

CARACTERÍSTICAS ESPECTRAIS E GEOQUÍMICAS DE PERFIS DE ALTERAÇÃO INTEMPÉRICA EM GRANITÓIDES DA REGIÃO LESTE DO ESTADO DE SÃO PAULO, BRASIL

TOMOYUKI OHARA⁽¹⁾
JAIRO R. JIMÉNEZ RUEDA⁽²⁾
JUÉRCIO TAVARES DE MATTOS⁽³⁾

⁽¹⁾INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Caixa Postal 515, CEP 12.201-970, São José dos Campos, SP, Brasil.
ohara@ltid.inpe.br

⁽²⁾IGCE/UNESP - Instituto de Geociências e Ciências Exatas - UNESP de Rio Claro
Caixa Postal 178, CEP 13.506-900, Rio Claro, SP, Brasil.
jairorjr@rc.unesp.br

⁽³⁾FEG/UNESP – Escola de Engenharia - UNESP de Guaratinguetá
Caixa Postal 205, CEP 12.500-000, Guaratinguetá, SP, Brasil.
juercio@feg.unesp.br

Abstract: This paper reports the relationship between the spectral behaviour and weathering potential index (IPA) versus product index (IPR), obtained from the pedogeochemical analysis, in several samples of weathering profiles. The pedogenetic development of weathering profiles was based on the behaviour of the curves using weathering index of Reiche (1943, 1950). The pedogeochemical data were obtained in chemical analysis by X-ray fluorescence in granite-gneiss samples. The curves of the Bidirectional Reflectance Factors in the 400 to 2500 nm spectral range were obtained, using a laboratory spectroradiometer.

Keywords: spectral behavior and pedogeochemical characteristics, weathering profiles, granite-gneiss, eastern border of São Paulo state

1. Introdução

Este artigo apresenta o estudo do comportamento espectral de perfis de alteração intempérica em granitóides da região leste do estado de São Paulo, juntamente com a análise integrada de dados pedogeoquímicos de alteração intempérica e as informações do meio físico, com a finalidade de uma avaliação da evolução pedogênica em granitóides, particularmente na área de ocorrência de duas unidades litológicas constituídas de biotita gnaisses granitóides e xistos (designada pela legenda bgx) e de granitóides a duas micas (ydm), distribuídas na região leste do estado de São Paulo, Brasil.

2. Procedimentos e sistematização

As informações de unidades homogêneas do meio físico foram obtidas através da análise e interpretação de imagens TM/Landsat, e conjugadas com dados coletados em campo do trabalho de zoneamento geoambiental da região do alto-médio Paraíba do Sul, efetuado por Ohara (1995).

Os dados laboratoriais de determinações químicas, físicas e mineralógicas foram obtidos nos laboratórios do IGCE/UNESP de Rio Claro, seguindo as normas ABNT e métodos analíticos relacionados com a quantificação de elementos trocáveis e totais, além de análises por fluorescência de raios-X e análise térmica diferencial.

Os índices pedogeoquímicos aqui considerados foram o Índice de Alteração Potencial (IPA) e o Índice de Produto (IPR), os quais correspondem àqueles utilizados por Reiche (1943; 1950) e Colman (1982), para avaliar e evidenciar os diferentes níveis de alteração intempérica, e são definidos por:

$$IPA = 100(\mathbf{Sbases} - H_2O) / (\mathbf{Sbases} + SiO_2 + \mathbf{SR}_2O_3)$$

$$IPR = 100(SiO_2) / (SiO_2 + \mathbf{SR}_2O_3), \text{ onde}$$

$$\mathbf{Sbases} = Mg + Ca + Na + K$$

$$\mathbf{SR}_2O_3 = Al_2O_3 + Fe_2O_3 + TiO_2.$$

Outros índices pedogeoquímicos analisados (KI, KII, CIA) foram baseados em trabalhos da EMBRAPA/SNLCS (1979), Mattos e Jiménez-Rueda (1990) e Ohara et alii (1996a).

Numa fase complementar da pesquisa foi considerada também, o estudo das curvas de fator de reflectância bidirecional espectral, das amostras coletadas em campo por Ohara (1995) em diferentes horizontes/volumen dos perfis de alteração intempérica, através do sistema sensor “Dual Field of View Mark IV Infra-Red Intelligent Spectroradiometer” (IRIS) da GER (s.d.).

Este sistema sensor abrange uma janela espectral entre 400 e 2.500 nm, numa varredura contínua em que adquire dois espectros, um da amostra analisada e outro do padrão de referência (placa de “spectralon” cinza), adaptada para os 875 diferentes comprimentos de onda do IRIS.

