amarela do perfil P4 comparada à mancha amarela do perfil VTR1. Legenda: Kln - caulinita; Qtz - quartzo; Gbs - gibbsita; Gt - goethita; Hem – hematita, Zrn - zircão.....	97
Gráfico 16 – Resultados de Difração de Raios X obtidos para as amostras de argila aluminosa do perfil VTR1 (VTR1-55-Bg), e de argila branca encontrada na dissecação (Voçoroca Argila Branca) e argila aluminosa do perfil P3 (P3 – Aa). Legenda: Kln - caulinita; Gbs – gibbsita; Qtz– quartzo; Ant – anatásio; Gt - goethita; Zrn - zircão.....	97

## Índice de Tabelas

Tabela 1 – Tabela de óxidos totais mostrando os resultados para cada perfil descrito. ....	76
Tabela 2 – Medidas descritivas para os valores da variável $\text{Fe}_3\text{O}_2$ . ....	79
Tabela 3 – Medidas descritivas para os valores da variável $\text{Al}_2\text{O}_3$ . ....	80
Tabela 4 – Medidas descritivas para os valores da variável $\text{SiO}_2$ . ....	81
Tabela 5 – Balanço de transferência geoquímica com Ti invariante.....	82

## Sumário

1. Introdução .....	13
2. Importância do tema e Objetivos .....	15
2.1 Objetivos .....	17
3. Localização e Aspectos Geográficos .....	18
3.1 Localização da Área.....	18
3.2 Aspectos Geográficos .....	19
4. Geologia Regional.....	21
4.1 Contexto Geológico Regional: Evolução do Conhecimento Geológico na Região do Triângulo Mineiro.....	21
4.2 A Bacia Bauru .....	21
4.2.1 Litoestratigrafia da Bacia Bauru.....	23
4.3 O Grupo Bauru.....	23
4.3.1 Formação Adamantina .....	24
4.3.2 Formação Uberaba .....	25
4.3.3 Formação Marília .....	25
5. Materiais e Métodos.....	30
5.1 Compartimentação topográfica e distribuição dos solos .....	30
5.2 Caracterização geoquímica e mineralógica dos solos.....	33
5.2.1 Descrição e Coleta de Amostras no Campo .....	33
5.2.2 Confecção de Lâminas e Descrição Petrográfica do Perfil .....	36
5.2.3 Análise Química Total.....	36
5.2.4 Composição Mineralógica por Difração de raios X (DRX).....	37
5.3 Ensaio geofísicos para a espacialização de depósitos de argilas altamente aluminosas.....	37
6. Resultados e Discussões.....	40
6.1 A paisagem pedogeomorfológica e a hidrologia da chapada.....	40
6.2 Descrição, caracterização geoquímica e mineralógica dos solos.....	46
6.2.1 Descrição dos solos .....	46
6.2.2 Caracterização petrográfica .....	64
6.2.3 Composição química .....	74
6.2.4 Caracterização mineralógica por Difractometria de Raios X .....	90
6.3 Ensaio geofísicos - Eletroresistividade .....	98
6.3.1 Distribuição das linhas geofísicas .....	98
6.3.2 Modelos 2D e 3D .....	100
7. Conclusões .....	122
8. Bibliografia .....	124

## 1. Introdução

---

No Brasil e na maior parte dos solos das regiões tropicais, horizontes pisolíticos ou crostas enriquecidas com ferro e/ou manganês em Latossolos são encontrados em platôs cobertos por vegetação típica de savana e indicam processos antigos e atuais de intemperismo e pedogênese (EZE; UDEIGWE; MEADOWS, 2014). Apesar de sua ampla extensão e distribuição nestas regiões, é comum haver dúvidas acerca da filiação entre as formações ferruginosas, a rocha fonte e a influência de fatores ambientais, erosivos e deposicionais que regem a evolução da paisagem (BEAUVAIS; ROQUIN, 1996; BUTT; LINTERN; ANAND, 2000). Esta questão é atribuída à presença de espessos mantos de intemperismo formados sobre todas as litologias e desenvolvem uma matriz secundária argilosa profundamente diferente do material original, de acordo com suas características morfológicas, mineralógicas e geoquímicas (BUTT; LINTERN; ANAND, 2000).

As substâncias minerais secundárias mais importantes economicamente e que estão relacionadas com os ambientes de alteração tropical são os caulins e as bauxitas. O termo caulim, derivado da palavra chinesa “Kao-ling”, um vilarejo na província de Jiangxi, na China, é empregado para designar um grupo de silicatos hidratados de alumínio, no qual a caulinita é o mineral mais abundante e comercialmente valioso (EKOSSE; MWITONDI, 2015; ADEOYE; OMOLEYE; OJEWUMI, 2018). É um dos materiais formados durante a pedogênese tropical e tem sua gênese majoritariamente relacionada a perfis lateríticos maduros (COSTA; SOUSA; ANGÉLICA, 2009).

Por sua vez, a bauxita foi descrita pela primeira vez por Berthier em 1821 em LesBaux, no sudeste da França, onde ocorriam sedimentos de aspecto argiloso composto majoritariamente por alumina e óxidos de ferro (GOW; LOZEJ, 1993; AUTHIER-MARTIN *et al.*, 2001; PAZ, 2016; ABAL, 2017). Atualmente o termo é utilizado para produtos residuais de alteração, litificados ou inconsolidados, ricos em alumina e pobres em álcalis e sílica (GOW; LOZEJ, 1993). A composição mineralógica deste produto consiste em hidróxidos e oxi-hidróxidos de alumínio, principalmente gibbsita, boehmita e diásporo, e outros minerais como hematita, caulinita, goethita e quartzo, os quais são considerados impurezas no processo de beneficiamento para a extração de alumínio (HARDER, 1949; AUTHIER-MARTIN *et al.*, 2001; REDDY; RAMESH; KUMAR, 2015; RENAUD; WARDLAW; HUBBARD, 2015; PAZ, 2016). Com base nos aspectos econômicos, são classificados como “bauxita” minérios de alumínio com mais de 30% de  $Al_2O_3$  e razão  $Al_2O_3:SiO_2 > 2,6$  (PAZ, 2016; ABAL, 2017; YU *et al.*, 2018).



O caulim é aplicado em diversos segmentos industriais e seu uso é determinado por suas propriedades funcionais como tamanhos dos cristais, forma e estruturação das camadas, além das características reológicas como a química e as propriedades ópticas que agregam o valor industrial. Podem ser aplicados como preenchimentos funcionais, coberturas, pigmentos e extensor em muitas aplicações industriais das quais o papel e cerâmica são os maiores consumidores (EKOSSE, 2010; QIU *et al.*, 2013; KOESTEL; JORDA, 2014; YAYA *et al.*, 2017). O Brasil comporta uma das maiores concentrações de caulim e bauxita do mundo, juntamente com os Estados Unidos da América, Índia, Alemanha, China e República Tcheca. Estes países geraram 66,9% da produção total, cerca de 36 milhões de toneladas no ano de 2015 (COSTA; SOUSA; ANGÉLICA, 2009; DNPM, 2016).

A área de estudo está situada no contexto regional das chapadas do Triângulo Mineiro, entre os municípios de Uberaba e Uberlândia, onde a base litológica é representada pelos arenitos da Formação Marília. Os solos dos planaltos tabulares são muito argilosos e freqüentemente comportam horizontes pisolíticos, além de concentrarem depósitos de argila altamente aluminosa, enriquecidas em caulinita, algumas em fase de exploração, descritos em estudos anteriores (por exemplo, SUGUIO; BARCELLOS; MONIZ, 1976; ZAMBRANO, 1981 *apud* CORRÊA, 2006) os quais parecem ser o produto do intenso e longo processo de evolução supérgena tropical. Estas superfícies são consideradas ambientes-chave para a compreensão de processos pedogeoquímicos atuais que resultam em mudanças das características físico-químicas e mineralógicas dos solos e das perdas e enriquecimentos geoquímicos.

O trabalho de Coelho (2017) sugere uma hipótese acerca da gênese dos depósitos encontrados nos planaltos do Triângulo Mineiro, no qual propõe que o arenito do Membro Serra da Galga evoluiu para um perfil laterítico endurecido após profunda alteração química e que as atuais condições bioclimáticas são responsáveis pela desestabilização e transformação deste material. Os perfis lateríticos formados ao longo de vários ciclos de mudanças paleoambientais apresentam feições de degradação mecânica e de dissolução que são usadas como registros para interpretação dos processos (HARDER, 1949; BEAUVAIS; ROQUIN, 1996; BEAUVAIS, 1999; CHIGIRA; OYAMA, 2000; BOGATYREV; ZHUKOV; TSEKHOVSKY, 2009; FRITSCH *et al.*, 2011; YU *et al.*, 2018; BEDASSA; GETANEH; HAILU, 2019). Um exemplo é a formação de redes de argila desferruginizada ricas em alumínio que evolui em condições de aumento da umidade climática e de água do solo (HONG *et al.*, 2009, 2010).

## 7. Conclusões

---

A pesquisa foi norteada pela hipótese de que os materiais enriquecidos em argilas altamente aluminosas são originados a partir das couraças ferruginosas presentes nas chapadas da região. Os resultados obtidos neste estudo reforçam que as couraças são fundamentais no desenvolvimento das argilas aluminosas, tanto por ser considerada material fonte, quanto por seu papel na restrição do fluxo hídrico no topo dos platôs. Tal restrição proporciona o acúmulo de água e influencia na formação das áreas úmidas, onde os solos enriquecidos em alumínio são encontrados.

Dessa forma, a cartografia e a compartimentação de paisagem permitem estabelecer a estreita relação entre os compartimentos morfológicos e seus constituintes: as couraças encontradas nas bordas da chapada ou expostas na vertente e as áreas úmidas encontradas nas porções mais rebaixadas na posição de interflúvio do platô. As duas áreas estudadas indicam os estágios de evolução da paisagem através do encaixamento da rede de drenagem atual transformando os materiais lateríticos ferruginizados mais antigos. A dinâmica atual caracterizada como um processo de transformação pedológica é determinante para a formação de novas assembléias minerais em um material que apresenta profundas mudanças estruturais e químicas, em razão da mudança de perfis de solo formados em condições satisfatórias de drenagem para perfis com saturação hídrica longa e periódica.