A resolução espectral do sensor utilizado é de 2 nm na faixa entre 400 e 1.000 nm, e de 4 nm na região entre 1.000 e 2.500 nm.

O procedimento de aquisição foi medir a radiância espectral proveniente da amostra e compará-la com a da placa de referência com padrão lambertiano de reflexão e de reflectância máxima (ou conhecida). As medições na amostra e na placa de referência foram executadas sob condições angulares (incidência e reflexão) idênticas.

As amostras analisadas foram selecionadas em peneiras de malha de 2 mm e consideradas na condição de terra fina seca ao ar (TFSA). Para as medições espectrorradiométricas, as amostras foram acondicionadas em recipientes redondos de vidro (diâmetro de 10 centímetros e profundidade de 1 centímetro), de forma a assegurar que somente a amostra estivesse sendo visada pelo sensor.

3. Discussão dos resultados

O litotipo biotita gnaisses granitóides (bgx) encontra-se representado por três (3) perfis de alteração intempérica, e o granitóide a duas micas (ydm) por sete (7) perfis (**Figura 1 e Tabela 1**).

Com a progressão da alteração intempérica, o índice IPA decresce rapidamente com a perda de bases e com o ganho da água, e o índice IPR decresce mais lentamente com a perda da sílica. R_2O_3 funcionam como uma referência nesses índices.

Os perfis de alteração desenvolvidos a partir do litotipo biotita gnaisses granitóides (bgx) mostram duas tendências cronopedológicas. Uma de solos mais jovens como o Podzólico Vermelho Amarelo (Tb, A moderado), onde a formação de um volume de alteração intempérica (VAI) representado pelo horizonte Bt (argílico) está presente (perfil 58GT).

Este perfil 58GT mostra durante o seu desenvolvimento, variações no seu desenvolvimento pedogênico, como pode ser observado na **Figura 1**, onde

observa-se uma crescente alteração potencial (IPA) de $\pm 60\%$, acompanhada por incrementos de 25% no produto de alteração (IPR), com referência ao material original. Isto também demonstra a homogeneidade existente entre os elementos bandeados deste litotipo.

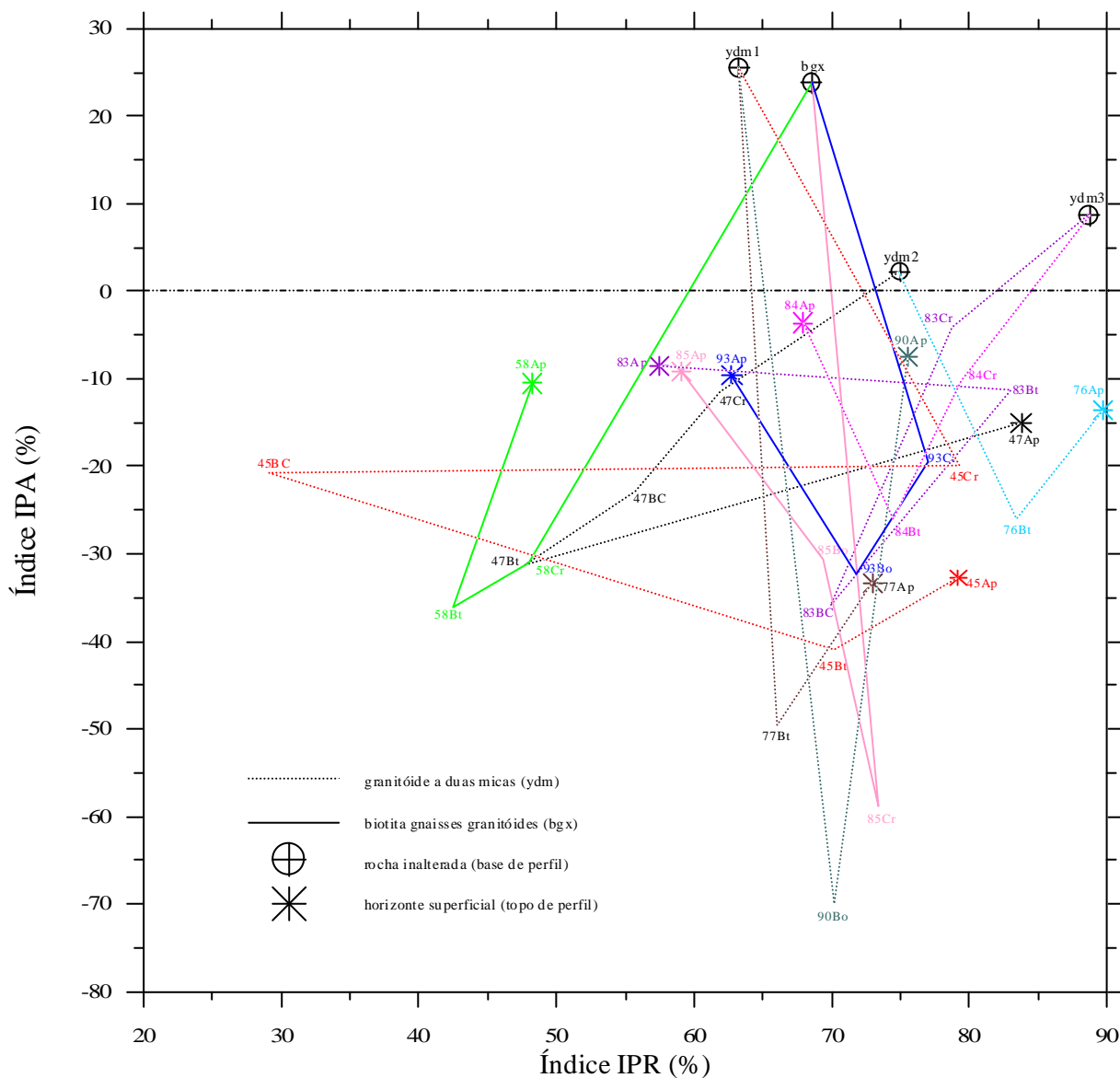


Fig. 1 – Gráfico dos índices pedogeoquímicos de alteração intempérica IPA versus IPR, relacionados com biotita gnaisses granitoides (bgx) e granitoides a duas micas (ydm). Dados provenientes da **Tabela 1**.

De outro lado, observa-se o incremento de intemperismo (IPA) para $\pm 65\%$, e com relação ao material de origem, um produto de alteração (IPR) de $\pm 30\%$, com efeitos de retrogênese por enriquecimento superficial e/ou reorganizações plásmicas no (VAI) horizonte Ap.

Tabela 1: Valores dos índices pedogeoquímicos de perfis de alteração intempérica, relacionados com biotita gnaisses granitóides (bgx) e granitóides a duas micas (ydm).