A partir da caracterização petrográfica, química e mineralógica foi possível concluir que a transformação das crostas ferruginosas em gleissolos com argilas altamente aluminosas ocorreu em etapas sequenciais:

- Os latossolos argilosos com crostas ferruginosas foram desenvolvidos a partir dos arenitos do Membro Serra da Galga. Esta fase laterítica pedogenética somente foi possível devido às condições oxidativas e bem drenadas pelas quais o material ficou submetido desde o final da sedimentação (65 milhões de anos), e após o estabelecimento da superfície Sul-Americana. As condições paleoclimáticas, tempo de exposição e estabilidade tectônica foram fatores determinantes na formação do perfil laterítico.
- O aumento de umidade no solo e sua consequente saturação, propiciaram o desenvolvimento dos horizontes manchados e desferruginizados, possivelmente com a mudança para períodos mais quente e úmidos desde pelo menos 4.600 milhões de anos (início do Plioceno), com elevação generalizada do nível freático nos platôs. Atualmente, o nível freático mais elevado no platô

gera horizontes saturados, com dissolução da crosta ferruginosa e formação dos perfis de gleissolo. Com a hidromorfia ocorre a saída do ferro e consequente compactação estrutural e concentração e enriquecimento de horizontes de solo em alumínio.

Estas informações são fundamentais para a pesquisa e prospecção de áreas com concentração de argilas altamente aluminosas, ou seja, as áreas úmidas representam o local com maior potencial de enriquecimento em alumínio nestes materiais.

O levantamento geofísico permitiu ilustrar a arquitetura dos horizontes em subsuperfície e avaliar o padrão de distribuição dos horizontes saturados em água. Ao combinar as técnicas de tomografia de resistividade elétrica com a morfologia do solo e dados geoquímicos, foi possível estabelecer um modelo genético da forma de ocorrência das argilas altamente aluminosas. Este modelo é baseado na hipótese da presença de um material que limita ou impede o fluxo contínuo da água nas áreas úmidas, com aumento do tempo de saturação do solo e favorecimento do dismantelamento de materiais mais duros (couraça) e a formação dos solos altamente argilosos nestes locais.

Os resultados combinados permitiram identificar que as argilas altamente aluminosas são encontradas apenas nas áreas úmidas do platô, e formam um *continuum* entre as áreas úmidas e latossolos na paisagem. Onde ocorre redução e transferência para a água dos óxido-hidróxidos de Fe originalmente associados aos argilominerais e matéria orgânica, pode ocorrer de forma associada a decomposição anaeróbica da matéria orgânica pelos microrganismos heterotróficos. A elevação do nível freático acima da superfície topográfica no período de chuva produz condições ideais para a redução do Fe, facilmente transportado para as partes mais baixas do relevo, por fluxo lateral sentido ao centro da depressão.

Foi possível detalhar a relação entre os distintos materiais superficiais a partir da combinação de técnicas de sensoriamento remoto, geofísica, análises químicas, petrográficas e mineralógicas.

Baseado na premissa de que o material enriquecido em alumínio está exposto apenas nas áreas úmidas do platô, sensoriamento remoto e a geofísica são ferramentas eficazes para delimitar a ocorrência desse material em projetos de pesquisa mineral. A lavra de tais materiais é inevitável, contudo, estas atividades de extração podem ser conduzidas de forma criteriosa e controlada para preservação de ecossistemas e redução dos impactos ambientais.

## 8. Bibliografia

---

- AB'SÁBER, A. N. Contribuição à geomorfologia da área dos cerrados. In: **Simpósio sobre o cerrado**. São Paulo: EDUSP, 1971. p. 97–103.
- ABAL, A. B. DO A. **Bauxita no Brasil**. São Paulo: Gráfica Mundo, 2017.
- ABEM, A. I. **Terrameter LS Instruction Manual**. Sweden: ABEM Instrument Sundbyberg, 2012.
- ABIT, S. M. et al. Solute transport in the capillary fringe and shallow groundwater: field evaluation. **Vadose Zone Journal**, v. 7, n. 3, p. 890–898, 2008.
- ADEOYE, J. B.; OMOLEYE, J. A.; OJEWUMI, M. E. Development of alum from kaolin deposit using response surface methodology. **MOJ Bioorganic & Organic Chemistry**, v. 2, n. 3, p. 167–170, 2018.
- ALMEIDA, M. A. DE et al. **Geologia do Oeste Paulista e áreas fronteiriças dos estados de Mato Grosso do Sul e Paraná**. Congresso Brasileiro de Geologia. **Anais...**1980
- AUTHIER-MARTIN, M. et al. The mineralogy of bauxite for producing smelter-grade alumina. **Jom**, v. 53, n. 12, p. 36–40, 2001.
- BALDWIN, D.; NAITHANI, K. J.; LIN, H. Combined soil-terrain stratification for characterizing catchment-scale soil moisture variation. **Geoderma**, v. 285, p. 260–269, 2017.
- BARCELOS, J. H. **Reconstrução paleogeográfica da sedimentação do Grupo Bauru baseada na sua redefinição estratigráfica parcial em território paulista e no estudo preliminar fora do Estado de São Paulo**. Rio Claro: Universidade Estadual Paulista, 1984.
- BARCELOS, J. H.; LANDIM, P. M. B.; SUGUIO, K. Análise estratigráfica das seqüências cretácicas do Triângulo Mineiro (MG) e suas correlações com as do Estado de São Paulo. **Simpósio Regional de Geologia**, v. 3, p. 90–102, 1981.
- BASILICI, G.; DAL BÓ, P. F. F.; LADEIRA, F. S. B. Climate-induced sediment-palaeosol cycles in a Late Cretaceous dry aeolian sand sheet: Marília formation (North-West Bauru Basin, Brazil). **Sedimentology**, v. 56, n. 6, p. 1876–1904, 2009.
- BASILICI, G.; SGARBI, G. N.; DAL'BÓ, P. F. F. A sub-Bacia Bauru: um Sistema Continental entre deserto e cerrado. In: HASUI, Y. et al. (Eds.). **Geologia do Brasil**. Primeira ed. São Paulo: Beca, 2012. p. 520–543.
- BATEZELLI, A. **Análise da sedimentação cretácea no Triângulo Mineiro e sua correlação com áreas adjacentes**. Rio Claro: Universidade Estadual Paulista, 2003.
- BATEZELLI, A. et al. Análise estratigráfica aplicada à Formação Araçatuba (Grupo Bauru - KS) no Centro-Oeste do Estado de São Paulo. **Geociências**, v. 22, n. Especial, p. 5–19, 2003.
- BATEZELLI, A.; LADEIRA, F. S. B. Stratigraphic framework and evolution of the Cretaceous continental sequences of the Bauru, Sanfranciscana, and Parecis basins, Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 65, p. 1–24, 2016.
- BEAUVAIS, A. Geochemical balance of lateritization processes and climatic signatures in weathering profiles overlain by ferricretes in Central Africa. **Geochimica et Cosmochimica**