N.Amostra- Horizonte	Intervalo (cm)	Leg. Litol.	Leg. Geopedo	Leg. Fisio	Leg. Morfo	Leg. Cai	Leg. Uai	Leg. Paragênese	IPA (%)	IPR (%)	KI (%)	BASES (%)	IAP (%)	CIA (%)	Areia Tot (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	M. Org. (%)
58GT-Ap	0-20	bgx							-10,58	48,23	1,07	0,37	41,98	74,05	58	7,38	2,27
58GT-Bt	20-300	bgx	PVaud4	Pamdo	AE truncado	Latos-Podz	Mono	Caul	-36,07	42,43	0,79	0,17	26,01	86,29	40	4,48	0,23
58GT-Cr	>300	bgx			AT-1.100 m				-30,97	48,00	0,97	0,07	11,62	94,74	47	3,66	0,29
85JC-Ap	0-30	bgx							-9,27	59,09	1,69	0,09	9,90	94,59	62	8,17	2,68
85JC-Bo	30-200	bgx	PVaud	PmFdo	Borda BE	Latos	Ali-Mono	Esmec-Caul	-30,57	69,40	2,72	0,07	7,29	94,08	39	7,66	0,23
85JC-Cr	>200	bgx	(Lveus/ud)		BT-640 m				-58,89	73,37	3,34	0,32	17,74	87,73	71	6,22	0,28
93PB-Ap	0-25	bgx							-9,68	62,63	1,93	0,16	18,21	89,31	64	6,48	2,13
93PB-Bo	25-250	bgx	PVaud	PmFdo	Borda BE	Latos	Ali-Mono	Caul-Esmec	-32,31	71,85	2,94	0,08	7,34	94,38	43	5,75	0,44
93PB-Cr	250-300	bgx	(Lveus/ud)		BT-720 m				-19,48	76,95	3,74	0,10	8,09	93,18	58	4,15	0,76
93PB-R	>300	bgx							23,84	68,52	2,49	0,93	80,19	54,76	--	5,42	0,84
45NS-Ap	0-20	ydm1							-32,67	79,20	4,20	0,16	8,40	93,30	53	2,81	1,92
45NS-Bt	20-130	ydm1	PVapr	PaFdo	BE(?)	Latos	Ali-Mono	Caul-Esmec	-41,00	70,21	2,57	0,12	7,87	95,89	48	3,52	0,34
45NS-BC	130-220	ydm1			F. Nativid.				-20,66	29,12	0,45	0,27	34,07	90,70	75	6,53	0,08
45NS-Cr	>220	ydm1			AT-900 m				-19,91	79,68	4,29	0,30	15,13	90,33	69	2,74	0,08
77PB-Ap	0-20	ydm1							-33,25	73,03	3,27	0,02	1,07	98,95	40	6,30	3,73
77PB-Bt	20-200	ydm1	PVaud3	Pbfdo	BE/AE	Podz-Camb	Mono-Bi	Caul-Mont	-49,51	66,08	2,34	0,00	0,28	99,77	28	7,17	0,57
77PB-R	>200	ydm1			BT-740 m				25,62	63,24	2,20	1,21	85,68	52,61	--	9,95	0,34
90PB-Ap	0-40	ydm1	LVaud4	Pmmdo	BE truncado	Latos-Podz	Mono	Caul	-7,43	75,55	3,66	0,02	0,97	98,91	44	5,64	4,91
90PB-Bo	40-200	ydm1			BT-710 m				-70,04	70,15	2,77	0,02	1,78	98,12	38	5,81	0,70
47SL-Ap	0-30	ydm2							-15,10	83,75	5,94	0,17	10,86	87,34	67	3,61	1,57
47SL-Bt	30-120	ydm2	PVaud	PmFdo	Trend(?)	Latos	Ali-Mono	Gibb-Caul	-31,26	47,67	0,99	0,11	19,16	91,47	45	5,76	0,38
47SL-BC	120-250	ydm2	(Lveus/ud)		F. Taxaq.				-22,79	55,70	1,34	0,18	29,76	85,98	55	3,69	0,18
47SL-Cr	250-300	ydm2			BT-760 m				-11,47	61,88	1,69	0,26	40,11	79,70	64	2,30	0,03
76PB-Ap	0-30	ydm2							-13,62	89,74	12,67	0,39	11,16	76,79	66	5,01	2,10
76PB-Bt	30-250	ydm2	PVa/eud	Pbmmdo	AE	Podz	Bi	Mont	-26,08	83,47	7,61	0,17	8,45	87,33	41	8,88	0,75
76PB-R	>250	ydm2			BT-740 m				2,19	74,94	3,66	0,61	39,64	73,98	--	7,11	0,23
83JC-Ap	0-25	ydm3							-8,65	57,50	1,60	0,24	26,76	86,35	65	8,31	0,90
83JC-Bt	25-80	ydm3	PVeud	PbFdo	BE	Podz	Bi	Mont	-11,20	82,99	5,67	0,16	10,53	88,47	64	3,56	0,93
83JC-BC	80-250	ydm3	(PVaus)		BT-650 m				-35,81	69,96	2,73	0,08	6,58	94,76	38	6,20	0,32
83JC-Cr	250-600	ydm3							-4,16	78,70	4,16	0,43	28,68	78,24	82	3,47	0,24
84JC-Ap	0-30	ydm3							-3,58	67,89	2,25	0,23	28,81	82,99	66	3,04	1,69
84JC-Bt	30-150	ydm3	PValud	Pbfdn	BE	Podz	Bi	Mont	-25,91	74,49	3,15	0,13	12,24	90,57	44	3,16	0,54
84JC-Cr	>150	ydm3			BT-780 m				-10,25	79,36	4,13	0,25	21,22	82,69	69	2,48	0,74
84JC-R	>150	ydm3							8,64	88,68	8,44	0,83	38,72	55,78	--	1,54	0,33

PSi = SiO₂ / 60
PAI = Al₂O₃ / 102
PCa = CaO / 56

PMg = MgO / 40
PFe = Fe₂O₃ / 160
PTi = TiO₂ / 80

PK2 = K₂O / 94
PNa = Na₂O / 62
PH2 = H₂O / 18

IPA = (PCa+PMg+PK2+PNa - PH2) / (PCa+PMg+PK2+PNa+PSi+PTi+PAI+PFe) * 100
IPR = PSi / (PSi+PTi+PAI+PFe) * 100
KI = PSi / PAI

BASES = (PCa+PMg+PK2+PNa) / PAI
IAP = ((PK2/0.25) + (PNa/0.35) + (PCa/0.70) + (PMg/0.90)) * 100
CIA = PAI / (PAI+PCa+PNa+PK2) * 100

Entretanto a mineralogia está de acordo com a situação deste perfil em alto estrutural fraturado, no qual é evidente esperar-se unidades de alteração intempérica (UAI) do tipo monossilático-alítico (KI = 0,79 e paragênese de gibbsita). Esta aparente retrogênese, também pode estar relacionada com a mudança na mineralogia do bandejamento típico destes litotipos.