*Acta*, v. 63, n. 23–24, p. 3939–3957, 1999.

BEAUVAIS, A. et al. Combined ERT and GPR methods for investigating two-stepped lateritic weathering systems. *Geoderma*, v. 119, n. 1–2, p. 121–132, 2004.

BEAUVAIS, A.; ROQUIN, C. Petrological differentiation patterns and geomorphic distribution of ferricretes in Central Africa. *Geoderma*, v. 73, n. 1–2, p. 63–82, 1996.

BEDASSA, G.; GETANEH, W.; HAILU, B. Geochemical and mineralogical evidence for the supergene origin of kaolin deposits – Central Main Ethiopian Rift. *Journal of African Earth Sciences*, v. 149, p. 143–153, 2019.

BERTINI, R. J.; SANTUCCI, R. M.; ARRUDA-CAMPOS, A. C. Titanossauros (Sauropoda: Saurischia) no Cretáceo Superior continental (Formação Marília, Membro Echaporã) de Monte Alto, estado de São Paulo, e correlação com formas associadas do Triângulo Mineiro. *Geociências*, v. 20, n. 1, p. 93–103, 2001.

BISH, D. L.; VON DREELE, R. B. Rietveld refinement of non-hydrogen atomic positions in kaolinite. *Clays and Clay Minerals*, v. 37, n. 4, p. 289–296, 1989.

BOGATYREV, B. A.; ZHUKOV, V. V.; TSEKHOVSKY, Y. G. Formation conditions and regularities of the distribution of large and superlarge bauxite deposits. *Lithology and Mineral Resources*, v. 44, n. 2, p. 135–151, 2009.

BOULET, R. Toposéquences de sols tropicaux en Haute-Volta : équilibre et déséquilibre pédobioclimatique. *Mémoires ORSTOM*, v. 8, n. 1, p. 3–6, 1975.

BRIMHALL, G. H. et al. Quantitative geochemical approach to pedogenesis: importance of parent material reduction, volumetric expansion, and eolian influx in lateritization. *Geoderma*, v. 51, n. 1–4, p. 51–91, 1991.

BUTT, C. R. M.; LINTERN, M. J.; ANAND, R. R. Evolution of regoliths and landscapes in deeply weathered terrain - implications for geochemical exploration. *Ore Geology Reviews*, v. 16, n. 3–4, p. 167–183, 2000.

BUTT, C. R. M.; ZEEGERS, H. Classification of geochemical exploration models for tropically weathered terrains. *Journal of Geochemical Exploration*, v. 32, n. 1–3, p. 65–74, 1989.

CARY, L.; TROLARD, F. Effects of irrigation on geochemical processes in a paddy soil and in ground waters in Camargue (France). *Journal of Geochemical Exploration*, v. 88, n. 1–3 SPEC. ISS., p. 177–180, 2006.

CHADWICK, O. A.; BRIMHALL, G. H.; HENDRICKS, D. M. From a black to a gray box - a mass balance interpretation of pedogenesis. *Geomorphology*, v. 3, n. 3–4, p. 369–390, 1990.

CHIGIRA, M.; OYAMA, T. Mechanism and effect of chemical weathering of sedimentary rocks. *Engineering Geology*, v. 55, n. 1–2, p. 3–14, 2000.

COELHO, C. V. DE S. **Caracterização petrográfica, geoquímica e mineralógica do arenito da Formação Marília e processos de alteração**. Rio Claro: Universidade Estadual Paulista, 2017.

COELHO, C. V. DE S.; ROSOLEN, V. Caracterização morfológica, mineralógica e química dos níveis de alteração da Formação Marília (membro Serra da Galga) do Neocretáceo da Bacia Bauru, no Triângulo Mineiro (MG). **Pesquisas em Geociências**, v. 43, n. 2, p. 139–151, 2016.

CORRÊA, W. L. P. **Contribuição à gênese e caracterização tecnológica das argilas da região de Uberaba, Minas Gerais**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2006.

CORTÊS, A. R. P. et al. Geophysical and Metallogenetic Modelling of the Copper Occurrence in Camaquã Sedimentary Basin, Brazilian Southern. **Pure and Applied Geophysics**, v. 176, n. 11, p. 4955–4968, 2019.

COSTA, A. C. S. DA; BIGHAM, J. M. Óxidos de ferro. In: MELO, V. F. .; ALLEONI, L. R. F. (Eds.). . **Química e mineralogia do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do solo Viçosa, 2009. p. 506–572.

COSTA, M. L. DA; SOUSA, D. J. L.; ANGÉLICA, R. S. The contribution of lateritization processes to the formation of the kaolin deposits from eastern Amazon. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 27, n. 2–3, p. 219–234, 2009.

CPRM, C. DE P. DE R. M. **Mapa geológico do estado de Minas Gerais escala 1:1.000.000**. [s.l: s.n.].

DEMATTE, J. A. M.; ALOISI, R. R.; DEMATTE, J. L. I. Sequência Latossolo Amarelo - Podzólico Amarelo - Areias Quartzosas Sob Material Da Formação Barreiras Na Região De Tucuruí. 1984.

DENG, Y.; STUMM, W. Kinetics of redox cycling of iron coupled with fulvic acid. **Aquatic Sciences**, v. 55, n. 2, p. 103–111, 1993.

DHAKATE, R. et al. Application of ground-penetrating radar for identification of groundwater resources in a coastal terrain. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 8, n. 7, p. 4703–4715, 2015.

DIAS-BRITO, D. et al. Grupo Bauru: uma unidade continental do Cretáceo no Brasil-concepções baseadas em dados micropaleontológicos, isotópicos e estratigráficos. **Revue de Paléobiologie**, v. 20, n. 1, p. 245–304, 2001.

DJI. User Manual Phantom 4 PRO V1.0. **Dji P4P**, 2016.

DNPM, D. N. DE P. M. **Sumário Mineral 2016**. Brasil: Departamento Nacional de Produção Mineral, 2016. Disponível em: <<http://www.anm.gov.br/dnpm/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/sumario-mineral/sumario-mineral-brasileiro-2016>>.

EKOSSE, G. I. E. Kaolin deposits and occurrences in Africa: Geology, mineralogy and utilization. **Applied Clay Science**, v. 50, n. 2, p. 212–236, 2010.

EKOSSE, G. I. E.; MWITONDI, K. S. Principal component analysis to evaluate the spatial variation of major elements in kaolin deposit. **Bulletin of the Chemical Society of Ethiopia**, v. 29, n. 1, p. 41–51, 2015.

ELTNER, A. et al. Multi-temporal UAV data for automatic measurement of rill and interrill erosion on loess soil. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 40, n. 6, p. 741–755, 2015.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro: Centro nacional de Pesquisa de Solos. Brasília, Serviço de Produção de Informação, 2018.

EVANS, C. V.; FREELAND, J. A. Wetland soils of basins and depressions of glacial terrains. In: **Wetland Soils: Genesis, Hydrology, Landscapes, and Classification**. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2000. p. 251.

EZE, P. N.; UDEIGWE, T. K.; MEADOWS, M. E. Plinthite and its associated evolutionary forms in soils and landscapes: A Review. **Pedosphere**, v. 24, n. 2, p. 153–166, 2014.

FANNING, D. S.; FANNING, M. C. B. **Soil morphology, genesis and classification**. New York: John Wiley and Sons Inc., 1989.

FAO. **Guidelines for soil description**. Rome: ISRIC - World Soil Information; International Soil Reference and Information Centre; ICSU World Data Centre for Soils, 2006.

FERNANDES, L. A. **A cobertura cretácea suprabasáltica no Paraná e Pontal do Paranapanema (SP): os grupos Bauru e Caiuá**. [s.l.] Universidade de São Paulo, 1992.

FERNANDES, L. A. **Estratigrafia e evolução geológica da parte oriental da Bacia Bauru (Ks, Brasil)**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 1998.

FERNANDES, L. A. Mapa litoestratigráfico da parte oriental da Bacia Bauru (PR, SP, MG), escala 1:1.000.000. **Boletim Paranaense de Geociências**, n. 55, p. 53–66, 2004.

FERNANDES, L. A.; BASILICI, G. Transition of ephemeral palustrine to aeolian deposits in a continental arid - semi-arid environment (Upper Cretaceous Bauru Basin, Brazil). **Cretaceous Research**, v. 30, n. 3, p. 605–614, 2009.

FERNANDES, L. A.; COIMBRA, A. M. O Grupo Caiuá (Ks): revisão estratigráfica e contexto deposicional. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 24, n. 3, p. 164–176, 1994.

FERNANDES, L. A.; COIMBRA, A. M. Revisão estratigráfica da parte oriental da bacia Bauru (Neocretáceo). **Revista Brasileira de Geociências**, v. 30, n. 4, p. 717–728, 2000.

FRITSCH, E. et al. Lateritic and redoximorphic features in a faulted landscape near Manaus, Brazil. **European Journal of Soil Science**, v. 53, n. 2, p. 203–217, 2002.