Numa análise das curvas de fator de reflectância bidirecional espectral do perfil 58GT (**Figura 2a**), observa-se que existe uma boa distinção entre as curvas espectrais dos horizontes coletados, em quase a totalidade da faixa analisada, quando a partir de 2.200 nm as curvas se entrelaçam. Esse entrelaçamento de curvas é bastante freqüente no comportamento dos perfis 85JC (**Figura 2b**) e 93PB (**Figura 2c**).

Conforme determinado pelas análises geoquímicas, esse perfil de alteração apresentou a paragênese da argila do tipo caulinita, agora comprovada pelas feições de dupla absorção bastante evidenciada em 1.400 nm e mais tenuamente em 2.200 e 1.900 nm (Hunt & Salisbury, 1970).

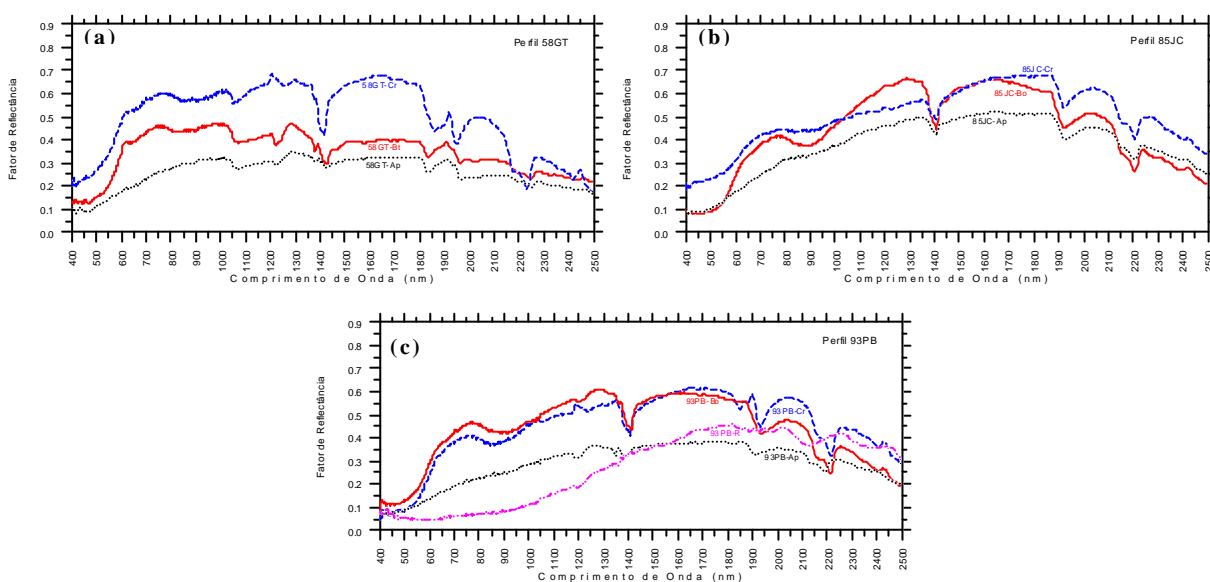


Fig. 2 – Curvas de fator de reflectância bidirecional espectral dos perfis 58GT (a), 85JC (b) e 93PB (c).

Em todas essas curvas da **Figura 2** foram verificadas as feições de absorção atribuídas a goethita (em 435e 480 nm). No caso específico do horizonte Bt do perfil 58GT, além dos intervalos acima citados, ainda foram verificadas essas feições de absorção em 650 e 917 nm (**Figura 2a**). A presença de feições atribuídas a hematita foram assinaladas principalmente em 445, 650 e 885 nm (Hunt et al., 1971).

Os outros dois perfis de alteração intempérica (85JC e 93PB) apresentam-se com características morfogenéticas de Latossolos (Oxissolos), o que vem a demonstrar pelo comportamento da tendência de seus gráficos (**Figura 1**), que o material de origem é verdadeiramente bandeado e, que os produtos de alteração que deram origem aos volumes e unidades de alteração intempérica (VAI e UAI) típicos de Latossolos (Oxissolos) são essencialmente alíticos-monossiláticos.