FRITSCH, E. et al. From Plinthic Acrisols to Plinthosols and Gleysols: iron and groundwater dynamics in the tertiary sediments of the upper Amazon basin. **European Journal of Soil Science**, v. 58, n. 5, p. 989–1006, 2007.

FRITSCH, E. et al. Deciphering the weathering processes using environmental mineralogy and geochemistry: Towards an integrated model of laterite and podzol genesis in the Upper Amazon Basin. **Comptes Rendus Geoscience**, v. 343, n. 2–3, p. 188–198, 2011.

FURLAN, L. M. **Hidrodinâmica em área úmida de cerrado na chapada sedimentar do oeste mineiro**. Rio Claro: Universidade Estadual Paulista, 2019.

FURLAN, L. M. et al. Natural superficial water storage and aquifer recharge assessment in Brazilian savanna wetland using unmanned aerial vehicle and geophysical survey. **Journal of Unmanned Vehicle Systems**, v. 8, n. 3, p. 224–244, 1 set. 2020.

GOLDBERG, K.; HUMAYUN, M. The applicability of the Chemical Index of Alteration as a paleoclimatic indicator: An example from the Permian of the Paraná Basin, Brazil.

**Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 293, n. 1–2, p. 175–183, 2010.

GOOGLE INC. **Google Earth Pro**, 2019. Disponível em: <<https://www.google.com.br/intl/pt-BR/earth/>>

GOW, N.; LOZEJ, G. Bauxite. **Geoscience Canada**, v. 20, n. 1, p. 9–16, 1993.

GRAVINA, É. G. et al. Proveniência de arenitos das Formações Uberaba E Marília (Grupo Bauru) e do garimpo do Bandeira : implicações para a controvérsia sobre a fonte do diamante do Triângulo Mineiro. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 32, n. 4, p. 545–558, 2002.

GREER, B. M. et al. Electrical resistivity imaging of hydrologic flow through surface coal mine valley fills with comparison to other landforms. **Hydrological Processes**, v. 31, n. 12, p. 2244–2260, 2017.

GRYBOS, M. et al. Increasing pH drives organic matter solubilization from wetland soils under reducing conditions. **Geoderma**, v. 154, n. 1–2, p. 13–19, 2009.

HARDER, E. C. Stratigraphy and Origin of Bauxite Deposits. **Bulletin of the Geological Society of America**, v. 60, n. May 1949, p. 887–907, 1949.

HEATH, R. C. **Basic elements of ground-water hydrology with reference to conditions in North Carolina**. Raleigh, North Carolina - USA: US Department of the Interior, Geological Survey, 1980. v. 80

HONG, H. et al. Kaolin in the net-like horizon of laterite in Hubei, south China. **Clay Minerals**, v. 44, n. 1, p. 51–66, 2009.

HONG, H. et al. Red soils with white net-like veins and their climate significance in south China. **Geoderma**, v. 160, n. 2, p. 197–207, 2010.

HUNKE, P. et al. Soil changes under different land-uses in the Cerrado of Mato Grosso, Brazil. **Geoderma Regional**, v. 4, p. 31–43, 2015.

IEDE. **Infraestrutura Gerais, de Dados Espaciais de Minas Estadual**. Disponível em: <<http://iede.fjp.mg.gov.br/Catalogo.html>>.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Imagens LANDSAT**. Disponível em: <<http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>>.

JAMAGNE, M. et al. Quelques conceptions actuelles sur l'analyse spatiale en pédologie. **Science du sol**, v. 31, n. 3, p. 141–169, 1993.

KELLER, W. D. **The Principles of Chemical Weathering**. Columbia, Missouri: Lucas Brothers Publishers, 1968. v. 80

KING, L. C. A geomorfologia do Brasil Oriental. **Revista Brasileira De Geografia**, v. 2, p. 1–147, 1956.

KOESTEL, J.; JORDA, H. What determines the strength of preferential transport in undisturbed soil under steady-state flow? **Geoderma**, v. 217–218, p. 144–160, 2014.

LILIENFEIN, J.; WILCKE, W. Erratum: Water and element input into native, agri- And silvicultural ecosystems of the Brazilian savanna (Biogeochemistry 67 (183-212)). **Biogeochemistry**, v. 68, n. 1, p. 131–133, 2004.