Esta afirmação pode ser confirmada tanto pela mineralogia de argilas como também pelo índice CIA de 94% (VAI Bo) destes solos, o que demonstra o avançado estado intempérico dos perfis em concordância com a diagênese ocorrida em condições de área de alto estrutural e alto topográfico, apesar da constatação, em ambos os perfis, da existência de baixos estruturais em baixos topográficos. As condições latossólicas foram determinadas pelas ações (de alta lixiviação e percolação, e profunda alteração devida à intensa circulação de água), facilitadas pelas estruturas de cisalhamento do falhamento de Taxaquara.

Os perfis de alteração intempérica relacionados ao litotipo de granitóides a duas micas (ydm1, ydm2 e ydm3), correspondem com os pedons de solos Podzólicos muito evoluídos (em ordem cronológica 77PB, 45NS, 47SL e 84JC). Esses perfis apresentam índices de intemperismo total CIA que variam desde 99% a 90%, e encontram-se em condições de altos estruturais com fraturamento (falhas de Taxaquara e Natividade da Serra).

Entretanto, observou-se em todos esses perfis (**Figura 1**) um comportamento de retrogênese marcante, inclusive com ganhos de sílica associados a elementos alcalinos/alcalino terrosos que geraram uma reorganização plásmica, evidenciada por vestígios de gibbsitas que estão sendo substituídas por montmorilonita na atualidade. Em outras palavras, isto significa que as unidades alíticas estão sendo substituídas por bissialíticas/monossialíticas, devido ao abatimento das estruturas que anteriormente tinham sofrido uma latossolização/alitização intensa, comprovado pelos índices CIA tão elevados.

Outra observação interessante é que os perfis 76PB e 77PB apresentam-se com comportamentos semelhantes, inclusive em algumas características físicas, representadas pela fisiografia de planalto baixo, fracamente dissecado e com feições texturais/estruturais orientadas (Pbfd) e com altitude de 740 metros.

Algumas das características interessantes do perfil 77PB são referentes à quase total ausência de elementos solúveis e o mais alto valor do índice CIA (99,77%), o qual caracteriza a presença de coberturas de alteração intempérica (CAI) latossólicas e unidades de alteração intempérica (UAI) monossialíticas a bissialíticas.

Numa análise nas curvas do fator de reflectância bidirecional espectral dos quatro perfis (77PB, 45NS, 47SL e 84JC) (**Figura 3**), pode-se observar a presença constante das feições de absorção correspondente a goethita (435 nm) e em algumas curvas, também em 480, 650 e 920 nm. Outra presença constante é atribuída à gibbsita em 1.400 e 1.900 nm. Nos perfis 77PB, 45NS e 84JC observaram-se a presença de feições atribuídas à montmorilonita (1900 e 2.200 nm).

As variações no gráfico da **Figura 1** do perfil 83JC, representado pelo solo Podzólico Vermelho Amarelo (Tb, A fraco) relativamente jovem, dominado por unidades bissialíticas e índice CIA de 88%, estão relacionadas com a presença de anomalias morfoestruturais negativas associadas a baixo topográfico (baixas alteração, lixiviação e percolação, e alta e direcionada circulação de água), e também com as características de bandeamento do material de origem.

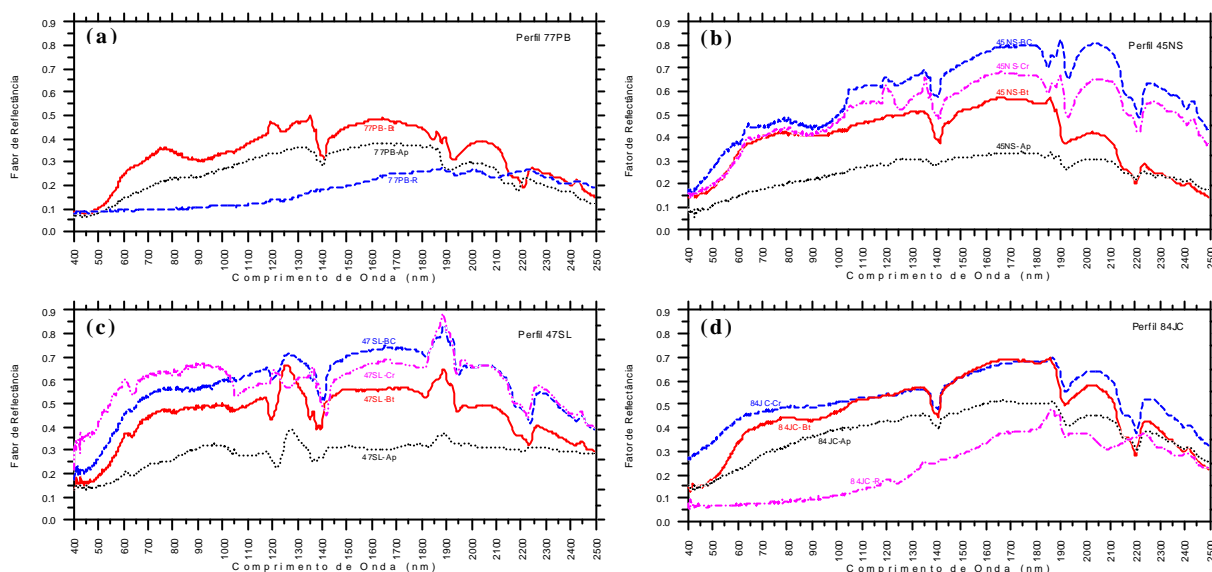


Fig. 3 - Curvas de fator de reflectância bidirecional espectral dos perfis 77PB (a), 45NS (b), 47SL (c) e 84JC (d).

Na análise das curvas de reflectância dos perfis 76PB e 83JC (**Figura 4a, b**), observou-se a existências de feições de absorção da goethita (435, 480 e 650 nm), além da presença da montmorilonita (1.900 e 2.200 nm).

O perfil de alteração 90 PB representa uma evolução intempérica muito intensa e apesar de encontrar-se situado num região de anomalia de baixo estrutural truncado, assemelha-se às condições de alto estrutural e alto topográfico (intemperismo muito forte, alta percolação e lixiviação, com intensa circulação de água). O índice CIA de 98% é correlacionado com as unidades alíticas/monossilíticas.

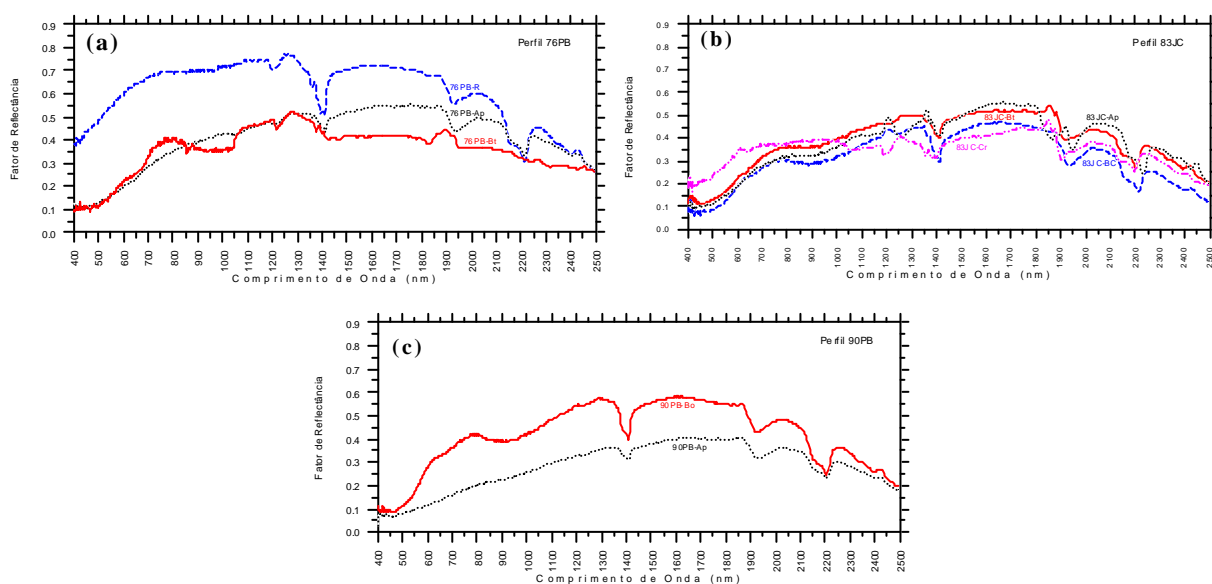


Fig. 4 - Curvas de fator de reflectância bidirecional espectral dos perfis 76PB (a), 83JC (b) e 90PB (c).