- LOKE, M. H. Rapid 2D Resistivity & IP Inversion using the least-squares method. **Geotomo Software, Manual**, v. 122, 2003.
- MAGNIEN, R. **Review of research on laterites: Natural Resources Research IV**. Vaillant-Carmanne, Liege: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, 1966.
- MARQUES, J. J. et al. Major element geochemistry and geomorphic relationships in Brazilian Cerrado soils. **Geoderma**, v. 119, n. 3–4, p. 179–195, 2004.
- MCLACHLAN, P. J. et al. Geophysical characterisation of the groundwater–surface water interface. **Advances in Water Resources**, v. 109, p. 302–319, 2017.
- MELFI, A. J. Brazilian bauxite deposits: a review. In: CARVALHO, A. BOULANGÉ, B. MELFI, A. J.; LUCAS, Y. (Eds.). **Brazilian bauxites**. Sao Paulo - Paris: USP-FAPESP-ORSTOM, 1997. p. 3–22.
- MILANI, E. J. et al. Bacia do Paraná. **Boletim de Geociências da Petrobrás**, v. 15, n. 2, p. 265–287, 2007.
- MOREIRA, C. A. et al. Geoelectric Modeling of Supergenic Manganese Occurrence in Heliadora Region, Southern Minas Gerais. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 34, n. 3, p. 299–308, 2017.
- MOREIRA, C. A. et al. Reassessment of Copper Mineral Occurrence Through Electrical Tomography and Pseudo 3D Modeling in Camaquã Sedimentary Basin, Southern Brazil. **Pure and Applied Geophysics**, v. 176, n. 2, p. 737–750, 2019.
- MOTTA, P. E. F. DA et al. Relações solo-superfície geomórfica e evolução da paisagem em uma área do Planalto Central Brasileiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 6, p. 869–878, 2002.
- MUNSELL, A. H. **Munsell soil color charts**. Baltimore: Munsell Color Co., Incorp, 2000.
- NAHON, D. B. Evolution of iron crust in tropical landscape. In: COLEMAN, SM; DETHIER, DP. In: COLMAN, S. M.; DETHER, D. P. (Eds.). . New York: Academic Press Inc, 1986. p. 169–191.
- NAHON, D. B. Self-organization in chemical lateritic weathering. **Geoderma**, v. 51, n. 1–4, p. 5–13, 1991a.
- NAHON, D. B. **Introduction to the petrology of soils and chemical weathering**. New York: John Wiley and Sons, Inc., 1991b.
- NAHON, D.; BOCQUIER, G. Petrology of element transfer in weathering and soil systems. **Sciences Geologiques - Memoire**, v. 72, p. 111–119, 1983.
- NAHON, D.; MELFI, A.; CONTE, C. N. Présence d'un vieux système de cuirasses ferrugineuses latéritiques en Amazonie du Sud. Sa transformation in situ en latosols sous la forêt équatoriale actuelle. **Comptes rendus de l'Académie des sciences. Série 2, Mécanique, Physique, Chimie, Sciences de l'univers, Sciences de la Terre**, v. 308, n. 8, p. 755–760, 1989.
- NESBITT, H. W.; YOUNG, G. M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. **Nature**, v. 299, n. 5885, p. 715–717, out. 1982.

NESBITT, H. W.; YOUNG, G. M. Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 48, n. 7, p. 1523–1534, 1984.

NESBITT, H. W.; YOUNG, G. M. Formation and diagenesis of weathering profiles. **Journal of Geology**, v. 97, n. 2, p. 129–147, 1989.

OLIVIE-LAUQUET, G. et al. Release of trace elements in wetlands: Role of seasonal variability. **Water Research**, v. 35, n. 4, p. 943–952, 2001.

PARSEKIAN, A. D. et al. Multiscale geophysical imaging of the critical zone. **Reviews of Geophysics**, v. 53, p. 1–26, 2015.

PAULA E SILVA, F.; CHANG, H. K.; CAETANO-CHANG, M. R. Estratigrafia de subsuperfície do Grupo Bauru (K) no Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 35, n. 1, p. 77–88, 2005.

PAZ, S. P. A. **Desenvolvimento e otimização de métodos de controle de qualidade e de processo de beneficiamento para bauxitas gibbsíticas tipo-Paragominas**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2016.

PÉDRO, G.; CHAUVEL, A.; MELFI, A. J. Recherches sur la constitution et la genèse des Terras Roxas Estruturadas du Brésil: introduction a une étude de la pédogenèse ferralitique. **Ann Agron**, v. 27, p. 265–294, 1976.

QIU, X. et al. Comparison of the physicochemical properties and mineralogy of Chinese (Beihai) and Brazilian kaolin. **Ceramics International**, v. 40, n. 4, p. 5397–5405, 2013.

QUEIROZ, A. T. DE. **Análise e avaliação da demanda e da disponibilidade hídrica nos alto e médio curso do Rio Uberabinha e o abastecimento público em Uberlândia (MG)**. [s.l.] Universidade Federal de Uberlândia, 2012.

RADAM. **Levantamento dos recursos potencial naturais da terra - Volume 31RADAMBRASIL, PROJETO**. Rio de Janeiro: Ministério das Minas e Energia, 1983.

REDDY, M. K.; RAMESH, V.; KUMAR, V. S. Mode of occurrence and distribution of bauxite deposits in Andhra Pradesh and feasibility of aluminum industry. **Procedia Earth and Planetary Science**, v. 11, p. 115–121, 2015.

RENAUD, K. M.; WARDLAW, B. R.; HUBBARD, B. E. **Assessment of bauxite, clay, and laterite deposits in Afghanistan**. Reston, Virginia: U. S. Department of the Interior; U. S. Geological Survey, 2015.

RIBEIRO, D. T. P. Diagênese Das Rochas Do Membro Serra Da Galga , Formação Marília , Grupo Bauru (Cretáceo Da Bacia Do Paraná), Na Região De Uberaba , Minas Gerais . **Revista Brasileira de Geociências**, v. 31, n. 1, p. 7–12, 2001.

RIBEIRO, L. C. B. et al. Geoparque Uberaba–Terra dos Dinossauros do Basil (MG). In: **Geoparques do Brasil – Propostas**. Brasília: CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 2012. v. 1p. 583–616.