Observando-se esse perfil 90PB no gráfico da **Figura 1**, verifica-se que a alteração inicia-se em + 25% e mostra incrementos total de alteração intempérica de $\pm 95\%$, sem quase nenhuma perda dos componentes iniciais, como pode ser observado no índice IPR. Já do VAIs Bo para Ap, verifica-se uma ação de retrogênese, devido possivelmente a movimentos mais recentes, e/ou fraturamentos que recondicionaram o comportamento e a intensidade de fluxos nas soluções de alteração, com a geração de uma reorganização plásmica, como é evidenciado pelos índices IPA/IPR.

Fazendo-se uma análise nas curvas do fator de reflectância bidirecional espectral do perfil 90PB (**Figura 4c**), mais especificamente em seu horizonte superficial (Ap), verifica-se que até a região correspondente ao comprimento de onda de 1.350 nm, a curva tem um comportamento praticamente retilíneo, muito possivelmente devido a presença da maior quantidade de matéria orgânica (4,91%) entre todos os perfis analisados. Também é bastante característico as feições de dupla absorção (em 1.400 e 2.210 nm) atribuídas à presença da caulinita.

4. Considerações finais

Verificou-se a possibilidade de estudos complementares através da análise de índices pedogeoquímicos de perfis de alteração intempérica e de dados de comportamento espectral, podendo-se, inclusive, caracterizar a presença de retroevolução pedogenética em antigas regiões profundamente alteradas.

A análise integrada entre os diversos índices pedogeoquímicos com informações de anomalias morfoestruturais e de unidades e coberturas de alteração intempérica, tem-se apresentado bastante promissor, visto que é possível observar importantes relações entre a presença de anomalias morfoestruturais e o condicionamento da interação de fatores e processos de evolução pedogenética, inclusive com o condicionamento do desenvolvimento das coberturas e das unidades de alteração intempérica.

Procurou-se com a aquisição e o estudo das curvas de fator de reflectância bidirecional espectral, das amostras de diferentes horizontes/volumen de perfis de alteração intempérica, através do sistema sensor “Dual Field of View Mark IV Infra-Red Intelligent Spectroradiometer” (IRIS), relacionar e avaliar o comportamento espectral no desenvolvimento pedogenético desses perfis de alteração intempérica.

No entanto, é necessário dar continuidade aos estudos relacionados com a aquisição e análise das características espectrais dos constituintes do meio físico, principalmente com a finalidade de auxiliar os levantamentos e classificações de solos tropicais.

Referências bibliográficas

- COLMAN, S.M. Chemical weathering of basalts and andesites: evidence from weathering rinds. U.S. Geological Survey Professional Paper, 1246, 51 p. 1982.
- EMBRAPA/SNLCS Manual de métodos de análises de solo. Rio de Janeiro, EMBRAPA/SNLCS - Serviço Nacional de Levantamento e Conservação dos Solos. 1979.
- HUNT, G.R. & SALISBURY, J.W. Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks: I. Silicate minerals. *Modern Geology*, 1: 283-300. 1970.
- HUNT, G.R.; SALISBURY, J.W.; LENHOFF, C.J. Visible and near-infrared spectra of mineral and rocks: III. Oxides and hidroxides. *Modern Geology*, 2: 195-205, 1971.

GER (Geophysical Environmental Research Corp.) Mark IV Dual Field of View IRIS Manual. New York, 147 p. (s.d.).

MATTOS, J.T. de; JIMÉNEZ-RUEDA, J.R. Estudos das correlações entre respostas espectrais e os índices de alteração intempéricas dos maciços rochosos (cristalino) numa região do litoral paulista. In: VI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Manaus, 1990.

OHARA, T. Zoneamento geoambiental da região do alto-médio Paraíba do Sul (SP) com sensoriamento remoto. Rio Claro, UNESP, IGCE, 235 p. (Tese de Doutorado). 1995.

OHARA, T.; JIMÉNEZ-RUEDA, J.R.; MATTOS, J.T. de Análise correlativa de dados geoquímicos com as anomalias morfoestruturais para a caracterização pedogenética da região do alto-médio Paraíba do Sul. In: Congresso Latinoamericano de Ciência do Solo, 13., (Solo/Suelo 96), Águas de Lindóia, SP, agosto de 1996. Anais em CD-ROM. 1996a.

REICHE, P. A survey of weathering processes and products. New Mexico University Publication in Geology, n° 3, 95 p. 1950.

REICHE, P. Graphic representation of chemical weathering. Journal of Sedimentary Petrology, v. 13, p. 58-68. 1943.