RIBEIRO, L. C.; CARVALHO, I. D. S. Peirópolis e Serra da Galga , Uberaba , MG. In: **Sítios geológicos e paleontológicos do Brasil**. Brasília: DNPM; CPRM; SIGEP, 2002. p. 389–402.

RICCOMINI, C. **Tectonismo gerador e deformador dos depósitos sedimentares pós-Gondwânicos da porção Centro-Oriental do Estado de São Paulo e áreas vizinhas**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 1995.

RICCOMINI, C. Arcabouço estrutural e aspectos do tectonismo gerador e deformador da Bacia Bauru no Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 27, n. 2, p. 153–162, 1997.

RIETVELD, H. A profile refinement method for nuclear and magnetic structures. **Journal of applied Crystallography**, v. 2, n. 2, p. 65–71, 1969.

ROSOLEN, V. et al. Evolution of iron crust and clayey Ferralsol in deeply weathered sandstones of Marília Formation (Western Minas Gerais State, Brazil). **Journal of South American Earth Sciences**, v. 79, p. 421–430, 2017.

RUXTON, B. P. Measures of the Degree of Chemical Weathering of Rocks. **The Journal of Geology**, v. 76, n. 5, p. 518–527, 1968.

SCHELLMANN, W. Geochemical differentiation in laterite and bauxite formation. **Catena**, v. 21, n. 2–3, p. 131–143, 1994.

SCHELLMANN, W. Discussion of “A critique of the Schellmann definition and classification of laterite” by R.P. Bourman and C.D. Ollier (Catena 47, 117-131). **Catena**, v. 52, n. 1, p. 77–79, 2003.

SCHWERTMANN, U.; KÄMPF, N. Properties of goethite and hematite in kaolinitic soils of southern and central Brazil. **Soil Science**, v. 139, n. 4, p. 344–350, 1985.

SCHWERTMANN, U.; TAYLOR, R. M. Iron Oxides. In: DIXON, J. B.; WEED, S. B. (Eds.). **Minerals in Soil Environments**. 2nd. ed. Madison, WI: SSA Book Series, 1989. p. 379–438.

SENSEFLY LTD. Extended User Manual: eBee and eBee. n. September, p. 166, 2014.

SUGUIO, K. **Formação Bauru: Calcários e sedimentos detríticos associados - Volume I**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 1973.

SUGUIO, K.; BARCELLOS, J. S.; MONIZ, A. C. Caracterização sedimentológica e mineralógica de formações superficiais argilo-arenosas peculiares dos planaltos do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba. In: **Congresso Brasileiro de Geologia “Anais”**. Ouro Preto: SBG, 1976. v. 29p. 241–247.

TAKAHASHI, T.; DAHLGREN, R. A. Nature, properties and function of aluminum-humus complexes in volcanic soils. **Geoderma**, v. 263, p. 110–121, 2016.

TARDY, Y. **Pétrologie des latérites et des sols tropicaux**. [s.l.: s.n.].

TAVARES, C. P.; CANDEIRO, C. R. A.; SIMBRAS, F. Levantamento da geologia da Bacia Bauru (Cretáceo Superior) na região do pontal do Triângulo Mineiro, Minas Gerais. **Horizonte Científico**, v. 6, n. 1, p. 20, 2012.

TINER, R. W. **Wetland Indicators: a guide to wetland identification, delineation, classification, and mapping**. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2017.

TROLARD, F.; SOULIER, A.; CURMI, P. Les formes solides du fer en milieu hydromorphe

acide: une approche compartimentale par dissolution sélective. **Comptes rendus de l'Académie des sciences. Série 2, Mécanique, Physique, Chimie, Sciences de l'univers, Sciences de la Terre**, v. 316, n. 10, p. 1463–1468, 1993.

VALADÃO, R. C. Geodinâmica de superfícies de aplanamento, desnudação continental e tectônica ativa como condicionantes da megageomorfologia do Brasil Oriental. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 10, n. 2, p. 77–90, 2009.

VEPRASKAS, M. J.; CALDWELL, P. V. Interpreting morphological features in wetland soils with a hydrologic model. **Catena**, v. 73, n. 2, p. 153–165, 2008.

VEPRASKAS, M. J.; LINDBO, D. L. Redoximorphic Features as Related to Soil Hydrology and Hydric Soils. In: LIN, H. (Ed.). . **Hydropedology**. 1 st ed. Waltham, MA - USA: Academic Press; Elsevier B. V., 2012. p. 143–172.

VIEIRA, L. B. et al. Geophysical modeling of the manganese deposit for Induced Polarization method in Itapira (Brazil). **Geofísica Internacional**, v. 55, n. 2, p. 107–117, 2016.

WILDING, L. P. et al. Hydropedology in caliche soils weathered from Glen Rose Limestone of Lower Cretaceous age in Texas. In: LIN, H. (Ed.). . **Hydropedology: Synergistic Integration of Soil Science and Hydrology**. 1 st ed. Waltham, MA - USA: Academic Press; Elsevier B.V., 2012. p. 285–327.

YAYA, A. et al. Characterisation and identification of local kaolin clay from Ghana: A potential material for electroporcelain insulator fabrication. **Applied Clay Science**, v. 150, p. 125–130, 2017.

YU, W. et al. Climatic and hydrologic controls on upper Paleozoic bauxite deposits in South China. **Earth-Science Reviews**, p. 0–1, 2018.